

**DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE D'ESTIMATION DU
DÉBIT EN RIVIÈRE DANS LES SITES NON-JAUGÉS À L'AIDE DE
L'IMAGERIE RADARSAT DANS L'EST DU CANADA**

Rapport de l'étape I

Par

Andrés Jacome
Karem Chokmani
Monique Bernier
Yves Gauthier
Jimmy Poulin
Simon Perreault
André St-Hilaire

Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement
Québec (Québec), Canada
G1K 9A9

Rapport de recherche R1507

Mai 2014

Avant-propos

Le présent rapport de recherche est mené dans le cadre d'un programme de développement d'applications en observation de la terre (PDAOT), financé par l'Agence spatiale canadienne (ASC). Le PDAOT supporte des projets de recherche et de développement visant l'exploitation des missions d'observation de la Terre par l'ASC. L'objectif principal de ce projet est de développer une méthodologie d'estimation du débit en rivière dans les sites non-jaugés à l'aide de l'imagerie d'archives RADARSAT-1&2 dans l'Est du Canada (les provinces de Québec, le Nouveau Brunswick, la Nouvelle-Écosse, l'Île-du-Prince-Édouard et Terre-Neuve-et-Labrador).

Le projet est structuré en trois étapes :

- Étape I : Développement d'une base de données d'images RADARSAT-2 (RS-2) et de données hydrométriques, physiographiques, climatologiques, et cartographiques pour les sites jaugés sélectionnés. Développement de la courbe de tarage satellitaire pour chaque site jaugé couvert par les images RS-2.
- Étape II : Développement d'une base de données d'images RADARSAT-1 (RS-1). Développement de la courbe de tarage satellitaire pour chaque site jaugé couvert par les images RS-1.
- Étape III : Développement du modèle d'estimation de débit pour les sites non-jaugés et le concept de l'automatisation de la procédure.

Le présent document correspond au rapport final de l'étape I. La première partie du rapport est consacrée à la méthodologie développée afin d'accomplir les objectifs établis pour cette étape du projet. Ceci concerne essentiellement la sélection des stations hydrométriques (ou sites jaugés) à analyser, le traitement d'images RS-2, la procédure automatisée d'extraction de pixels d'eau pour le calcul de la largeur effective et la distance d'intégration permettant le développement des courbes de tarage satellitaire, ainsi que la consolidation de la base de données. La seconde partie porte sur l'analyse des résultats obtenus, les conclusions et les recommandations pour les étapes suivantes.

Les auteurs tiennent à remercier l'ASC, Environnement Canada et le Centre d'expertise hydrique du Québec pour leur support financiers et/ou technique reçu au cours de cette étape.

Table des matières

Avant-propos.....	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	ix
1 Introduction	11
2 Méthodologie.....	15
2.1 Sélection des stations hydrométriques et traitement d'images RS-2.....	15
2.2 Élaboration de la courbe de tarage satellitaire.....	17
2.3 Base de données	24
2.3.1 Données climatologiques	24
2.3.2 Données hydrométriques.....	24
2.3.3 Réseau hydrographique	24
2.3.4 Données d'élévation	25
2.3.5 Données d'utilisation du sol	25
2.3.6 Réseau routier	25
2.3.7 Images RADARSAT	25
2.3.8 Données dérivées.....	26
2.3.9 BD finale	28
3 Résultats.....	31
3.1 Sélection des stations hydrométriques et traitement d'images RS-2.....	31
3.2 Élaboration de la courbe de tarage.....	36
3.3 Intégration et consolidation de la base de données.....	47
4 Conclusions et recommandations.....	51
5 Annexes.....	53
5.1 BD-bassin versant.....	53
5.2 BD-courbes de tarage satellitaire.....	58
5.2.1 Station hydrométrique « Yamaska » (02OG002)	58
5.2.2 Station hydrométrique « aux Brochets » (02OH008).....	60

5.2.3	Station hydrométrique « Richelieu » (02OJ007)	63
5.2.4	Station hydrométrique « Acadie » (02OJ026)	65
5.2.5	Station hydrométrique « Point Wolfe » (01BV006)	67
5.2.6	Station hydrométrique « Terra Nova » (02YS005)	69

Liste des tableaux

Tableau 1 : Changements prévus dans les livrables des étapes I & II, discutés dans la réunion mi-parcours de l'étape I (LT = lots de travaux).	14
Tableau 2 : Liste de variables climatologiques, physiographiques et cartographiques produite par station hydrométrique.....	29
Tableau 3 : Liste de classes d'occupation du sol.	30
Tableau 4 : Décompte des stations hydrométriques identifiées initialement.....	31
Tableau 5 : Décompte des stations hydrométriques retenues par province.....	32
Tableau 6 : Liste de stations hydrométriques retenues, et nombre total d'images RS-1&2 par station (signalé en gris les stations RS-2 analysées à la première étape).	33
Tableau 7 : Caractéristiques principales des stations hydrométriques analysées.....	45
Tableau 8 : Décompte des seuils Z_{mf} testés et les r^2 résultants (signalé en gris les stations avec faible rapport).	45
Tableau 9 : Paramètres des courbes de tarage satellitaire pour 6 sites jaugés RS-2 (équation 4), et la distance d'intégration.	46

Liste des figures

Figure 1 : Étapes du projet et livrables correspondants.	12
Figure 2 : Changements prévus dans les livrables des étapes I & II, en rapport avec l'étape III.	13
Figure 3 : Probabilité de la présence de neige/glace : (a) 5% printemps et (b) 50% automne (jour julien).....	16
Figure 4 : Diagramme de la méthode de calcul de la courbe de tarage locale.....	17
Figure 5 : Diagramme de la méthode de calcul de la probabilité d'appartenance à l'eau et la méthode de la logique flou automatisée.....	18
Figure 6 : Masque pour le calcul des paramètres statistiques de l'eau.....	18
Figure 7 : Exemple d'une Fonction d'appartenance logique floue « Z » (fuzzification).....	19
Figure 8 : Masque pour l'application du calcul de probabilité.....	19
Figure 9 : Obtention du masque pour l'application du calcul de la probabilité d'appartenance.	20
Figure 10 : Base de données de valeurs de We en fonction de la distance Lmax (longueur par section).....	21
Figure 11 : Quelques exemples du comportement de la rétrodiffusion en fonction du niveau d'inondation et le type de végétation sur les berges.....	22
Figure 12 : Angle azimutal de l'orbite du satellite par rapport à l'angle azimutal d'un tronçon du cours d'eau.....	23
Figure 13 : Distribution et surface des 77 bassins versants des sites jaugés retenus.....	27
Figure 14 : Stations hydrométriques identifiées initialement.	31
Figure 15 : Distribution spatiale des stations hydrométriques retenues.....	32
Figure 16 : Exemple de validation des orthoimages RS-2 (station Chateauguay, échelle approximative 1/35 000) : a) à corriger (DK_371116), b) bien orthorectifiée (DK_371266).....	34
Figure 17 : Exemple d'application des filtres de Lee et Enhanced Frost, par rapport à une orthoimage sur la rivière Richelieu non filtrée.	35
Figure 18 : Fenêtre de l'interface pour l'intercalibration des orthoimages.....	36
Figure 19 : Fenêtre de l'interface pour le calcul de la largeur effective.	37

Figure 20 : Sous-dossiers initiaux& après l'utilisation du script d'intercalibration.....	38
Figure 21 : Fréquence de la rétrodiffusion avant (a) et après la translation de l'histogramme (b) en utilisant le percentile 1 et la valeur -23 db comme référence.....	39
Figure 22 : Exemple de l'interprétation de la rétrodiffusion (échelle en db) sur un cours d'eau, après la translation de l'histogramme en utilisant le percentile 1 et la valeur -23 db comme référence.....	40
Figure 23 : Sous-dossiers résultants de l'utilisation de l'interface pour le calcul de la largeur effective.....	41
Figure 24 : Exemples d'images de probabilité d'appartenance Zmfsur la rivière Terra Nova (TN, station hydrométrique 02YS005). ..	42
Figure 25 : Exemples de deux courbes de tarage résultant de l'utilisation de l'interface pour le calcul de la largeur effective sur la rivière Terra Nova (TN, station hydrométrique 02YS005). .	43
Figure 26 : Exemples d'images de probabilité d'appartenance Zmf sur la rivière Terra Nova (TN, station hydrométrique 02YS005). ..	44
Figure 27 : Diagramme de la structure de données sur le support physique.....	47
Figure 28 : Structure relationnelle de la base de données spatiales Finale.....	48
Figure 29 : Interface d'interrogation dans ArcMap.....	49

1 Introduction

Les mesures de débit en rivière sont nécessaires pour la planification et la gestion durable des ressources en eau et pour les études sur le climat et l'écologie, entre autres. Toutefois, les stations du réseau hydrométrique canadien sont généralement localisées dans les zones habitées et/ou d'intérêt socio-économique évident. Par conséquent, la densité et la répartition spatiale de réseau hydrométrique ne sont pas optimales pour assurer un suivi opérationnel de l'ensemble des ressources hydriques canadiennes. Ainsi, des débits des rivières de larges territoires (souvent éloignées et/ou isolées) se retrouvent peu ou pas observés. Faute de moyen, de nombreuses sections de rivières localisées dans les zones habitées ne peuvent pas être couvertes par le programme d'observation de débit.

La disponibilité croissante de données de télédétection dans différentes régions du spectre électromagnétique et avec diverses résolutions et étendues spatiales augmente la possibilité de suivre le débit des rivières à l'aide des capteurs spatiaux et aéroportés. L'information hydrométrique produite à partir des données de télédétection permet une couverture régionale/globale et répétitive du territoire. L'estimation du débit de rivières à l'aide de telles approches fournit un moyen de maintenir, sinon étendre le réseau d'observation hydrométrique et ce, à des coûts raisonnables.

Une des approches préconisées consiste en l'établissement d'une corrélation entre des paramètres hydrauliques et morphologiques des rivières, produits à partir des données de télédétection, et les observations *in situ* du débit. Cette méthode nécessite l'emploi d'un grand nombre d'images pour la calibration et la validation du modèle. Dans ce sens, les données radar offrent un grand potentiel en raison de la sensibilité du signal radar à la présence de l'eau dans la scène en plus de sa capacité à opérer indépendamment des conditions météorologiques.

L'objectif principal du projet est de développer une méthodologie d'estimation du débit en rivière dans les sites non-jaugés à l'aide de l'imagerie d'archives RADARSAT-1&2 dans l'Est du Canada. La zone d'étude du projet est l'Est du Canada et couvre les provinces de Québec, le Nouveau Brunswick, la Nouvelle-Écosse, l'Île-du-Prince-Édouard et Terre-Neuve-et-Labrador. Les images RADARSAT acquises en eau libre (mode Fin) au-dessus de ces provinces (sans glace ni neige), constituent la première base de données du projet, à laquelle s'ajouteront des données hydrométriques, physiographiques, climatologique, et cartographiques des sites et de la zone d'étude. Ces données seront acquises auprès d'Environnement Canada et ses partenaires provinciaux, ainsi que dans la base de données GéoBase du Conseil canadien de la géomatique (COCG). Les résultats escomptés du projet sont un modèle d'estimation de débit en sites non-jaugés à l'aide de RADARSAT et un modèle conceptuel de traitements pour la mise en place d'une procédure automatisée de la méthodologie d'estimation de débit.

Le projet a été structuré en trois étapes principales, telles que listées ci-dessous (Figure 1) :

- Étape 1 : Développement d'une base de données d'images RADARSAT et de données hydrométriques, physiographiques, climatologiques, et cartographiques pour les 175 sites jaugés du projet
- Étape 2 : Développement de courbe de tarage ($We-Q$) pour chaque site jaugé
- Étape 3 : Développement du modèle d'estimation de débit pour les sites non-jaugés et le concept de l'automatisation de la procédure.

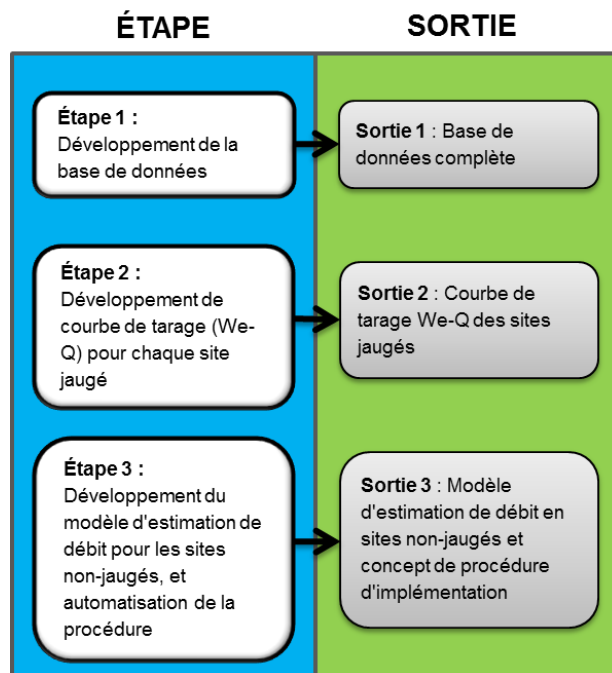


Figure 1 : Étapes du projet et livrables correspondants.

Pour l'étape I, visée dans le présent rapport, les livrables prévus sont les bases de données, pour les sites jaugés : largeur effective [$We f(L)$] et bassins versants. À l'étape II, la base de données « largeur effective (distance optimale) » serait utilisée afin de développer les courbes de tarages locales ($Q=\alpha * We^\beta$) des sites jaugés. A l'étape III, les courbes de tarages locales ainsi que la base de données de bassins versants serviront à l'établissement du modèle de régionalisation.

Néanmoins, des problèmes concernant le prétraitement des images d'archives RS-1 ont causé des modifications dans les livrables des étapes I & II, sans impact sur la répartition financière originale (Figure 2 & Tableau 1). Afin de compenser ce retard, le traitement des images RS-1 sera reporté à l'étape II dans sa totalité. C'est ainsi que dans l'étape I la base de données « largeur effective » sera obtenue seulement sur les sites jaugés avec couverture d'images RS-2. Les courbes de tarages locales, initialement prévues pour l'étape II, seront calculées sur les sites jaugés RS-2 dans l'étape I. La base de données de bassins versants pour tous les sites jaugés retenus (RS-1&2) sera livrée à l'étape I comme prévus premièrement. Autre livrable de l'étape I sera le jeu d'orthoimages RS-2.

Les nouveaux livrables de l'étape II seront : les orthoimages RS-1, la base de données « largeur effective » et les courbes de tarages locales pour les sites jaugés RS-1. À la fin de l'étape II les courbes de tarages de sites jaugés RS-1&2 seront intégrées afin d'établir à l'étape III (conjointement avec la base de données bassins versants) l'analyse de corrélation canonique qui permettra le développement du modèle de régionalisation (Figure 2).

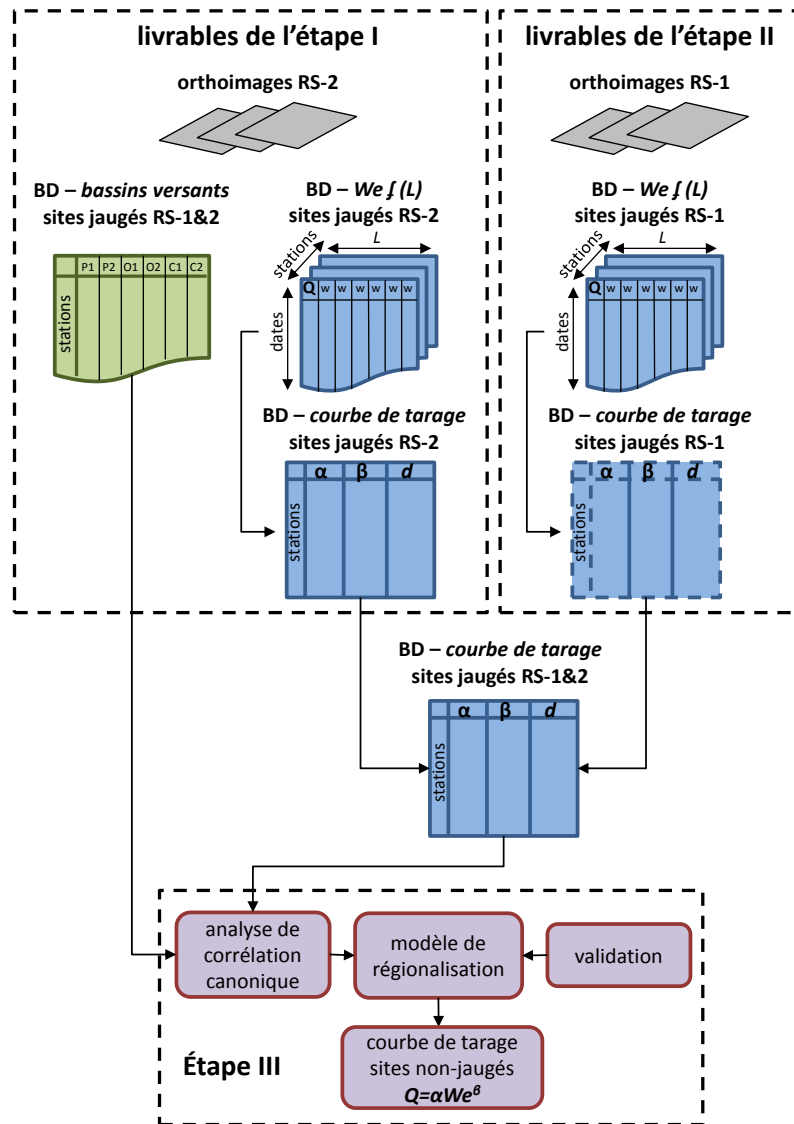


Figure 2 : Changements prévus dans les livrables des étapes I & II, en rapport avec l'étape III.

Tableau 1 : Changements prévus dans les livrables des étapes I & II, discutés dans la réunion mi-parcours de l'étape I (LT = lots de travaux).

Étape	Livrables (projet original)	LT	Livrables (modifications proposées)	LT
Étape I	Base de données (BD) des sites jaugés :	1.2.1 1.3.1	Base de données (BD) des sites jaugés :	1.2.1 1.3.1
	Bassins Versants (BD complète des sites jaugés RS-1&2).	1.2.1 1.2.2 1.3.1	Bassins Versants (BD complète des sites jaugés RS-1&2).	1.2.1 1.2.2 1.3.1
	Largeur effective [$We f(L)$] (BD complète RS-1&2).	1.1.2 1.1.3 1.3.1	Largeur effective [$We f(L)$] (BD complète RS-2).	1.1.2 1.1.3 1.3.1
	Orthoimages RS-1&2.	1.1.1 1.3.1	Orthoimages RS-2. Courbes de tarage ($We-Q$) des sites jaugés RS-2.	1.1.1 1.3.1 2.0.1 2.0.2
Étape II	Courbes de tarage ($We-Q$) des sites jaugés RS-1&2	2.0.1 2.0.2	Largeur effective [$We f(L)$] (BD complète RS-1).	1.1.2 1.1.3 1.3.1
			Orthoimages RS-1.	1.1.1 1.3.1
			Courbes de tarage ($We-Q$) des sites jaugés RS-1.	2.0.1 2.0.2
Étape III	Modèle d'estimation de débit en site non-jaugés et concept de procédure d'implémentation	3.0.1 3.0.2 3.0.3	Modèle d'estimation de débit en site non-jaugés et concept de procédure d'implémentation	3.0.1 3.0.2 3.0.3

2 Méthodologie

L'approche méthodologique retenue afin d'accomplir les objectifs de la première étape du projet est présentée en trois parties : sélection des stations hydrométriques et traitement d'images RS-2; développement de la procédure automatisée d'extraction de la courbe de tarage ($We-Q$) pour chaque site jaugé (RS-2); intégration et consolidation des bases de données spatiales (BD) : BD-bassins versants, et BD-Hydrométrie et images pour les sites jaugés RS-1&2, BD-courbes de tarage pour les sites jaugés RS-2 seulement.

2.1 Sélection des stations hydrométriques et traitement d'images RS-2

En ce qui concerne la sélection des stations hydrométriques, trois éléments sont évalués. D'abord, des critères liés aux stations hydrométriques elles-mêmes, comme :

- la couverture géographique des provinces de Québec, Terre-Neuve et Labrador, Nouveau Brunswick, Nouvelle-Écosse ainsi que l'Île-du-Prince-Édouard;
- la mesure du débit sans interruption lors des deux périodes de disponibilité des images RADARSAT : RS-1 (1997-2013) et RS-2 (2008-2013).

Ensuite, des critères associés aux conditions du chenal sont utilisés (avec l'aide de Google Earth), comme :

- la largeur nominale du chenal (minimum 30m, trois pixels radar approximativement);
- l'influence de la marée et des barrages en amont sur le débit du cours d'eau;
- l'influence de l'urbanisme et/ou de la végétation sur les berges du cours d'eau.

Finalement, en raison de l'énorme quantité des images RS-1 en archives (autour de 7000), nous avons dû ajouter des nouveaux critères de sélection d'images :

- le mode d'acquisition fin (résolution spatiale 8 m) et la polarisation HH;
- la couverture d'au moins une station hydrométrique;
- le nombre minimum d'images (RS-1&2) par station :
 - o pour des fins statistiques un minimum de 10 images par station a été fixé pour retenir à la fois une station et ses images;
 - o les images RS-2 sont privilégiées étant donné qu'elles sont déjà pré-géoréférencées. Pour une même station, lorsque le nombre d'images RS-2 est supérieur ou égal à 10, la commande RS-1 de cette station est éliminée;

- afin de garder des stations au nord du 50^{ème} parallèle, on abaisse le critère du nombre d'image par station à 5. Ceci permet d'avoir une bonne répartition de sites expérimentaux sur le territoire à étudier;
- la saison d'acquisition d'images (absence de neige et de glace) : un algorithme¹ de cartographie d'estimation de la probabilité d'enneigement selon le jour de l'année est utilisé (Figure 3). Pour chaque station, nous avons extrait à partir des images de la Figure 3, la date pour laquelle la probabilité de la présence neige/glace sur le pixel en question tombe en dessous de 5% au printemps et atteint 50% à l'automne. Seules les images dont la date d'acquisition est comprise entre ces deux dates sont retenues.

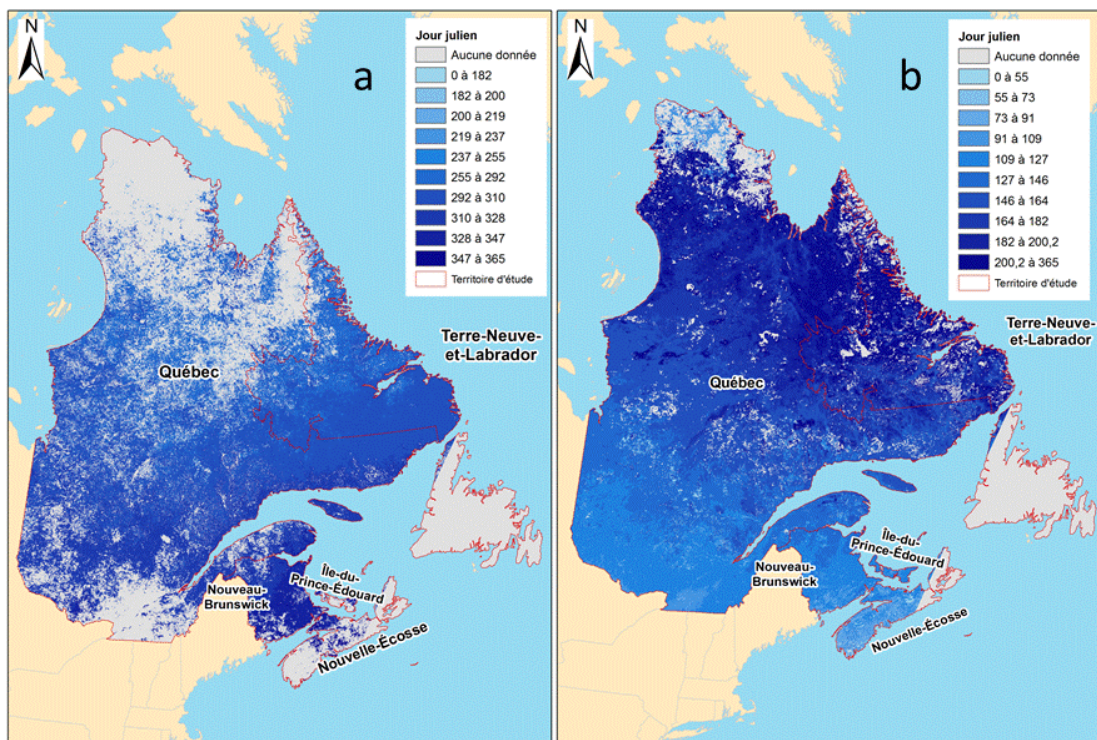


Figure 3 : Probabilité de la présence de neige/glace : (a) 5% printemps et (b) 50% automne (jour julien).

Les images RS-2 sont orthorectifiées en utilisant les paramètres orbitaux et un modèle numérique de terrain (Geomatca Ortho Engine). La procédure a été préalablement automatisée (Python). La qualité de l'orthorectification est évaluée manuellement.

L'évaluation de la qualité commence avec la visualisation d'une image d'un lot correspondant à une station hydrométrique. Ensuite, les données vectorielles (réseaux routier et hydrographique) sont superposées aux orthoimages. À l'aide de points de repères (ex. tracés

¹Roberge, S., Chokmani, K. et De Sève, D. 2010. Mise à jour de l'algorithme de cartographie de la présence de neige au sol à partir des données optiques du capteur NOAA-AVHRR. Rapport de recherche-R1171, Institut National de la Recherche Scientifique - Centre Eau Terre Environnement, Québec.

de routes ou intersections, tracés du littoral, etc.), la qualité de la rectification de l'image est évaluée visuellement. Si cette image est considérée comme étant bien positionnée, elle sera ainsi utilisée comme référence pour le reste de la vérification, par station hydrométrique.

Par la suite, des tests de filtrage sont effectués sur les images correctement orthorectifiées, afin d'améliorer la performance de la procédure automatisée d'extraction de pixels mouillés. Les filtres testés, disponibles dans PCI-Geomatica, sont : Enhanced Frost SAR Speckle Filter (FEFROST), Enhanced Lee SAR Speckle Filter (FELEE), Frost SAR Speckle Filter (FFROST), Gamma SAR Speckle Filter (FGAMMA), Kuan SAR Speckle Filter (FKUAN), Laplacian SAR Speckle Filter (FLAP), Lee SAR Speckle Filter (FLE), SAR Speckle Filter (FSPEC), et Standard Deviation SAR Speckle Filter (FSTDDEV).

2.2 Élaboration de la courbe de tarage satellitaire

L'élaboration de la courbe de tarage locale (Figure 4) implique plusieurs étapes. D'abord, l'analyse de la probabilité d'appartenance à l'eau (orthoimages RADARSAT sélectionnées préalablement), suivi par le calcul de la largeur effective (We) à chaque section du cours d'eau analysées. Ensuite, la largeur effective calculée est comparée au débit instantané de la station (et la date) correspondante afin d'établir la base de données $We f(L)$, qui permettra la détermination de la distance optimale et de la courbe de tarage locale. Les procédures d'extraction des pixels d'eau et le calcul de la largeur effective sont automatisées (Figure 5).

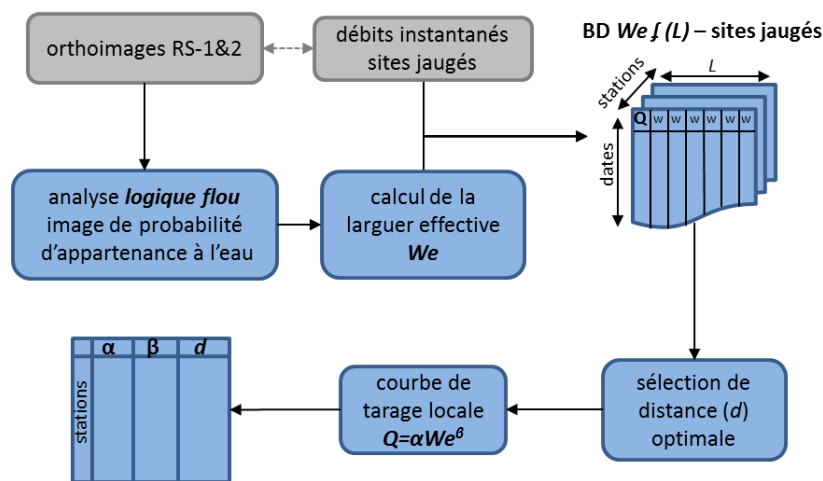


Figure 4 : Diagramme de la méthode de calcul de la courbe de tarage locale.

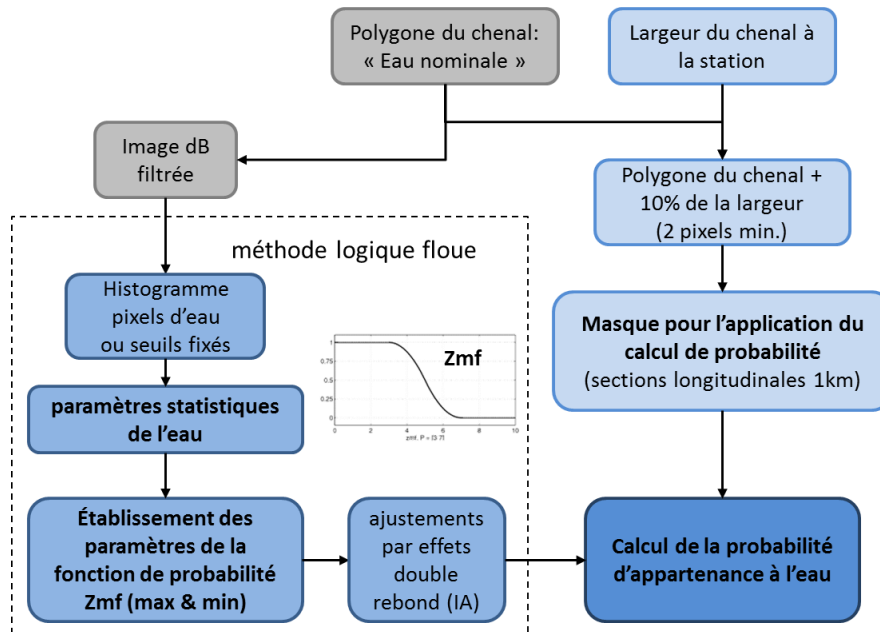


Figure 5 : Diagramme de la méthode de calcul de la probabilité d'appartenance à l'eau et la méthode de la logique floue automatisée.

Ci-dessous, une description détaillée de la méthodologie utilisée par étape :

- Étape 1 : Obtention du masque pour le calcul des paramètres statistiques de l'eau

La première étape consiste en délimiter le polygone (masque) qui a servi à calculer des paramètres statistiques de l'eau afin de paramétrer la fonction de probabilité d'appartenance à l'eau. Pour la délimitation de ce masque, la section transversale (largeur nominale) du cours d'eau à la hauteur de la station hydrométrique contenue dans le Réseau Hydrographique National (RHN) est utilisée sur la longueur maximale (sections longitudinales totales) du cours d'eau dans l'orthoimage image Radar filtrée (Figure 6).

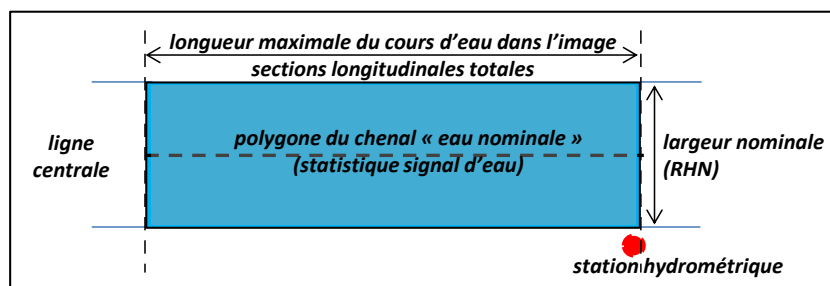


Figure 6 : Masque pour le calcul des paramètres statistiques de l'eau.

- Étape 2 : établissement des paramètres de la fonction de probabilité « Zmf »

Pour le calcul de la probabilité on utilise la fonction d'appartenance logique floue nommée « Z-shaped » (*Zmf built-in membership function, MATLAB*), définie par :

$$y = zmf(x, [a \ b]) \quad (1)$$

$$f(x; a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2 \left(\frac{x-b}{b-a} \right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases} \quad (2)$$

où x correspond à la valeur de la rétrodiffusion HH (σ°) du pixel, a et b sont les paramètres qui fixent les extrémités de la courbe (Figure 7). La valeur du mode de l'histogramme de pixels d'eau (extrait de l'étape 1) est utilisée comme paramètres a . En ce qui concerne le paramètre b , la valeur de rétrodiffusion dans la zone de chevauchement entre les histogrammes de pixels d'eau et des pixels correspondant aux berges du cours d'eau est utilisée (dans l'exemple de la Figure 7, ces valeurs sont 3 et 7, respectivement).

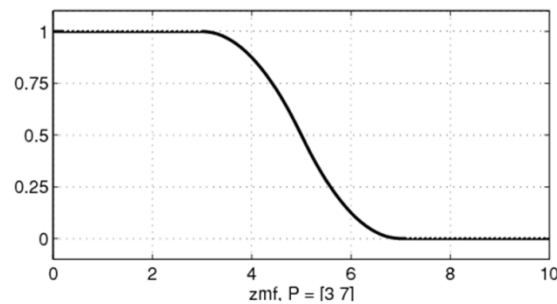


Figure 7 : Exemple d'une Fonction d'appartenance logique floue « Z » (fuzzification).

➤ Étape 3 : Obtention du masque pour l'application du calcul de probabilité

Afin de délimiter le polygone pour l'application du calcul de la probabilité (Figure 8) on utilise la section transversale du cours d'eau à la hauteur de la station hydrométrique plus 10%, à chaque berge du cours d'eau (si la largeur nominale est ≥ 8 pixels de l'orthoimage Radar, autrement la largeur de recherche est fixé à deux pixels).

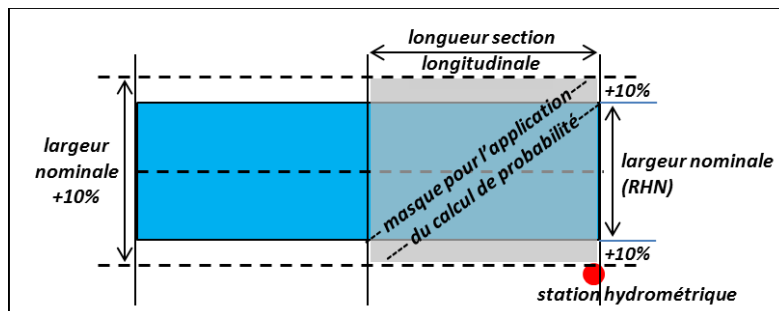


Figure 8 : Masque pour l'application du calcul de probabilité.

La longueur de la section est fixée à un kilomètre (section longitudinale). La méthodologie utilisée pour délimiter le chenal principal et le masque pour le calcul de la probabilité est schématisé dans la Figure 9.

Pour chaque station hydrométrique (Figure 9.1), l'élément du réseau hydrographique situé le plus près est détecté (Figure 9.2). En utilisant la direction d'écoulement spécifiée dans les données hydrographiques, la partie du réseau se situant en amont de la station est déterminée (Figure 9.3), où on procède au calcul de l'ordre de Shreve (Figure 9.4). Le chenal est déterminé en remontant le réseau hydrographique à partir du tronçon le plus près de la station et en poursuivant, à chaque intersection rencontrée, avec le tronçon d'ordre le plus élevé (Figure 9.5). Un polygone est créé en sélectionnant le ou les polygones du jeu de données hydrographiques représentant en totalité ou en partie le chenal principal (Figure 9.6).

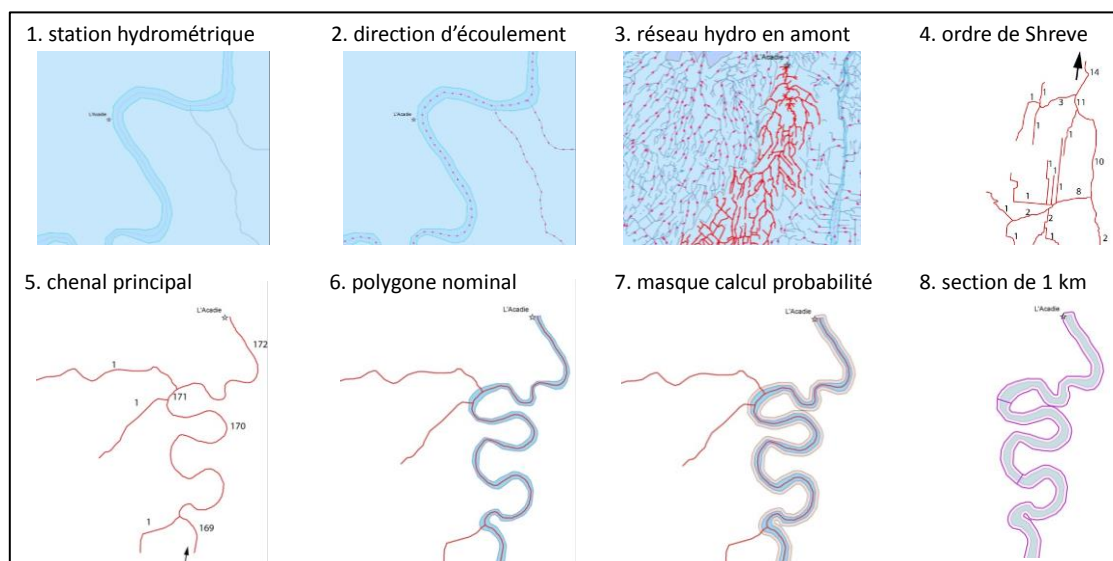


Figure 9 : Obtention du masque pour l'application du calcul de la probabilité d'appartenance.

Les parties du polygone correspondantes à des tributaires sont coupées puis supprimées. Le polygone résultant est ensuite agrandi en créant un corridor en périphérie (buffer) (Figure 9.7). La valeur à utiliser pour le corridor correspond à 10% de la largeur nominale du cours d'eau mesurée vis-à-vis la station. Si la largeur est inférieure à 160m, la valeur de 16m (2 pixels) est utilisée pour le corridor. Le polygone agrandi est finalement coupé en sections de 1km (Figure 9.8), au long de la ligne du chenal principal.

- Étape 4 : Calcul de la probabilité d'appartenance à l'eau.

La dernière étape consiste à calculer la probabilité d'appartenance à l'eau de chaque pixel dans chaque section longitudinale du cours d'eau. Cette probabilité calculée par section permettra de compléter la procédure automatisée d'extraction d'eau et le calcul de la largeur effective (We).

➤ Étape 5 : Calcul de la largeur effective.

Une fois que la probabilité d'appartenance de chaque pixel dans chaque section du cours d'eau est établie, on calcule la surface totale (S_{totale} par section) de pixels mouillés. La surface totale est la somme des pixels de probabilités d'appartenance à de l'eau $p(pixel = eau)$ multipliée par l'aire d'un pixel A d'image Radar en mode fin (64 m^2) pour une section comprenant n pixels. Ce calcul de surface se fait de façon cumulative au fur et à mesure que nous avançons dans les sections d'un kilomètre des différents cours d'eau à analyser, lesquels sont préalablement définis. Finalement, on calcule la largeur effective (We) en fonction de la surface totale (S_{total}) de pixels mouillés et de la distance d'intégration (L_{max}) cumulée en amont de la station, comme suit :

$$We = S_{totale} / L_{max}$$

$$S_{totale} = \sum_1^n p(pixel = eau) \cdot A \quad (3)$$

Les débits instantanés et les largeurs effectives ainsi calculées (We) sont compilées dans une base de données en fonction de la distance d'intégration utilisée (Figure 10). Ces données permettront d'évaluer la qualité des courbes de tarages en fonction de la distance d'intégration en amont de la station hydrométrique et d'en identifier la valeur optimale.

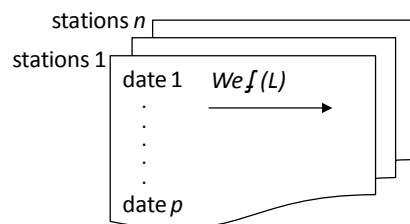


Figure 10 : Base de données de valeurs de We en fonction de la distance L_{max} (longueur par section).

Des ajustements de la méthode de la logique floue afin de prendre en compte les possibles effets du double rebond sont considérés. Les limites établis pour les extrêmes de la fonction Zmf semblent fonctionner adéquatement. Néanmoins, il est évident qu'il existe un risque de sous-estimer la surface mouillée à cause de l'effet double rebond sur la végétation au bord des berges inondées du cours d'eau. La Figure 11 illustre quelques exemples du comportement de la rétrodiffusion en fonction du niveau d'inondation et le type de couverture sur les berges.

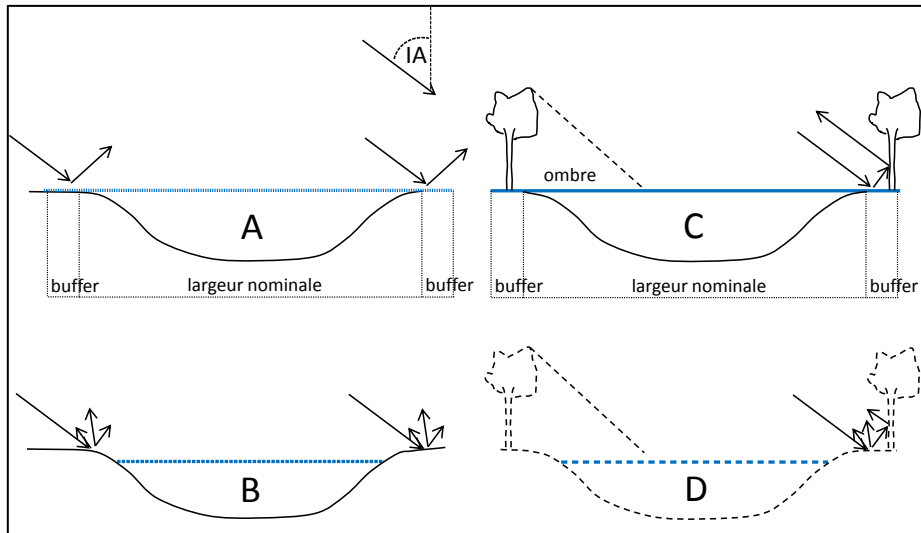


Figure 11 : Quelques exemples du comportement de la rétrodiffusion en fonction du niveau d'inondation et le type de végétation sur les berges.

L'absence de la végétation sur les berges inondées permet la détection des pixels mouillés (Figure 11 A) ou secs (Figure 11 B) sur la zone buffer d'un cours d'eau en utilisant la fonction de probabilité Zmf sur les valeurs de la rétrodiffusion. La présence de la végétation sur la zone buffer d'un cours d'eau peut produire un effet de double rebond sur les pixels inondés qui ne seront pas détectés par la fonction de probabilité à cause des valeurs plus fortes de la rétrodiffusion (Figure 11 C), spécialement pour les berges face aux signaux envoyés par le capteur radar. Ceci montre aussi l'importance d'analyser l'angle azimutal de l'orbite du satellite par rapport à l'angle azimutal des tronçons des cours d'eau (Figure 12), avant d'explorer la possibilité d'un effet double rebond.

La probabilité d'avoir un effet double rebond augmente progressivement quand l'orientation de l'orbite du satellite est parallèle à celle du tronçon du cours d'eau à analyser (Figure 12). La différence entre les angles azimutaux de l'orbite du satellite et le tronçon du cours d'eau permet identifier les pixels sur la zone buffer où ce type d'effet pourrait être présent. Ensuite, une autre fonction Smf (version croissante de la fonction Zmf), à appliquer seulement dans les pixels préalablement identifiés, devra analyser la probabilité d'appartenance à l'eau. Cette fois la probabilité d'appartenance à l'eau sera plus importante si les valeurs de rétrodiffusion sont élevées. Autre effet à prendre en compte est l'ombre portée par la végétation à l'autre extrémité de la section transversale du cours d'eau (Figure 11 C), spécialement quand le niveau d'eau est à l'étiage (valeurs de rétrodiffusion faibles = confusion potentielle avec pixels mouillés).

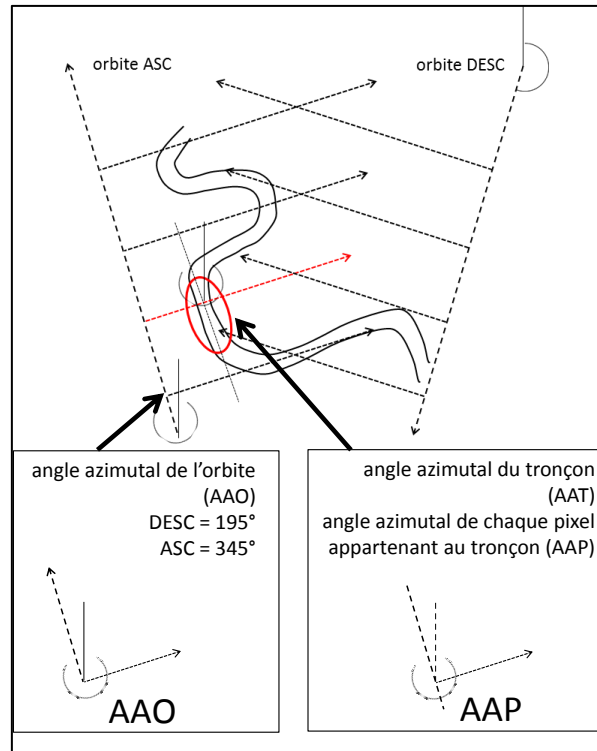


Figure 12 : Angle azimutal de l'orbite du satellite par rapport à l'angle azimutal d'un tronçon du cours d'eau.

➤ Étape 5 : Calcul de la courbe de tarage locale.

La dernière étape est l'obtention de la courbe de tarage locale, à partir des valeurs de largeur effective calculées par section d'un kilomètre et de données de débit instantané correspondant à la date et l'heure d'acquisition d'images Radar (Figure 10).

$$Q = \alpha * We^\beta \quad (4)$$

où Q est le débit instantané, α et β représentent le coefficient et l'exposant de largeur respectivement, et We est la largeur effective.

2.3 Base de données

Des données de diverses sources ont été utilisées dans le cadre de l'étape I du présent projet. Ces données ont parfois été utilisées telles quelles et parfois elles ont permis la création de jeux de données dérivées. Ces données seront copiées sur un support physique (disque dur externe) et accompagneront ce rapport.

2.3.1 Données climatologiques

Le jeu de données climatiques mensuelles à maillage régulier de 10 km pour les années 1901 à 2010 en Amérique du nord a été mis au point par le service national d'information sur les terres et les eaux (SNITE, Agriculture et Agroalimentaire Canada). Ce jeu de données contient les emplacements maillés ponctuels de température maximale moyenne (°C), de température minimale (°C) et des précipitations (mm) pour l'Amérique du nord continental. Les grilles sont disponibles en format ASCII géoréférencée (.asc). Ces modèles spatiaux ont été élaborés au moyen des algorithmes de splines de lissage «plaque mince» du progiciel ANUSPLIN, qui est en fait une approche mathématique très élaborée qui permet de produire des cartes climatiques à différentes échelles spatiales et temporelles.

2.3.2 Données hydrométriques

Les données hydrométriques pour la période 1997 à 2013 (débit instantané) correspondantes à la province du Québec ont été acquises auprès du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Quant aux stations situées dans les provinces de l'Atlantique, nous les avons obtenues via Environnement Canada. Les données ont été regroupées tout d'abord par province dans un répertoire. Ensuite, chaque répertoire de station a été identifié par le code d'identification fédéral de la station. Les fichiers textes correspondant à chaque année d'enregistrement de débits instantanés ont été stockés dans chacun de ces répertoires de stations. Les débits mesurés au moment de l'acquisition des images RS-2 ont été compilés et se retrouvent dans la table Stations_Images_Relation de la base de données.

Une table de correspondance a été créée à partir du croisement des dates et heures d'acquisition des images RS commandées (RS-1&2), avec les débits instantanés mesurés sur les rivières figurant sur ces images. Les heures GMT d'acquisition des images ont été converties en heures locales selon le fuseau horaire de chaque station.

2.3.3 Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique de la partie canadienne du projet correspond au Réseau Hydro National (RHN). Les jeux de données RHN sont produits et distribués par unité de travail RHN correspondant à une aire de drainage. Il en est de même pour les données provenant des États-Unis, où c'est le *National Hydrography Dataset* qui fut téléchargé. Au total, le Québec et les provinces de l'Atlantique touchent à environ 340 unités de travail. Ces unités se déversant parfois les unes dans les autres, un travail a dû être entrepris afin de déterminer les endroits où cela se produisait, quelles étaient les unités impliquées et quel élément du réseau d'écoulement permet de faire le lien entre ces dernières. Ce travail est nécessaire afin de pouvoir remonter le réseau hydrographique en amont des stations hydrométriques.

2.3.4 Données d'élévation

Les données d'élévation téléchargées sont les données numériques d'élévation du Canada (DNEC) à l'échelle de 1:50000. Ces données sont distribuées en feuillets du Système national de référence cartographique (SNRC). Le territoire canadien couvert par le projet correspond environ à 2600 feuillets que nous avons regroupés. À cela s'ajoute environ 50 tuiles du côté des États-Unis, lesquelles proviennent du *National Elevation Dataset*, le principal produit d'élévation de l'USGS. Le regroupement des cellules et tuiles s'est fait dans une base de données spatiales d'ESRI, laquelle contient les informations sur chacune des cellules et non les données d'élévation proprement dites. Ceci permet de produire une mosaïque à la volée et ainsi éviter de rassembler toutes les données dans un seul fichier de taille énorme et difficile à utiliser. Des fonctions, comme le calcul de la pente ou de l'orientation, peuvent être appliquées dans le processus de production de la mosaïque à la volée de sorte que ces informations n'ont pas à être produites dans des fichiers séparés. Les données d'élévation ont été utilisées pour la correction géométrique des images RS-2 et le seront pour celle des images RS-1. Elles seront également utilisées pour le calcul de différents paramètres physiographiques associés à chaque station hydrométrique.

2.3.5 Données d'utilisation du sol

La carte d'occupation des sols de l'Amérique du nord (année 2005, résolution de 250m) a été produite par le Centre canadien de télédétection (CCRS) à partir des observations acquises par le satellite MODIS/Terra (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Chacune des sept bandes spectrales a été transformée en réflectivité en haut de l'atmosphère à une résolution temporelle de 10 jours et une résolution spatiale de 250m.

2.3.6 Réseau routier

Les données relatives au réseau routier proviennent du réseau Routier National disponible sur Geobase.ca. Ce jeu de données est distribué par provinces. Il a été utilisé pour la validation de la correction géométrique des images RS-2 et sera utilisé pour la correction géométrique des images RS-1.

2.3.7 Images RADARSAT

Au cours de l'étape I, uniquement des images RS-2 ont été reçues et traitées. Tout d'abord, ces images ont été commandées en deux temps pour un total final de 323 images. Ces images se retrouvent dans le dossier Brute. Les images brutes ont ensuite été orthorectifiées en lots en utilisant les données d'élévation décrites précédemment et le modèle mathématique accompagnant chaque image. Suite à ces étapes, certaines images jugées insatisfaisantes (<10%) après une évaluation visuelle ont été orthorectifiées de nouveau en utilisant des points de contrôle. L'ensemble des images se retrouve dans le dossier Ortho. Finalement, suite à un raffinement des critères de sélection des stations hydrométriques, quelques stations ont été laissées de côté après que les images RS-2 aient été commandées de sorte que le nombre d'images pouvant être utilisées est passé de 323 à 142. Ces images ont été traitées par le passage d'un filtre anti-chatoiement et se retrouvent dans le dossier Filtrees.

2.3.8 Données dérivées

2.3.8.1 Bassins versants

Le bassin versant a été délimité de façon automatique en s'appuyant sur l'orientation de l'écoulement déterminé par le modèle numérique de terrain et en le contraignant avec le réseau hydrographique en amont de la station hydrométrique. Par la suite, chaque bassin versant a été vérifié et corrigé de façon manuelle si nécessaire. Les erreurs corrigées étaient causées principalement par deux facteurs : l'imprécision du modèle numérique de terrain et l'inexactitude du réseau hydrographique. Dans le premier cas, le modèle numérique de terrain ayant une résolution verticale de 1m, et une précision variable pouvant être aussi peu que 10m, les zones de faible pente peuvent être mal représentées dans la matrice d'écoulement. Cette situation cause généralement une sous-estimation de la taille du bassin versant. Dans le deuxième cas, l'inexactitude du réseau hydrographique a principalement causée une surestimation de la taille des bassins versants en considérant dans le bassin des zones s'écoulant vers des tronçons de rivière n'appartenant pas réellement au bassin.

Au final, une proportion plus ou moins grande des limites de chaque bassin provient de la délimitation automatique. Comme le processus automatique repose sur le modèle numérique de terrain qui est au format matriciel, la limite originale du bassin suit le contour des pixels et a une apparence en escalier. Cette structure peut augmenter considérablement la longueur du périmètre si elle n'est pas prise en considération (l'augmentation peut atteindre plus de 40%). Pour éviter ce problème et uniformiser la situation des bassins versants ayant été délimités entièrement automatiquement et celles des bassins délimités de façon plus manuelle, un lissage du contour a été effectué, éliminant ainsi l'effet d'escalier et donnant une apparence plus réelle à la limite.

Les bassins versants associés à chaque station hydrométrique (Figure 13) se retrouvent dans des classes d'entités différentes nommées selon le code de la station mais sont regroupées dans un même jeu de classe d'entité nommé *BV*.

2.3.8.2 Cour d'eau principal

Tel que mentionné à la section 2.2, le chenal principal en amont de chaque station a été déterminé en suivant les tronçons d'ordres les plus élevés. Ce chenal principal est représenté par une polyligne partant de la station et s'étendant jusqu'à l'amont du bassin versant. Le chenal principal de chaque station est enregistré dans une classe d'entité différente nommée en utilisant le code de la station hydrométrique. Tous les chenaux principaux se retrouvent dans le jeu de classe d'entité *Main*.

2.3.8.3 Azimut du cours d'eau principal

L'angle que fait le cours d'eau principal par rapport l'angle d'acquisition du capteur ayant une influence sur la rétrodiffusion et étant variable le long du cours d'eau principal, il a été calculé localement. Pour ce faire, le cours d'eau principal sous forme polyligne (entité composée de plusieurs points reliés) a été séparé en plusieurs lignes (entité formée de deux points) et l'azimut de chaque ligne a été calculé puis comparé à l'azimut d'acquisition du capteur. Pour

chaque station hydrométrique, les angles locaux calculés sont conservés dans une classe d'entités. Les angles pour toutes les stations sont regroupés dans un jeu de classe d'entité nommé *main_azimut*.

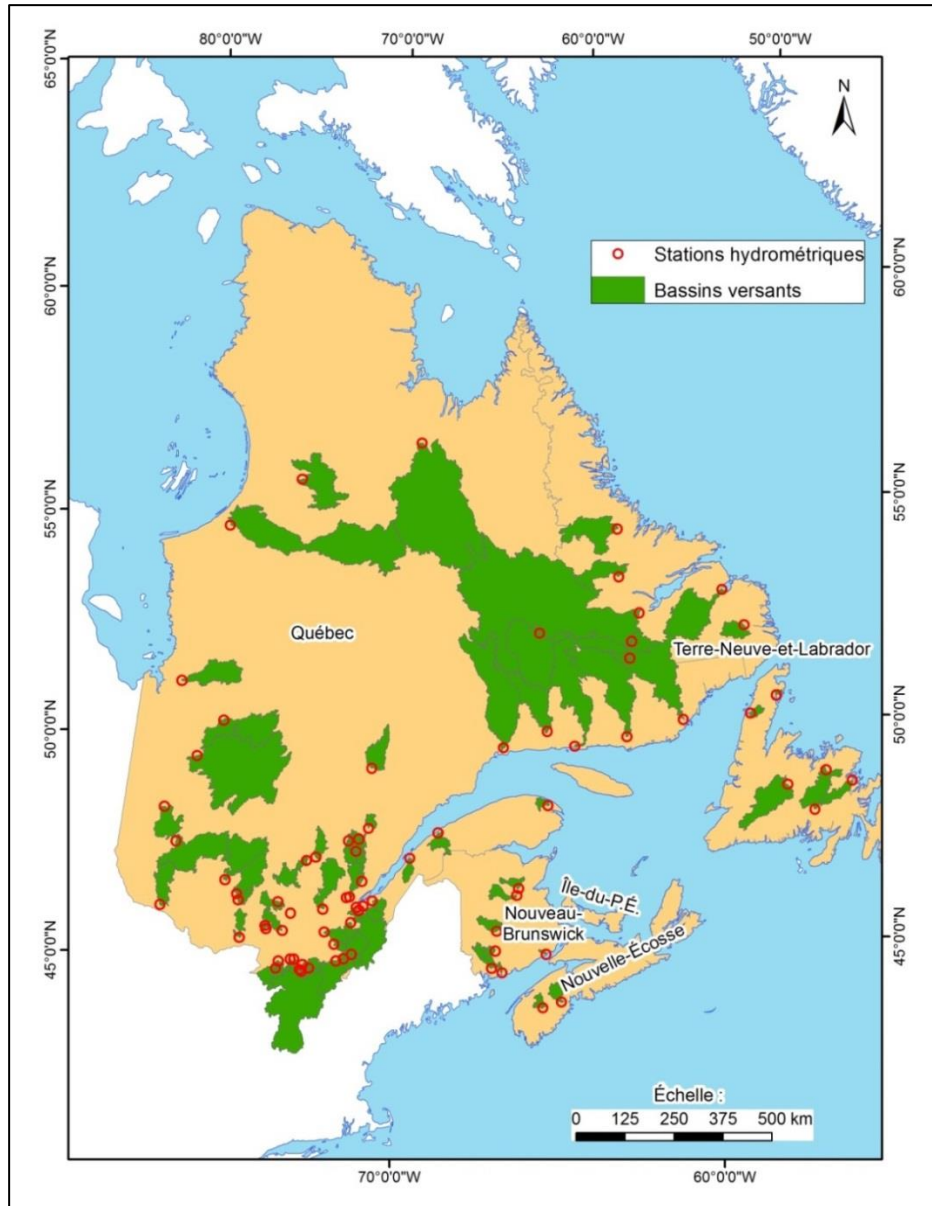


Figure 13 : Distribution et surface des 77 bassins versants des sites jaugés retenus.

2.3.8.4 Sections

En utilisant conjointement le cours d'eau principal sous forme polyligne et la représentation polygonale du cours d'eau en amont de chaque station, il a été possible de séparer le polygone en tronçons d'une longueur constante de 1km. Le nombre de sections est variable d'une station hydrométrique à l'autre et dépend de la taille de la rivière. Certaines stations ont jusqu'à un maximum d'environ 50 sections. Les sections relatives à deux stations différentes se

retrouvent dans deux classes d'entités différentes mais sont regroupées dans le même jeu de classes d'entités *Sections*.

2.3.9 BD finale

2.3.9.1 Paramètres climatologiques, physiographiques et cartographiques

Afin de caractériser l'environnement de chaque station hydrométrique retenue dans le projet, plusieurs paramètres et indices climatologiques, physiographiques et cartographiques ont été calculés (Tableau 2). Ces paramètres ont été obtenus à partir du traitement des différents jeux de données décrit précédemment. Les couches de référence utilisées sont les bassins versants et les chenaux principaux. Une description plus étendue de chaque paramètre se retrouve à l'annexe 5.1.

2.3.9.2 Occupation du sol (LCLU_pct)

Le pourcentage de chaque classe d'occupation du sol (Tableau 3) pour le territoire couvert par le bassin versant de chaque station a été calculé.

2.3.9.3 Stations hydrométriques

Ce jeu de données regroupe la position de chaque station hydrométrique utilisée de même que quelques informations pertinentes permettant de les décrire. Est également présent, le nombre d'images (RS-1 et RS-2) associées à la station ainsi que la largeur nominale du cours d'eau mesurée vis-à-vis la station.

2.3.9.4 Images RS-2

Lors de la préparation de la commande d'images RS-2, le planificateur de fauché permet de générer un fichier de géométrie contenant l'empreinte au sol des images de même qu'une multitude d'attributs décrivant chacune des images. Les fichiers de géométrie correspondant aux images commandées ont été fusionnés afin de représenter dans une même table, toute l'information pertinente sur les images.

2.3.9.5 Stations par images RS-2 (Stations_Images_Relation)

Une table de relation a été créée afin de faire le lien entre les images RS-1&2 commandées et les stations hydrométriques. Dans cette table, les images sont liées à chaque station qu'elle contienne. Il s'agit d'une relation « plusieurs à plusieurs », i.e. une image peut contenir plusieurs stations et une station peut se retrouver sur plusieurs images. La relation entre une station et une image est accompagnée des valeurs de débits instantanés et de débit quotidien pour la station en question au moment de l'acquisition de l'image.

2.3.9.6 Paramètres des courbes de tarage satellitaire

La base de données des courbes de tarage satellitaire sera établie en sélectionnant le meilleur ajustement dans le rapport largeur effective (We) et débit instantané (Q) en fonction de la distance d'intégration, dans chaque site jaugé. D'après l'équation (4), les paramètres dans cette base de données sont le coefficient et l'exposant de la largeur effective (α & β , respectivement), ainsi que la distance d'intégration (d), pour chaque site jaugé RS-2.

Tableau 2 : Liste de variables climatologiques, physiographiques et cartographiques produite par station hydrométrique.

Source	#	Variable
MNT	1	Superficie du BV
	2	Périmètre
	3	Longueur de l'axe longitudinal
	4	Facteur de forme
	5	Indice de compacité de Gravelius
	6	Pente moyenne du BV
	7	Altitude moyenne
	8	Latitude moyenne
	9	Coefficient de massivité
	10	Coefficient orographique
	11	Orientation principale du BV
RHN	12	Ordre de Strahler
	13	Ordre de Shreve
	14	Longueur du cours d'eau principal
	15	Sinuosité du cours d'eau principal
	16	Sinuosité du cours d'eau principal 10km en amont de la station
	17	Longueur du réseau hydrographique
	18	Pente moyenne du cours d'eau principal
	19	Pente moyenne du cours d'eau principal sur 10km
	20	Densité de drainage
	21	Distance et taille du lac le plus près à la station*
Clima	22	Précipitations moyennes annuelles
	23	Précipitations maximales moyennes mensuelles
	24	Indice de Fournier (versions 1 & 2)
	25	Quotient pluviothermique d'Emberger (versions 1 & 2)
	26	Température minimale*
	27	Température maximale*
	28	Température moyenne*
LULC	29	Pourcentage de couverture par le lacs*
	30	Pourcentage de couverture par type d'occupation

*Paramètres à revoir et/ou à calculer pendant l'étape II

Tableau 3 : Liste de classes d'occupation du sol.

Code	Classe d'occupation du sol
1	Temperate or sub-polar needle leaf forest
2	Sub-polar taiga needle leaf forest
3	Tropical or sub-tropical broadleaf evergreen forest
4	Tropical or sub-tropical broadleaf deciduous forest
5	Temperate or sub-polar broadleaf deciduous forest
6	Mixed forest
7	Tropical or sub-tropical shrubland
8	Temperate or sub-polar shrubland
9	Tropical or sub-tropical grassland
10	Temperate or sub-polar grassland
11	Sub-polar or polar shrubland-lichen-moss
12	Sub-polar or polar grassland-lichen-moss
13	Sub-polar or polar barren-lichen-moss
14	Wetland
15	Cropland
16	Barren lands
17	Urban
18	Water

3 Résultats

3.1 Sélection des stations hydrométriques et traitement d'images RS-2

La première tâche réalisée a été la sélection des stations hydrométriques à utiliser dans le projet. L'application des critères géographiques ainsi que la disponibilité de données de débit a donné comme résultat un total de 332 stations hydrométriques identifiées (Tableau 4 et Figure 14).

Tableau 4 : Décompte des stations hydrométriques identifiées initialement.

Province	Nombre de stations
Québec	172
Terre-Neuve et Labrador	82 (65 TN et 17 L)
Nouveau Brunswick	44
Nouvelle-Écosse	27
Île-du-Prince-Édouard	7
Total	332

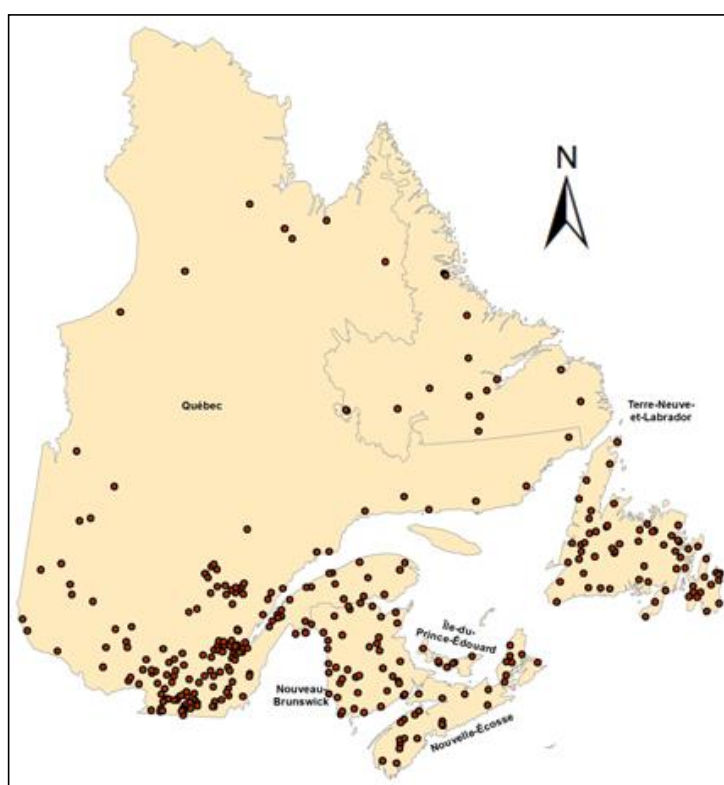


Figure 14 : Stations hydrométriques identifiées initialement.

Après l'application des critères associés aux conditions du chenal et de sélection d'images, il arrive que pour certaines stations hydrométriques le nombre d'images RS-1 demeure trop élevé. Par conséquent, un seuil maximal de 30 images par station a été fixé (pour des raisons

statistiques et aussi afin de réduire le volume de traitement d'images). Le but est de garder un ensemble d'images de configurations d'acquisition semblables et aussi adapté à l'application prévue (détection de la surface mouillée dans les berges d'un cours d'eau). Un autre critère de sélection consiste à ne retenir que les images qui couvrent la portion du cours d'eau en amont de la station (sélection manuelle sur l'écran à l'aide de Google Earth).

Un total de 1194 images seront disponibles (1041 RS-1 + 153 RS-2) sur 77 stations hydrométriques. Les images ont été sélectionnées en utilisant l'inventaire complet des données hydrométriques (débits enregistrés) et des données physiographiques pour les stations et les périodes d'acquisition d'images. Le nombre final de stations hydrométriques retenues par province figure dans le Tableau 5, ainsi le nombre d'images par station dans le Tableau 6. La Figure 15 montre leur distribution spatiale en fonction du nombre et du type d'images correspondants.

Tableau 5 : Décompte des stations hydrométriques retenues par province.

Province	Nombre de stations
Québec	54
Terre-Neuve et Labrador	14 (6 TN et 8 L)
Nouveau Brunswick	7
Nouvelle-Écosse	2
Île-du-Prince-Édouard	0
Totale	77

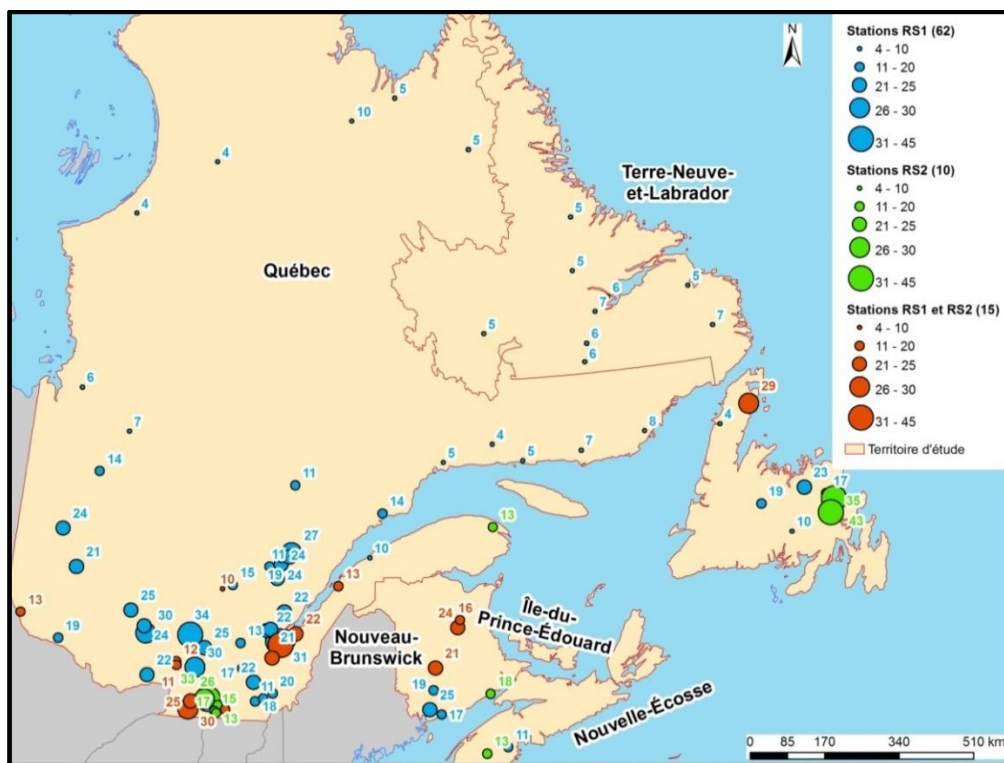


Figure 15 : Distribution spatiale des stations hydrométriques retenues.

Tableau 6 : Liste de stations hydrométriques retenues, et nombre total d'images RS-1&2 par station (signalé en gris les stations RS-2 analysées à la première étape).

	ID_ENV_CAN	Province	RS-1	RS-2		ID_ENV_CAN	Province	RS-1	RS-2
1	01AL002	NB	20	1	31	02PD004	Qc	18	0
2	01AM001	NB	19	0	32	02PG001	Qc	8	5
3	01AQ001	NB	17	0	33	02PH010	Qc	16	2
4	01AQ002	NB	25	0	34	02PH011	Qc	26	0
5	01BP001	NB	22	2	35	02PJ005	Qc	30	1
6	01BQ001	NB	15	1	36	02PJ007	Qc	25	0
7	01BV006	NB	0	17	37	02PL005	Qc	19	1
1	01ED005	NE	0	16	38	02RB004	Qc	11	0
2	01EF001	NE	11	0	39	02RH027	Qc	24	0
1	01BH005	Qc	0	14	40	02RH035	Qc	11	0
2	02AQ002	Qc	10	0	41	02RH045	Qc	27	0
3	02JB009	Qc	21	0	42	02RH066	Qc	23	0
4	02KJ004	Qc	19	0	43	02UC002	Qc	5	0
5	02LC021	Qc	9	2	44	02VB004	Qc	4	0
6	02LD005	Qc	22	0	45	02VC001	Qc	5	0
7	02LE024	Qc	23	0	46	02WB003	Qc	7	0
8	02LE025	Qc	30	0	47	02XA008	Qc	8	0
9	02LG005	Qc	25	0	48	03AB002	Qc	14	0
10	02ND003	Qc	9	1	49	03BD002	Qc	4	0
11	02NE011	Qc	11	0	50	03BF001	Qc	6	0
12	02NF003	Qc	34	0	51	03ED001	Qc	4	0
13	02OA054	Qc	19	11	52	03FA003	Qc	4	0
14	02OA057	Qc	25	5	53	03LF002	Qc	2	0
15	02OB017	Qc	30	1	54	04NA001	Qc	24	0
16	02OC021	Qc	25	0	55	02XA003	TN	6	0
17	02OD001	Qc	22	0	1	02YC001	TN	4	0
18	02OD003	Qc	17	0	2	02YD002	TN	22	0
19	02OE005	Qc	13	0	3	02YO011	TN	17	0
20	02OE027	Qc	11	0	4	02YQ001	TN	21	0
21	02OE032	Qc	20	0	5	02YS005	TN	0	40
22	02OG002	Qc	0	17	6	02ZE004	TN	10	0
23	02OG014	Qc	17	6	7	03NF001	TN	5	0
24	02OH008	Qc	0	14	8	03OC003	TN	5	0
25	02OH013	Qc	0	13	9	03OE001	TN	7	0
26	02OJ007	Qc	0	26	10	03OE003	TN	6	0
27	02OJ026	Qc	0	18	11	03PB002	TN	5	0
28	02PA007	Qc	13	0	12	03QC001	TN	5	0
29	02PC002	Qc	21	0	13	03QC002	TN	5	0
30	02PC010	Qc	22	0	77				

Malgré le nombre élevé d'images RS-2, seulement 10 stations hydrométriques ont suffisamment d'images RS-2 pour obtenir des résultats statistiquement significatifs (≈10 images par station, signalé en gris dans le Tableau 6). Les mesures de débits instantanés associés aux dates et heures d'acquisitions d'images RS-1&2 sont majoritairement disponibles pour les 77 stations hydrométriques retenues (la mesure quotidienne est disponible quand le

débit instantané n'est pas disponible). Toutes les stations ont des enregistrements du débit quotidien associés aux dates d'acquisitions d'images.

En ce qui concerne l'orthorectification d'images RS-2, la Figure 16 montre un exemple d'évaluation de qualité en utilisant les paramètres orbitaux et un modèle numérique de terrain (Geomatica Ortho Engine). Les résultats de la vérification et les commentaires associés aux images sont comptabilisés par stations hydrométriques. Le pourcentage d'efficacité de la correction automatique est de 92,52% (rapport bien orthorectifiées et à vérifier / nombre total d'images utilisables).

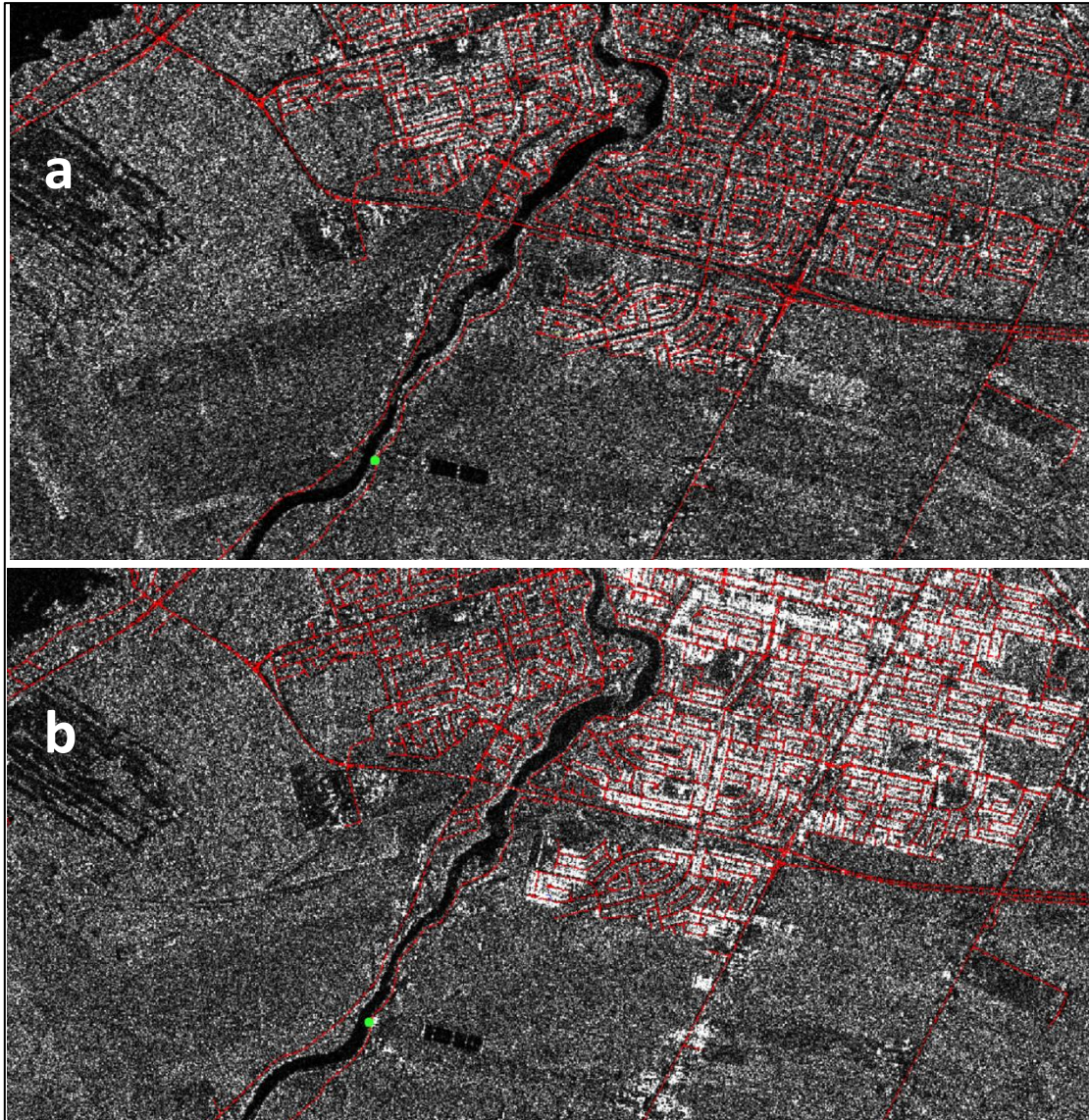


Figure 16 : Exemple de validation des orthoimages RS-2 (station Chateauguay, échelle approximative 1/35 000) : a) à corriger (DK_371116), b) bien orthorectifiée (DK_371266).

Le filtre de chatoiement de Lee est retenu, il donne en effet un meilleur rapport de réduction du chatoiement et d'augmentation du contraste. Un exemple de l'application des filtres sur une orthoimage RS-2 de la rivière Richelieu (Figure 17) : « Lee SAR Speckle » (FLE) et « Enhanced Frost SAR Speckle » (FEFROST).

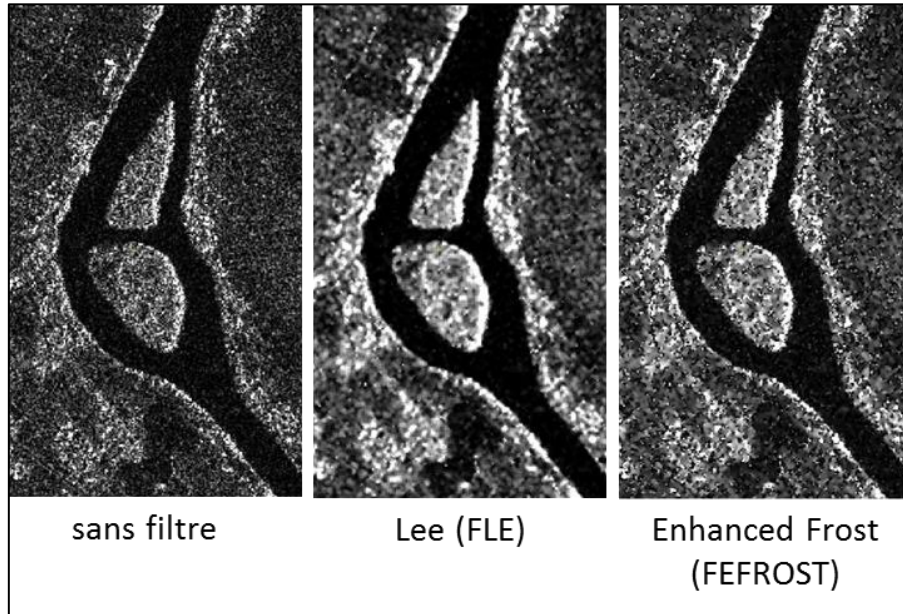


Figure 17 : Exemple d'application des filtres de Lee et Enhanced Frost, par rapport à une orthoimage sur la rivière Richelieu non filtrée.

3.2 Élaboration de la courbe de tarage

La première étape dans l'élaboration des courbes de tarage est le calcul des paramètres statistiques de l'eau, afin de paramétrer la fonction d'appartenance. Un script est développé (en interface avec ArcGIS) permettant l'analyse statistique à partir des histogrammes de fréquence de la rétrodiffusion des pixels à l'intérieur des polygones pour le calcul de l'appartenance (le cours d'eau et les berges). Ce script permet aussi l'application d'une procédure d'intercalibration ou de standardisation de toutes les orthoimages Radar disponibles (simultanément) pour une station hydrométrique donnée (Figure 18), en fixant une valeur de rétrodiffusion de référence et le percentile. Cette procédure s'est avérée très importante étant donné l'amélioration significative des rapports entre les valeurs de la largeur effective et le débit instantané. Les produits sortant du script sont des histogrammes de rétrodiffusion avant et après l'intercalibration, et des images intercalibrées et exprimées en db (seulement sur la zone de l'image délimitée par le polygone pour le calcul de l'appartenance).

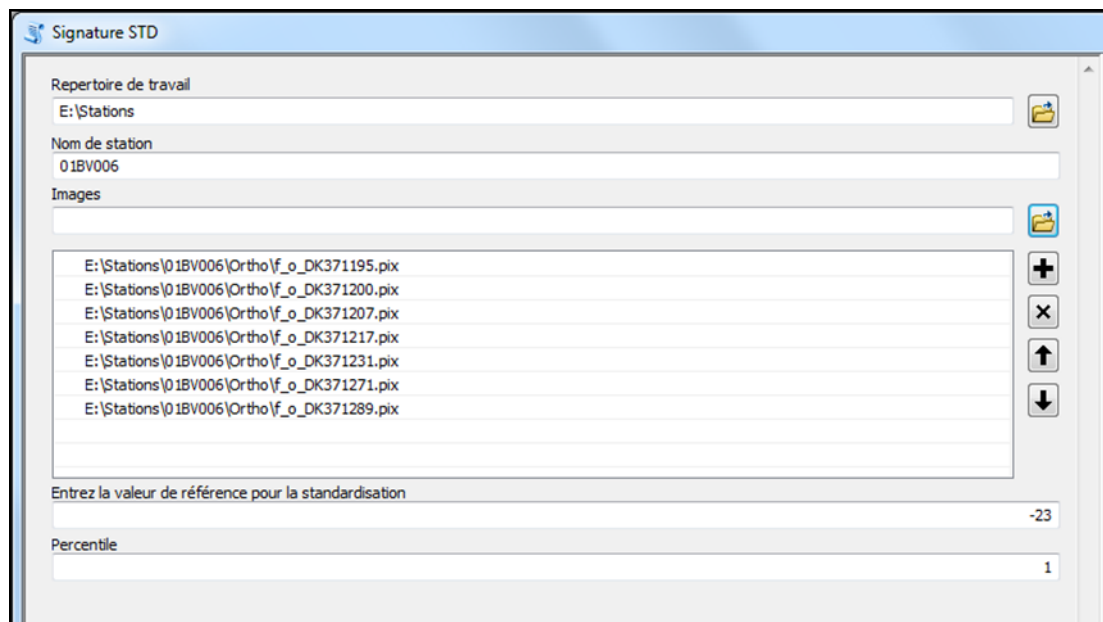


Figure 18 : Fenêtre de l'interface pour l'intercalibration des orthoimages.

Les procédures d'extraction d'eau (méthode de la logique floue) ainsi que le calcul de la largeur effective ont été automatisées en utilisant un script « python » (en interface avec ArcGIS aussi), incluant des fonctions pour l'analyse de l'appartenance de pixels à la classe « eau », la probabilité d'avoir un effet double rebond, et la détection des pixels affectés par l'effet double rebond. Le code a été adapté pour le calcul de la largeur effective (Figure 19). Dans la fenêtre de l'interface ArcGIS du script il est possible de paramétrer la valeur de référence pour l'intercalibration, le percentile, les seuils a et b pour la fonction d'appartenance à l'eau Z_{mf} , et les seuils a et b pour la fonction double rebond S_{mf} . L'application de la fonction double rebond est optionnelle, ainsi que la possibilité de sauvegarder les images de probabilité d'appartenance à l'eau. L'application du script produit un fichier *excel* contenant la base de données $We f L_{max}$ (Figure 10) par station analysée.

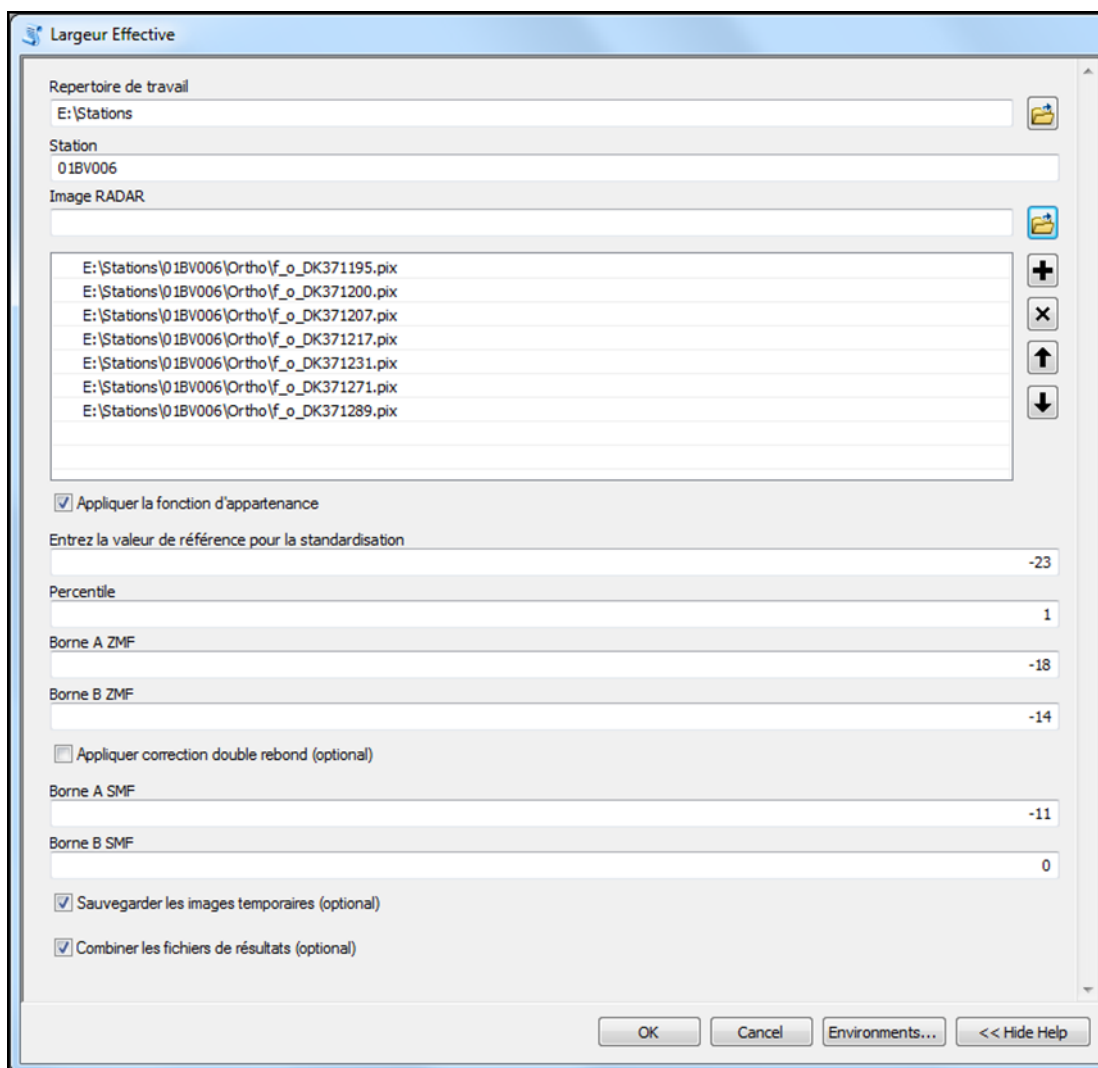


Figure 19 : Fenêtre de l'interface pour le calcul de la largeur effective.

L'élaboration automatisée de la courbe de tarage est appliquée pour les stations hydrométriques couvertes par des orthoimages RS-2, en commençant avec la préparation d'un sous-dossier pour chaque station retenue, contenant les orthoimages RS-2 (sous-dossier *Ortho*) ainsi que le fichier shapefile du masque pour l'application du calcul de la probabilité (sous-dossier *Shp*) ().

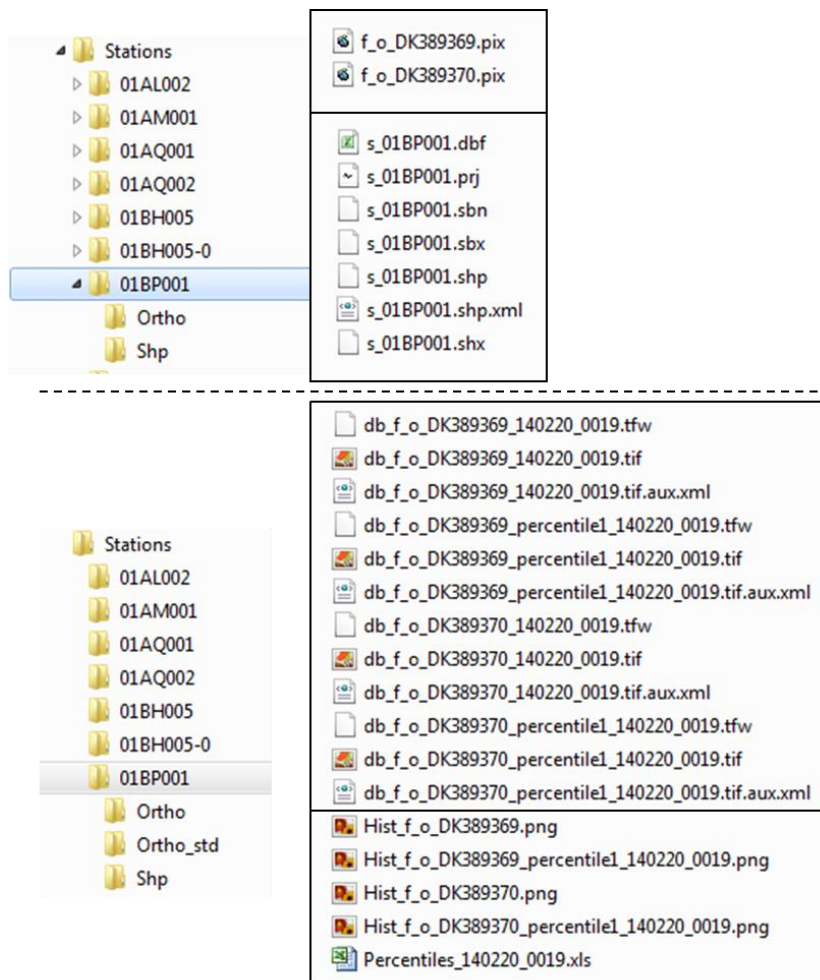


Figure 20 : Sous-dossiers initiaux & après l'utilisation du script d'intercalibration.

Après l'utilisation du script d'intercalibration, un nouveau sous-dossier est créé (Ortho_std) contenant les histogrammes de fréquence de la rétrodiffusion avant et après la translation de l'histogramme (ou intercalibration, Figure 21). En plus des histogrammes des signatures, le script enregistre les images de rétrodiffusion (en db) avant et après la translation de l'histogramme (Figure 22). Ces produits intermédiaires permettent l'analyse des valeurs de la rétrodiffusion (en db) par rapport à l'appartenance des pixels à l'eau, et le seuillage de la fonction d'appartenance Zmf. Également, ces images intercalibrées sont utiles pour le seuillage de la fonction d'appartenance Smf (effet double rebond sur les berges).

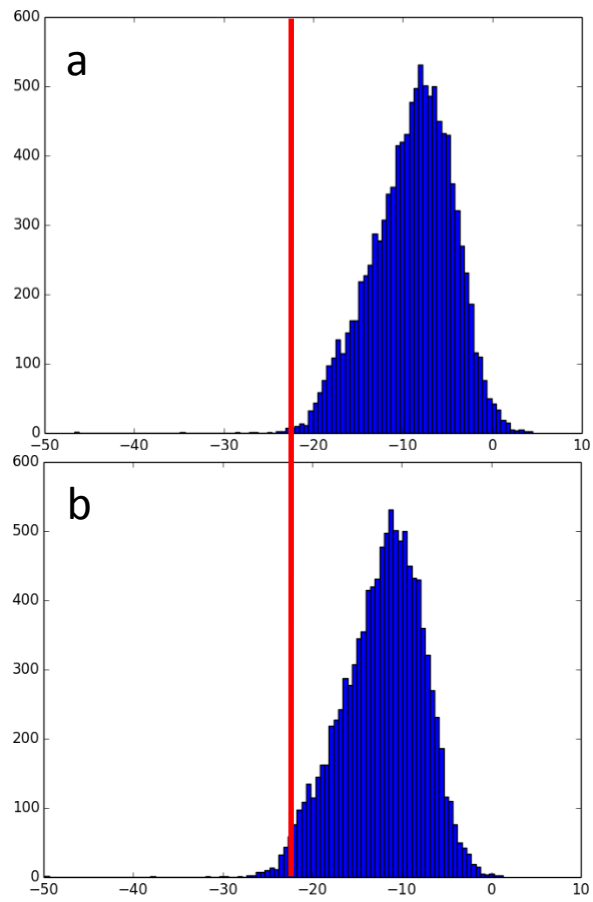


Figure 21 : Fréquence de la rétrodiffusion avant (a) et après la translation de l'histogramme (b) en utilisant le percentile 1 et la valeur -23 db comme référence.

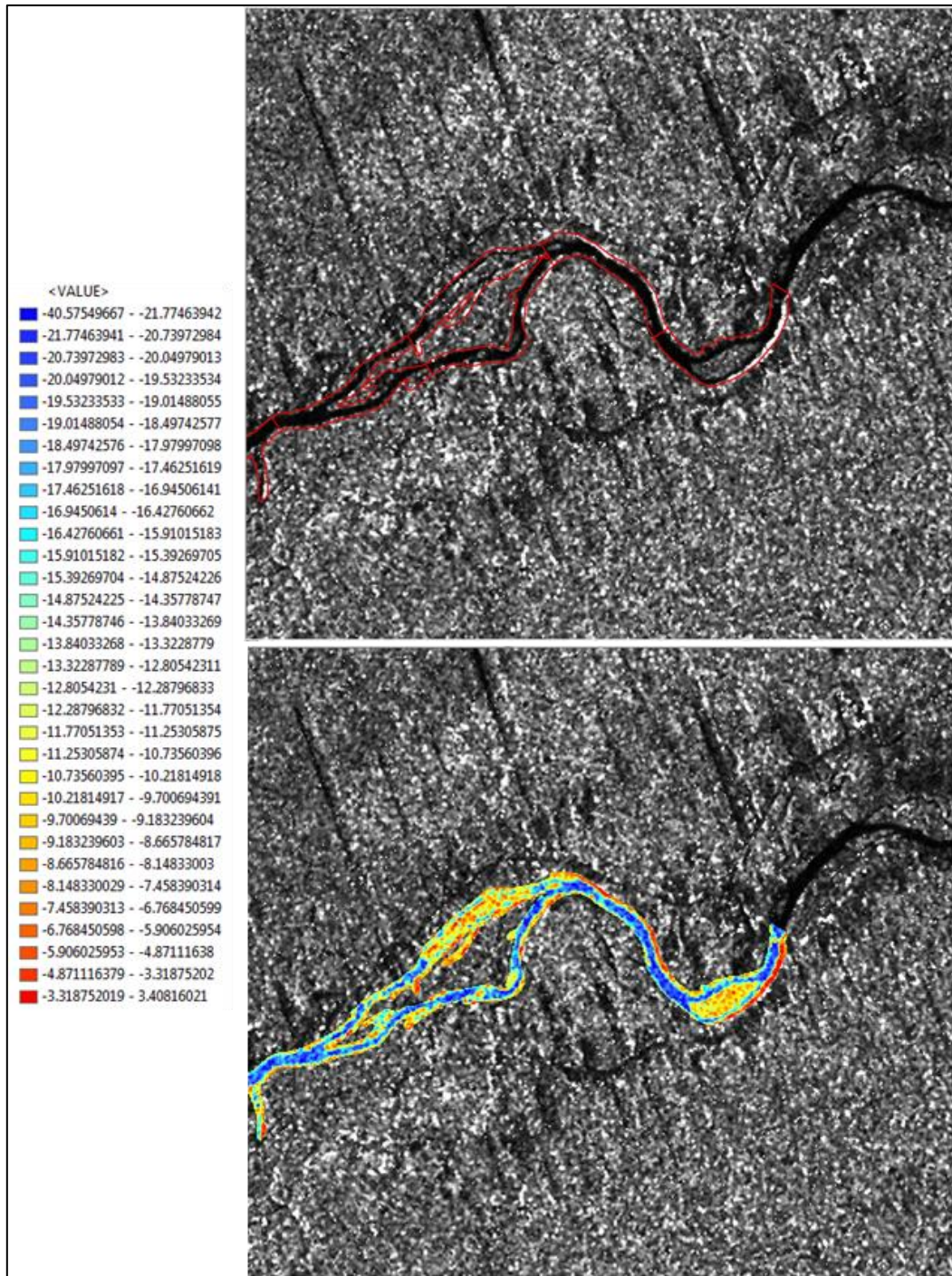


Figure 22 : Exemple de l'interprétation de la rétrodiffusion (échelle en db) sur un cours d'eau, après la translation de l'histogramme en utilisant le percentile 1 et la valeur -23 db comme référence.

Avant d'analyser les résultats, il est important d'expliquer comment les différents produits de l'interface sont stockés et traités. D'abord, une fois utilisée l'interface, un nouveau sous-dossier est créé (*Output*) contenant à la fois deux sous-dossiers : *SMF* pour les résultats de l'application du calcul du double rebond, et *ZMF* pour les résultats de l'analyse de la

probabilité d'appartenance à l'eau (Figure 23). Chaque sous-dossier contient deux sous-dossiers : un pour stocker les fichiers dbf avec les résultats du calcul de la largeur effective par image, ainsi qu'un fichier Excel (Figure 23, à gauche) intégrant la totalité des images et des sections par image analysée (sous-dossier *Dbf*); et autre pour stocker les fichiers des images avec les valeurs de probabilité d'appartenance à l'eau (sous-dossier *Image*). Chaque fichier est identifié par des suffixes contenant la fonction d'appartenance utilisée, le code identifiant de l'orthoimage analysée, le jour et la date de l'application (Figure 23, à droite). Ces suffixes permettent en même temps de récupérer le paramétrage spécifique à chaque utilisation de l'interface, stockés dans le fichier « log_traitement.txt » (Figure 23, en bas).

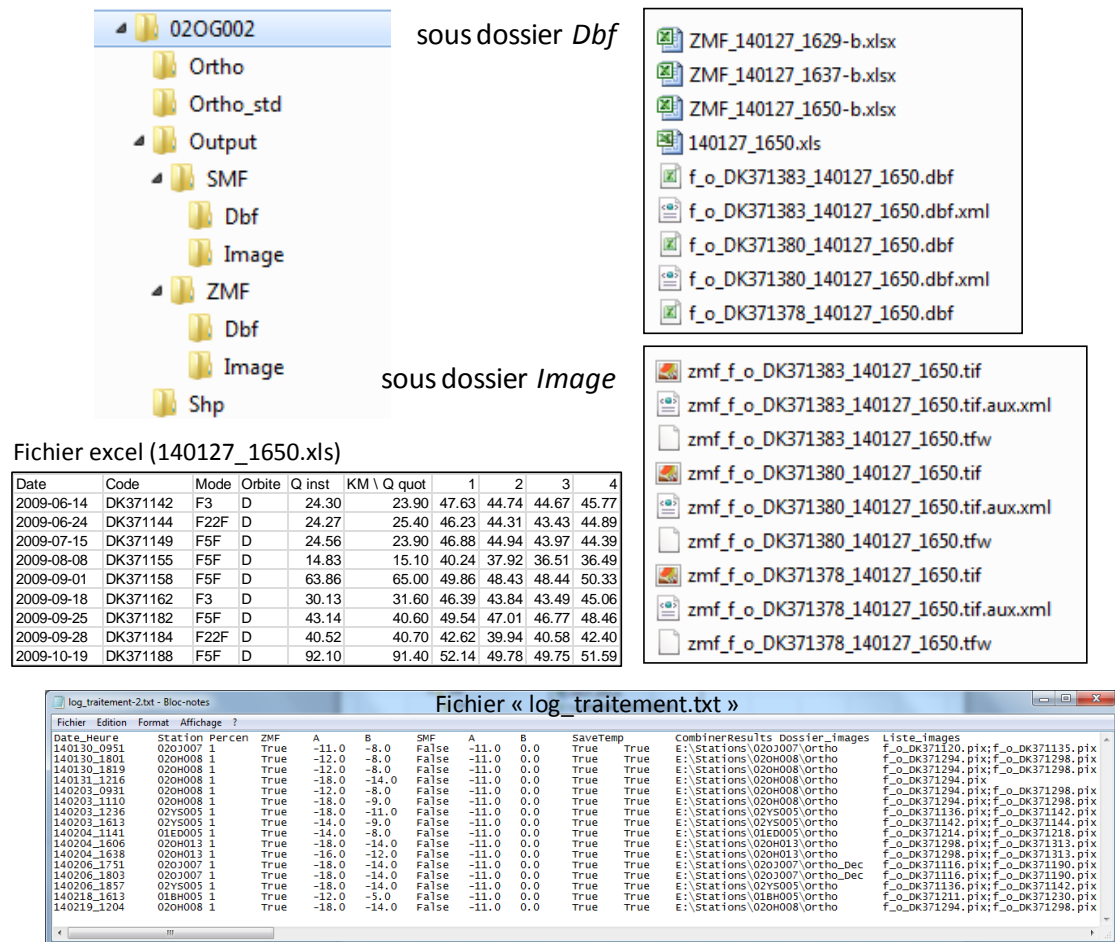


Figure 23 : Sous-dossiers résultants de l'utilisation de l'interface pour le calcul de la largeur effective.

Des exemples d'images de probabilité d'appartenance à l'eau (Figure 24) montrent l'effet des différents paramétrages des seuils de la fonction Zmf dans les valeurs de r^2 . Les seuils -18 et -11 (a et b dans la fonction Zmf, respectivement) semblent sous-estimer les probabilités d'appartenance à l'eau, par rapport aux seuils -14 et -9. Ces images de probabilités servent à confirmer la performance des seuils choisis.

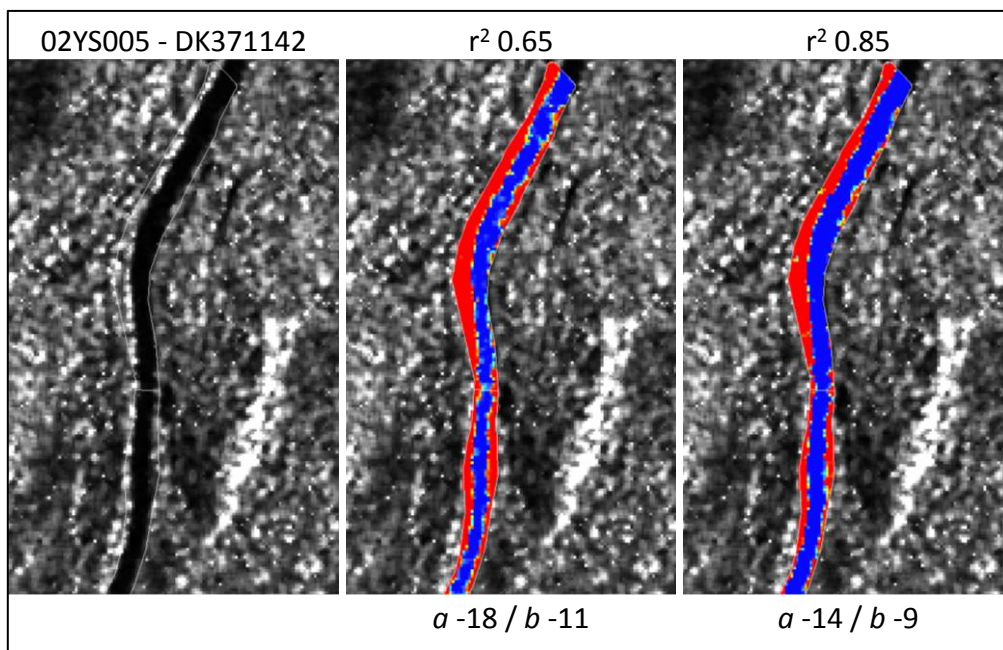


Figure 24 : Exemples d'images de probabilité d'appartenance Zmfsur la rivière Terra Nova (TN, station hydrométrique 02YS005).

Le fichier Excel contenant le résultat du calcul de la largeur effective ainsi que les débits instantanés (Figure 23) est utilisé afin de produire des courbes de tarage. L'exemple ci-dessous, illustre le contenu des courbes de tarage (Figure 25). Les graphes des courbes de tarage ont sur l'axe des X, la largeur effective obtenue en mètres et sur l'axe des Y le débit instantané exprimé en m^3s^{-1} . L'équation de la courbe de tarage ainsi que le coefficient de détermination sont inscrits sur chaque graphique. La relation entre la largeur effective et le débit est une forme puissance. Pour des fins de visualisation sur la Figure 25, le débit a été exprimé sous une échelle logarithmique, de cette façon une droite est obtenue au lieu d'une courbe puissance. Dans les annexes 5.2, les courbes de tarage satellitaires sont tracées en échelle normale.

Deux cas sont présentés à titre d'exemple, pour une même rivière jaugée soit en haut, le cas où seules les images acquises sur l'orbite descendante sont utilisées et le cas au bas où seules les images acquises en mode F5F et sur l'orbite descendante. Le premier kilomètre de la rivière a été utilisé pour les deux cas. On peut constater que le coefficient de détermination est plus élevé dans le deuxième cas.

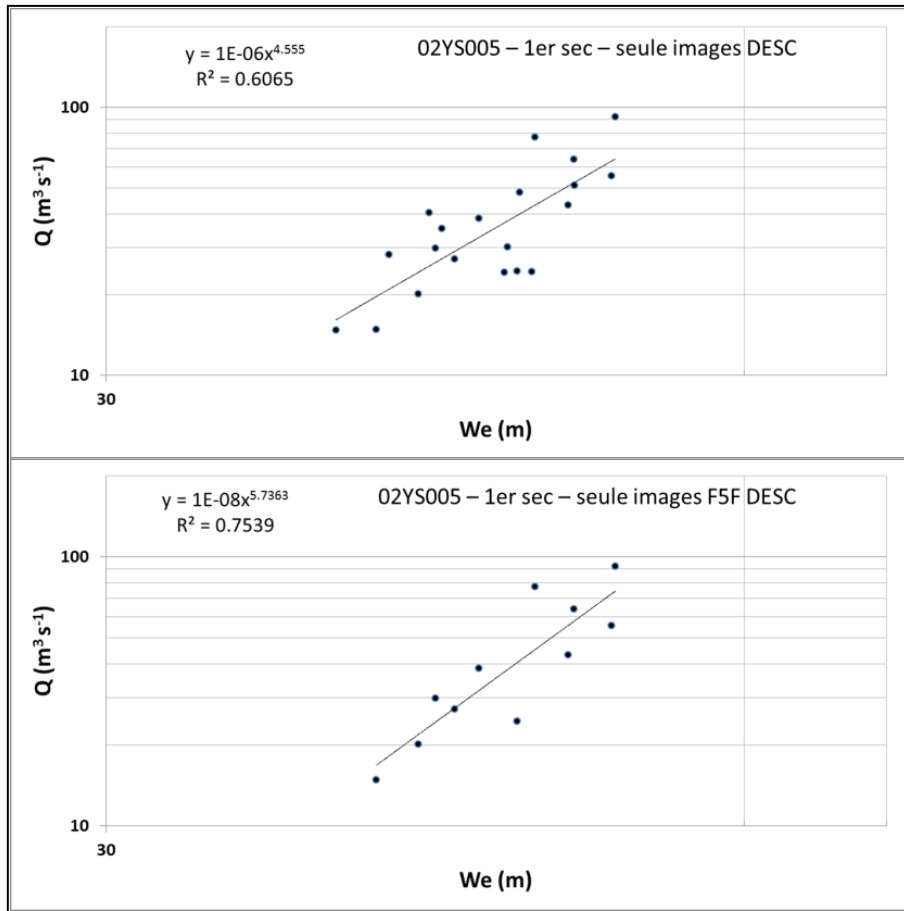


Figure 25 : Exemples de deux courbes de tarage résultant de l'utilisation de l'interface pour le calcul de la largeur effective sur la rivière Terra Nova (TN, station hydrométrique 02YS005).

Puisque le calcul de la largeur effective est réalisé à chacun des tronçons cumulés de rivière, il est important de vérifier si les résultats changent en fonction du tronçon (d). Les mêmes deux exemples précédemment utilisés pour produire les courbes de tarage (Figure 25) ont servis pour vérifier si le choix d'un tronçon affecte la qualité des courbes de tarage (Figure 26). Le coefficient de détermination a servi d'indicateur de qualité d'ajustement des courbes selon du tronçon choisi. Pour les deux cas choisis, c'est le 4^e kilomètre cumulatif qui semble avoir produit les meilleures courbes de tarage (distance d'intégration, $d = 4\text{km}$). Certains endroits sur une rivière peuvent être des témoins du changement de débit sur une rivière. Par exemple, des îles, des bancs de sable et même des milieux humides agissent comme des indicateurs du changement de débit, se traduisant par des variations de surfaces d'eau sur les images Radar.

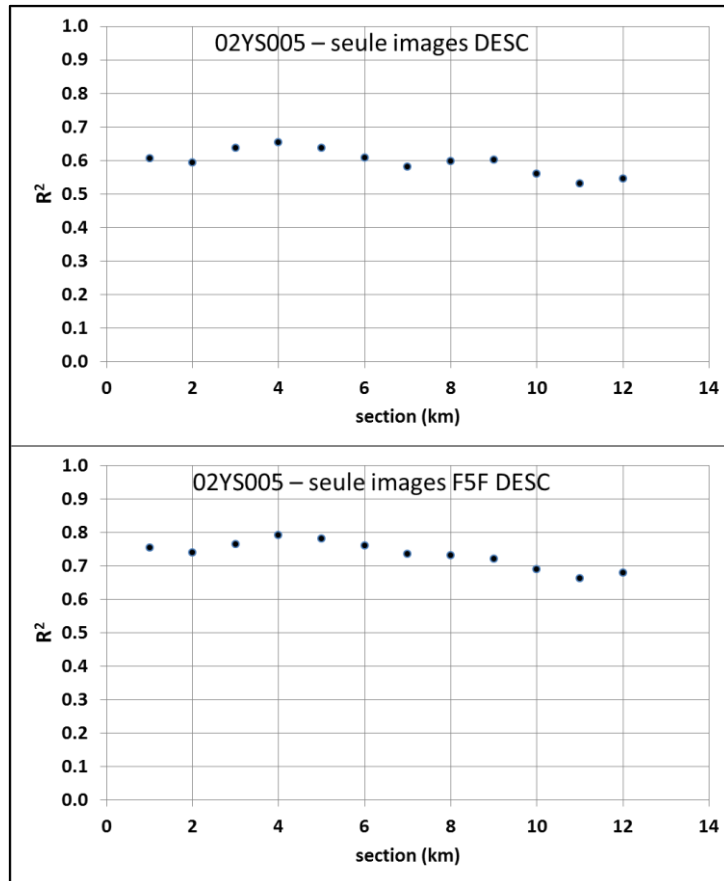


Figure 26 : Exemples d'images de probabilité d'appartenance Zmf sur la rivière Terra Nova (TN, station hydrométrique 02YS005).

Différents paramétrages des seuils pour la fonction d'appartenance Zmf sont testés en fonction de la statistique spécifique au jeu d'images comprenant chaque station hydrométriques (et de ces histogrammes de fréquence de la rétrodiffusion après l'intercalibration). Un jeu de seuils universel pour la fonction d'appartenance Zmf est testé ($a = -18$ et $b = -14$) afin d'évaluer la robustesse de la méthode, sur 10 stations hydrométriques RS-2 (les caractéristiques principales des stations sont décrites dans le Tableau 7). De façon générale, les rivières étudiées présentent une bonne variabilité en ce qui concerne leurs débits moyens ainsi que leurs largeurs effectives moyennes à la station. Malgré cette variabilité et le changement de paramètres des fonctions d'appartenance, les coefficients de détermination variaient entre 0,44 et 0,96 ayant pour médiane 0,70 en excluant les valeurs faibles (Tableau 8). Trois interprétations seraient plausibles pour expliquer les faibles valeurs obtenues. L'influence de la marée semble avoir un impact sur 3 des 4 stations hydrométriques car la marée a pour effet de faire chuter la composante vitesse du débit, ce que la méthode actuelle ne considère pas. La deuxième explication serait liée à l'étroitesse des cours d'eau, ce qui limiterait la détection de l'eau sur les images Radar. Enfin, une dernière explication serait le mélange d'images acquises sur les deux orbites (ascendante et descendante). Les meilleurs résultats ont été obtenus lorsqu'il y avait suffisamment d'images acquises avec une même configuration d'acquisition d'image (orbite & angle d'incidence).

Tableau 7 : Caractéristiques principales des stations hydrométriques analysées.

Station	Province	Rivière	largueur à la station (m)	débit moyenne ($m^3 s^{-1}$)
01BH005	Qc	Dartmouth	60	11.35
02OA054	Qc	Chateauguay	100	24.31
02OG002	Qc	Yamaska	80	46.65
02OH008	Qc	aux Brochets	90	12.88
02OH013	Qc	aux Brochets	40	4.61
02OJ007	Qc	Richelieu	500	813.53
02OJ026	Qc	Acadie	40	4.43
01BV006	NB	Point Wolfe	80	4.44
01ED005	NE	Mersey	30	10.00
02YS005	TN	Terra Nova	100	44.25

Tableau 8 : Décompte des seuils Zmf testés et les r^2 résultants (signalé en gris les stations avec faible rapport).

Station	ZMF a	ZMF b	Section	r^2	Observations
01BH005	-12	-5	1	0.01	Influence de la marée, cours d'eau étroit
	-18	-14	1	0.01	
02OA054	-18	-14	1	0.15	Influence de la marée
02OG002	-19	-15	1	0.78	seulement images Desc
	-18	-14	1	0.71	
02OH008	-12	-9	1	0.91	seulement 5 images Desc
	-12	-8	1	0.87	
	-18	-14	1	0.96	
02OH013	-16	-12	1	0.10	Images Asc et Desc, cours d'eau étroit
	-18	-14	1	0.10	
02OJ007	-18	-13	2	0.68	seulement images Desc
	-18	-14	2	0.66	
02OJ026	-10	-5	4	0.69	seulement 6 images Desc
	-18	-14	8	0.67	
01BV006	-16	-10	2	0.70	seulement images F6F-Asc
	-18	-14	1	0.44	
01ED005	-14	-8	1	0.01	Influence d'un lac, cours d'eau étroit
02YS005	-18	-11	4	0.65	seulement images Desc
	-18	-11	4	0.79	seulement images F5F-Desc
	-14	-9	1	0.66	seulement images Desc
	-14	-9	1	0.85	seulement images F5F-Desc
	-18	-14	4	0.59	seulement images Desc
	-18	-14	4	0.71	seulement images F5F-Desc

Les résultats de l'analyse des données concernant les courbes de tarage satellitaire pour les sites jaugés RS-2 sont affichés dans le Tableau 9. Sur le tableau ci-dessus se trouvent les seuils de la fonction d'appartenance Z_{mf} utilisés (a et b), les paramètres de la courbe de tarage satellitaire (α et β), ainsi que la distance d'intégration (d) résultant. À l'annexe 5.2 se retrouvent les graphiques correspondants à la distance d'intégration ainsi que les courbes de tarage satellitaires de chaque station hydrométrique analysées.

Tableau 9 : Paramètres des courbes de tarage satellitaire pour 6 sites jaugés RS-2 (équation 4), et la distance d'intégration.

Station	ZMF a	ZMF b	α	β	d (km)
02OG002	-19	-15	4E-22	13.07	1
	-18	-14	5E-34	18.87	1
02OH008	-18	-9	9E-29	16.94	1
	-12	-8	2E-42	33.38	1
	-18	-14	3E-24	16.13	1
02OJ007	-18	-13	1E-08	4.33	2
	-18	-14	3E-07	3.83	2
02OJ026	-10	-5	2E-05	3.52	4
	-18	-14	3E-04	3.23	8
01BV006	-16	-10	8E-21	13.61	2
	-18	-14	3E-12	8.54	1
02YS005	-18	-11	3E-06	4.30	4
	-14	-9	7E-17	10.14	1
	-18	-14	1E-03	2.89	4

3.3 Intégration et consolidation de la base de données

L'organisation des données qui seront remises sur le support physique (disque dur) avec ce rapport sont dans la Figure 27. La partie de la structure en verte correspond à des dossiers tandis que la partie en violet correspond à une base de données spatiales (file GeoDataBase).

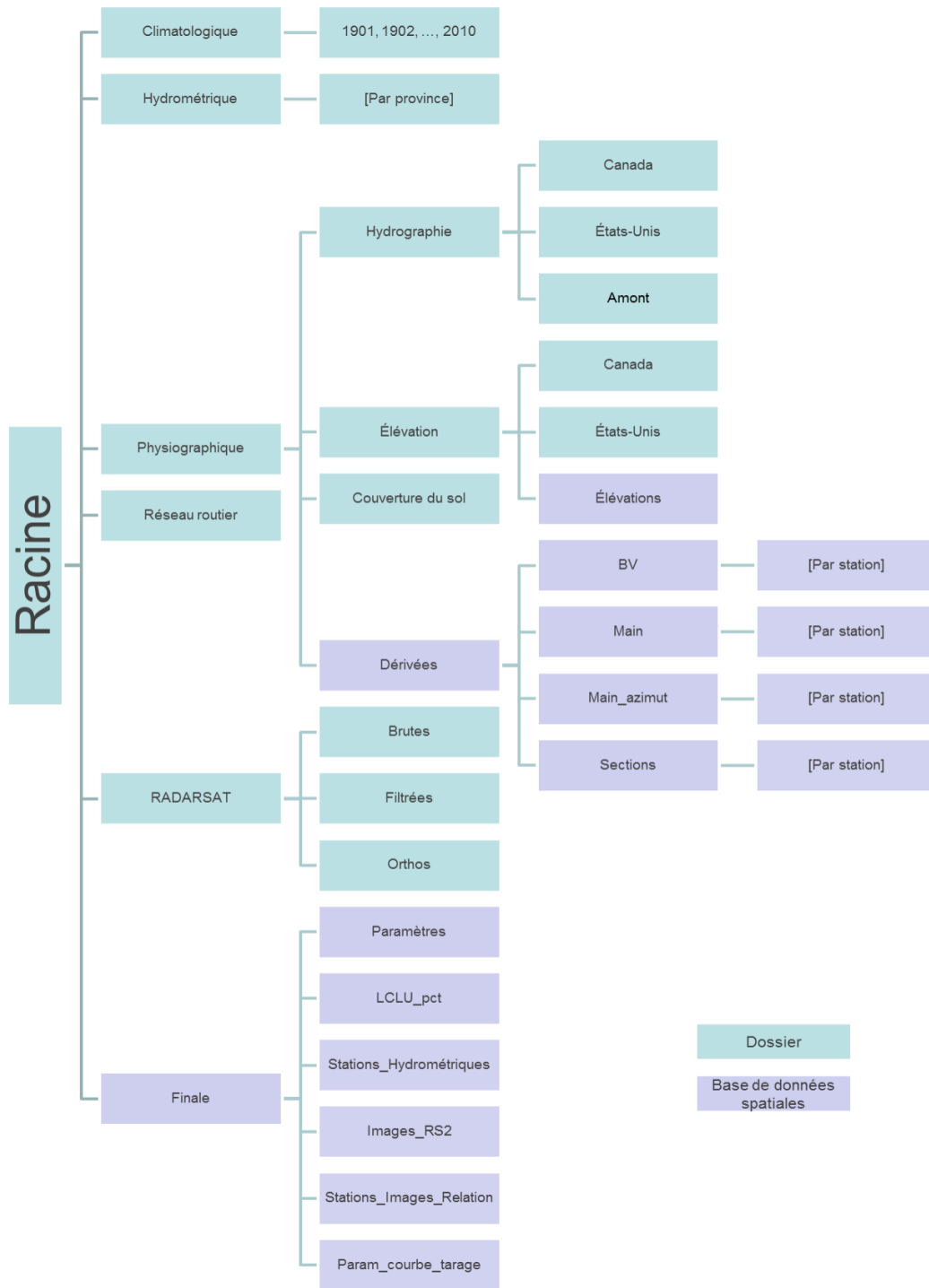


Figure 27 : Diagramme de la structure de données sur le support physique.

À l'intérieur de la base de données spatiales Finale, plusieurs tables sont reliées les unes aux autres (Figure 28). La table centrale est celle des stations hydrométriques. Tel que mentionné précédemment, elle est reliée à la table Images_RS2 dans une relation « plusieurs à plusieurs », i.e. qu'une station hydrométrique peut être incluse dans une ou plusieurs images RS-2 alors qu'une image RS-2 peut inclure une ou plusieurs stations. Cette relation nécessite la création d'une nouvelle table mettant en correspondance l'identifiant des stations et celui des images RS-2. La relation entre une image et une station étant valide pour un moment précis dans le temps, soit la date et l'heure d'acquisition de l'image, les débits instantanés et quotidiens mesurés à la station à l'heure et au jour en question ont été ajoutés à la table.

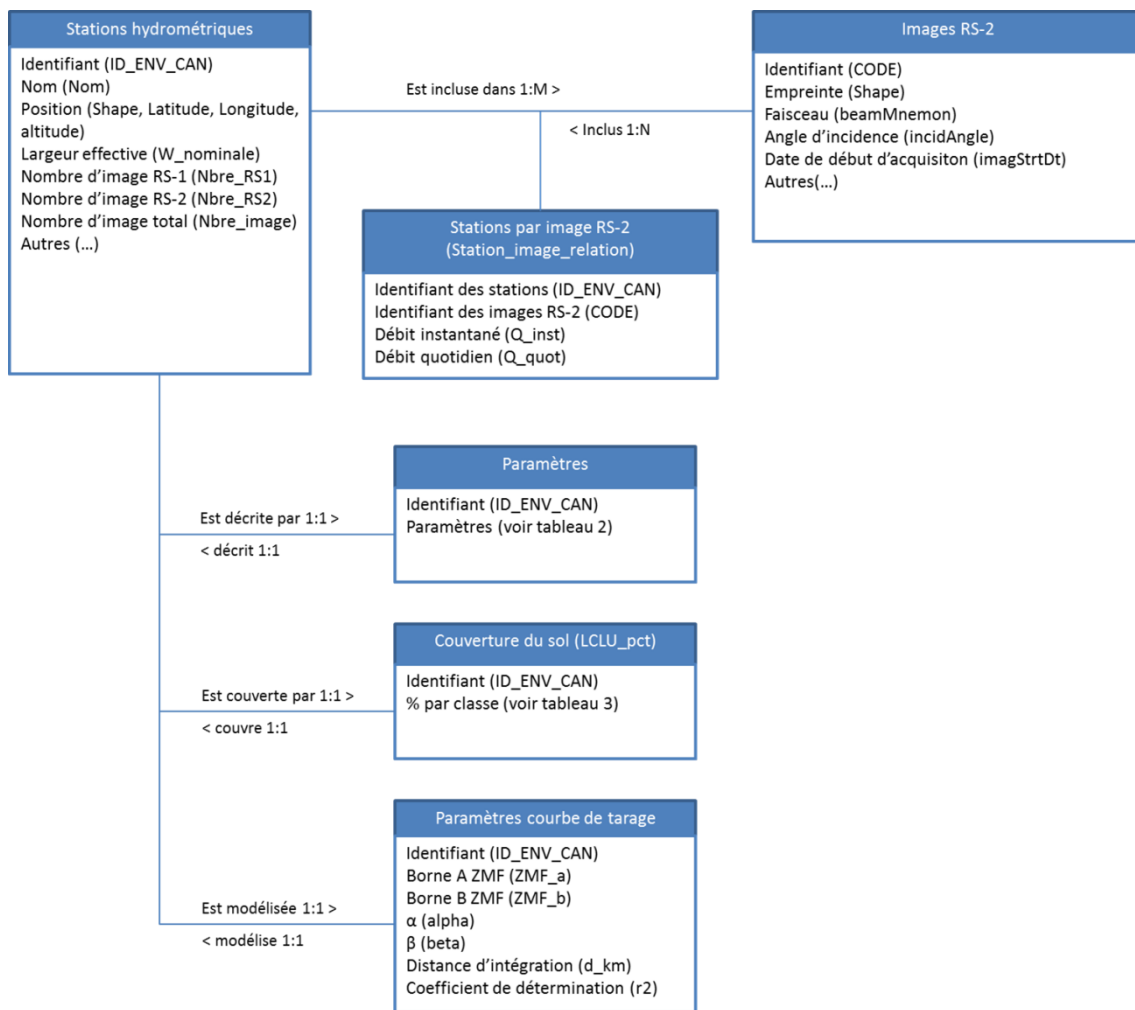


Figure 28 : Structure relationnelle de la base de données spatiales Finale.

La table Stations hydrométriques est également reliée aux deux tables de paramètres descriptifs (Paramètres et Couverture du sol) ainsi qu'à la table des paramètres de courbes de tarage dans une relation « un à un », i.e. qu'une station est décrite par un seul ensemble de paramètres alors qu'un ensemble de paramètre ne décrit qu'une seule station.

La création de ces relations permet de facilement interroger les différentes tables une fois dans ArcGIS en cliquant sur une station ou une empreinte d'image RS-2 (Figure 29).

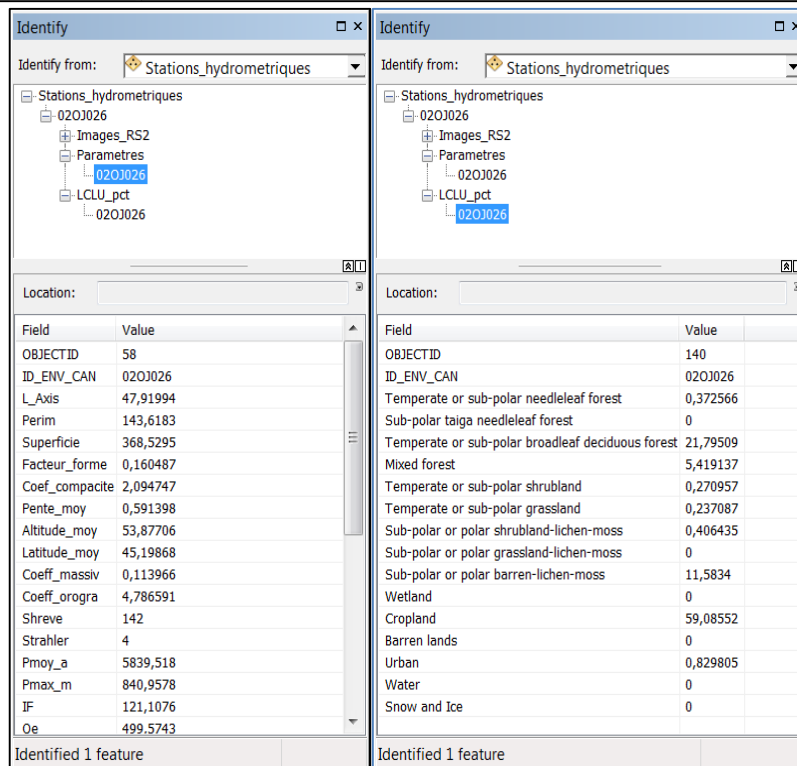
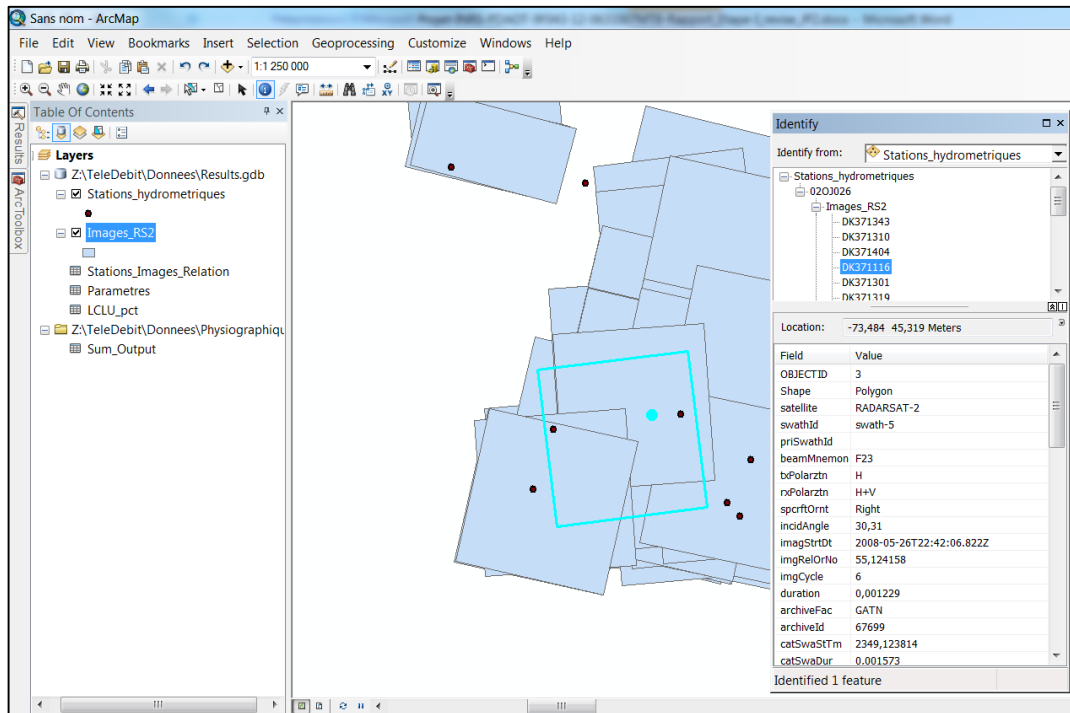


Figure 29 : Interface d'interrogation dans ArcMap.

4 Conclusions et recommandations

Lors de cette première étape du projet, nous avons démontré :

1. la faisabilité d'une méthode simple et universelle d'extraction des pixels d'eau ou mouillés, à partir de l'analyse de la rétrodiffusion RADARSAT. Cette méthode a été évaluée au moyen de seulement 10 stations hydrométriques jaugées mais avec des configurations assez différentes de largeurs de section transversale du cours d'eau et de débits instantanés (indication de robustesse de la méthode);
2. l'existence d'un lien exploitable entre la largeur effective (We) extraite à partir de l'imagerie Radarsat et le débit instantané de la rivière (Q) qui nous permet de bâtir des courbes de tarage satellitaires, puisque la variation de We explique une majeure partie de la variance du Q .

Les conditions favorables pour l'application d'une telle méthode sont :

1. des conditions d'acquisition homogènes des images RS-2 (angle d'incidence, orbite);
2. l'existence de berges de faibles pentes (section transversale de forme trapézoïdale). Les zones de berges encaissées ne sont pas favorables à son application.

Pour la suite du projet et avec l'addition des d'images Radarsat-1 dans l'analyse, nous allons pouvoir :

1. approfondir l'évaluation de la méthode dans des conditions physiographiques et dans des latitudes diversifiées;
2. approfondir l'évaluation des effets de double rebond et de l'ombre portée, les algorithmes développés pour la correction de ces effets n'ont pas apportés des améliorations significatives dans le rapport We et Q jusqu'à présent;
3. retravailler les seuils de détection de la fonction d'appartenance (appuyer le choix des seuils de détection universels avec la prise en compte des données Radarsat-1);
4. tester la pertinence d'intégrer les zones affectées par les changements du débit, particulièrement les milieux humides contiguës à la rivière, dans le masque de la zone de calcul.

5 Annexes

5.1 BD-bassin versant

Ci-dessous nous trouverons la définition et la méthode utilisée dans le calcul de chaque variable. Le nom est accompagné entre parenthèse de sa dénomination dans la base de données :

- **Superficie (Superficie)**

Correspond à la superficie, exprimée en km², couverte par le bassin versant ayant comme exutoire la station de jaugeage.

- **Périmètre (Perim)**

Correspond à la longueur de la ligne de partage des eaux définissant la limite du bassin versant, exprimée en km.

- **Longueur de l'axe longitudinal (L_Axis)**

Distance maximale entre deux points appartenant à la limite du bassin versant, exprimée en km.

- **Facteur de forme (Facteur_forme)**

Correspond à la superficie du bassin versant divisée par la longueur de l'axe longitudinal élevé au carré.

$$Facteur_forme = \frac{S}{L_Axis^2}$$

- **Indice de compacité de Gravelius (Coef_compacite)**

Correspond au rapport du périmètre du bassin à celui d'un cercle de même surface. L'indice a une valeur proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieur à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

$$coef_compacite = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

- **Pente moyenne (pente_moy)**

Correspond à la pente moyenne de la région couverte par le bassin versant. La pente est calculée à chaque pixel du modèle numérique de terrain puis la moyenne de tous les pixels à l'intérieur des limites du bassin est calculée. Pour un pixel donné, la pente correspond à la différence d'élévation maximale entre le pixel et ses 8 voisins, divisée par la distance centre à centre entre les deux pixels en question. La pente est exprimée en pourcentage (%). La pente

moyenne donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct - donc sur le temps de concentration - et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

- **Altitude moyenne (Altitude_moy)**

Correspond à l'élévation moyenne, exprimée en mètre, de la région couverte par le bassin versant par rapport au niveau moyen des mers.

- **Latitude moyenne (Latitude_moy)**

Correspond à la latitude moyenne, exprimée en degrés décimaux, de la région couverte par le bassin versant par rapport au plan équatorial.

- **Coefficient de massivité (Coeff_massiv)**

Correspond à la moitié de la différence d'élévation entre le point le plus haut et le point le plus bas de la région couverte par le bassin versant, divisée par la superficie du bassin en m². S'exprime en m⁻¹. Une valeur élevée du coefficient de massivité reflète une plus grande augmentation de la hauteur par unité de surface et donc des risques accrus de ruissellement, d'inondations et d'érosion.

$$coeff_massiv = \frac{h_{max} - h_{min}}{2} \times \frac{1}{superficie}$$

- **Coefficient orographique (Coeff_orogra)**

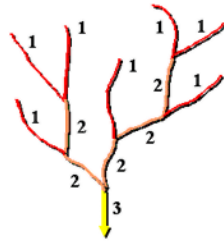
Correspond à la moitié de la différence d'élévation entre le point le plus haut et le point le plus bas de la région couverte par le bassin versant, élevée au carré puis divisée par la superficie du bassin en m². S'exprime sans unité.

$$coeff_orogra = \left(\frac{h_{max} - h_{min}}{2} \right)^2 \times \frac{1}{superficie}$$

- **Ordre de Strahler (Strahler)**

Dans la méthode Strahler, tous les cours d'eau sans affluents sont classés avec la valeur 1 et sont connus sous le nom du premier ordre. L'ordre d'écoulement augmente lorsque des cours d'eau du même ordre se croisent. L'intersection de deux cours d'eau de premier ordre crée donc un cours d'eau de deuxième ordre. L'intersection de deux cours d'eau de deuxième ordre crée un cours d'eau de troisième ordre, et ainsi de suite. En revanche, l'intersection de deux cours d'eau d'ordres différents n'incrémente pas l'ordre.

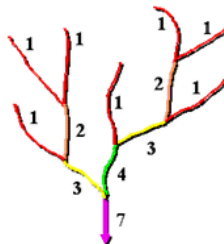
[<http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z000000z3000000/>]



- **Ordre de Shreve (Shreve)**

La méthode de Shreve tient compte de l'ensemble des cours d'eau du réseau. Comme avec la méthode de Strahler tous les cours d'eau externes sont associés à un ordre 1. Toutefois, les cours d'eau internes dans le cadre de la méthode de Shreve s'additionnent. Par exemple, l'intersection de deux liaisons de premier ordre crée une liaison de deuxième ordre, l'intersection d'une liaison de premier ordre et d'une liaison de deuxième ordre crée une liaison de troisième ordre et l'intersection d'une liaison de deuxième ordre et d'une liaison de troisième ordre crée une liaison de cinquième ordre. L'ordre d'un cours d'eau, dans la méthode de Shreve, est directement proportionnel au nombre de cours d'eau en amont.

[<http://help.arcgis.com/fr/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z000000z3000000/>]



- **Longueur du cours d'eau principal (L_princ)**

Correspond à la distance curviligne depuis l'exutoire jusqu'au cours d'eau le plus en amont, en suivant toujours le segment d'ordre le plus élevé lorsqu'il y a un embranchement. Si les deux segments à l'embranchement sont de même ordre, on suit celui qui draine la plus grande surface. Exprimée en km.

- **Sinuosité du cours d'eau principal (S_princ)**

Correspond à la longueur réelle du cours d'eau divisée par la distance en ligne droite entre le point amont et le point aval. Lorsque le résultat est compris entre 1,25 et 1,5 on dit que le cours d'eau est sinueux. Au-delà de 1,5 il est méandrique.

- **Sinuosité du cours d'eau principal sur les 10km en amont de la station (S_princ_10)**

Correspond à la longueur réelle du cours d'eau (10km) divisée par la distance en ligne droite entre le point amont et le point aval. Lorsque le résultat est compris entre 1,25 et 1,5 on dit que le cours d'eau est sinueux. Au-delà de 1,5 il est méandrique.

- **Longueur du réseau hydrographique (L_Hydro)**

Correspond à la somme de la longueur de tous les cours d'eau en amont de la station hydrométrique, exprimée en km.

- **Pente moyenne du cours d'eau principal (P_princ)**

Correspond à la différence d'altitude entre les points extrêmes du cours d'eau divisée par sa longueur totale.

$$Pm_{cp} = \frac{\Delta H_{max}}{L}$$

- **Pente moyenne du cours d'eau principal sur 10km (P_princ_10)**

Correspond à la différence d'altitude entre la station et un point situé à 10 km en amont de celle-ci divisée par la distance les séparant (10km).

- **Densité de drainage (Dd)**

Correspond à la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant. S'exprime en km /km².

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A}$$

- **Densité hydrographique (Dh)**

Correspond au nombre de cours d'eau par unité de surface.

$$Dh = \frac{\sum N_i}{A}$$

- **Précipitations moyennes annuelles (Pmoy_a)**

Correspond à la moyenne des précipitations reçues par année entre 1960 et 2010 sur l'ensemble du bassin versant, exprimé en mm.

$$Pmoy_a = \frac{\sum_{1960}^{2010} \sum_{m=1}^{12} P_m}{(2010 - 1960) + 1}$$

- **Précipitations maximales moyennes mensuelles (Pmax_m)**

Correspond à la moyenne, par année entre 1960 et 2010, des précipitations reçues pendant le mois où les précipitations ont été maximales dans l'année, exprimé en mm.

$$Pmax_m = \frac{\sum_{1960}^{2010} \max(P_1, P_2, \dots, P_{12})}{(2010 - 1960) + 1}$$

- **Indice de Fournier (IF)**

Correspond à la précipitation maximale moyenne mensuelle élevée au carré et divisée par la précipitation moyenne annuelle.

$$IF = \frac{P_{max_m^2}}{P_{moy_a}}$$

- **Indice de Fournier, version 2 (IF_unite)**

Version modifiée de l'indice de Fournier où les précipitations sont ramenées par unité de surface (pixel).

$$IF_unite = \frac{P_{max_m^2}}{P_{moy_a}} * \frac{100}{S}$$

- **Quotient pluviothermique d'Emberger (Qe)**

L'indice d'Emberger prend en compte les précipitations annuelles P, la moyenne des maxima de température du mois le plus chaud (M en K) et la moyenne des minima de température du mois le plus froid (m en K) (Emberger, 1955)

$$Qe = \frac{2000P}{M^2 - m^2}$$

- **Quotient pluviothermique d'Emberger, version 2 (Qe_unite)**

Version modifiée du quotient pluviothermique d'Emberger où les précipitations totales sont ramenées par unité de surface (pixel).

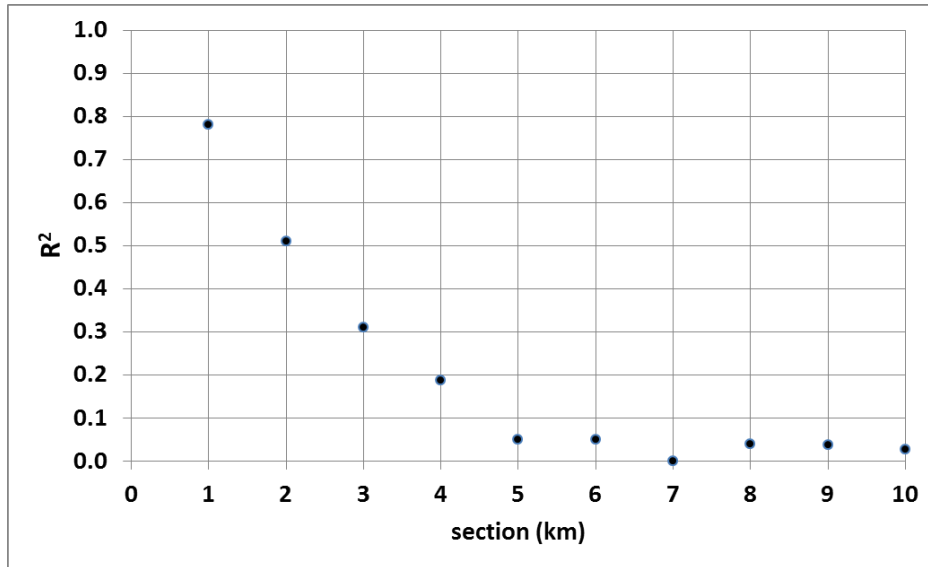
$$Qe_unite = \frac{2000P}{M^2 - m^2} * \frac{100}{S}$$

5.2 BD-courbes de tarage satellitaire

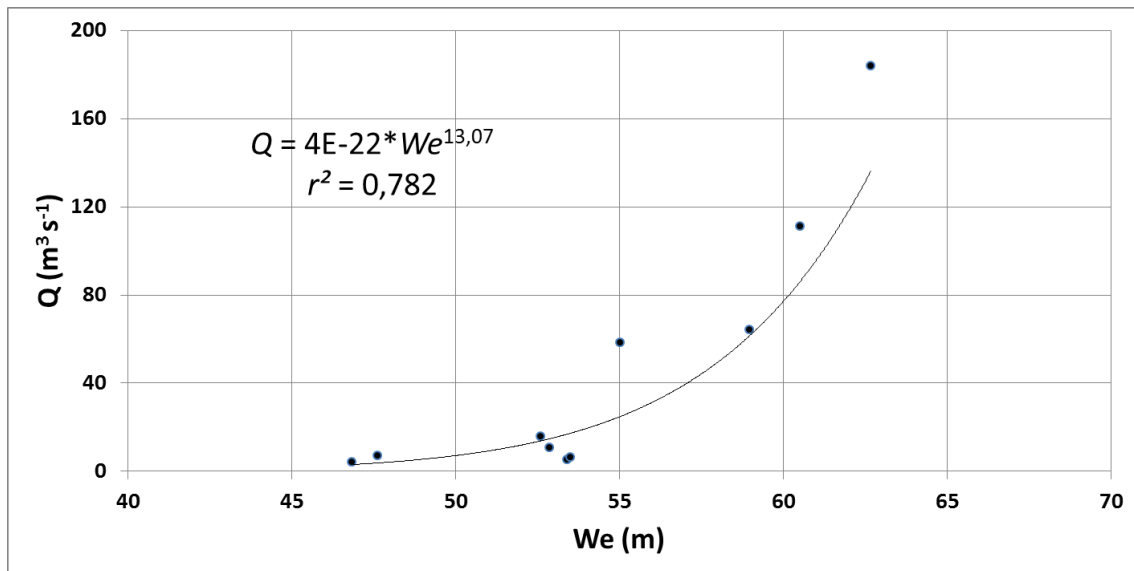
5.2.1 Station hydrométrique « Yamaska » (02OG002)

5.2.1.1 Seuils Zmf : $a = -19$ et $b = -15$

Distance d'intégration (d) :

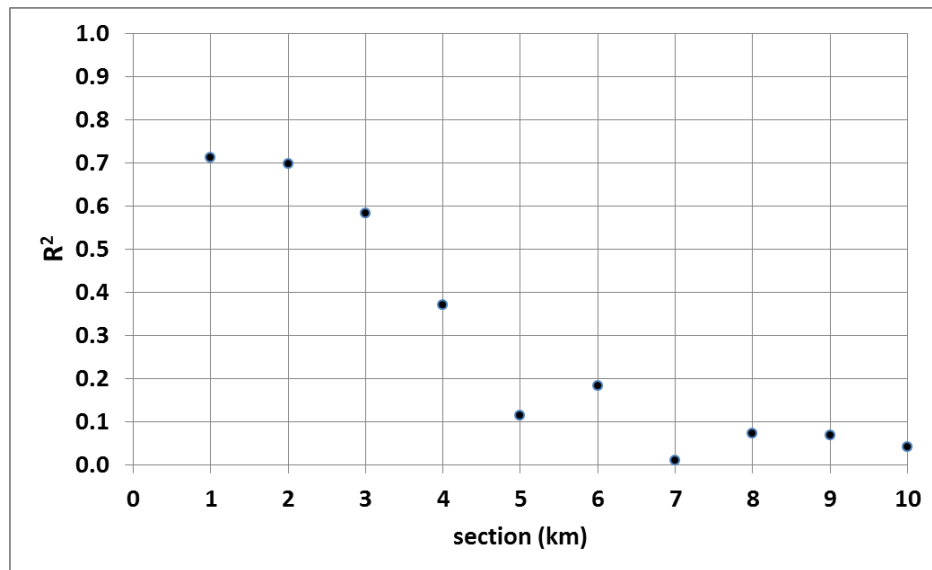


Courbe de tarage correspondante pour $d=1$ km :

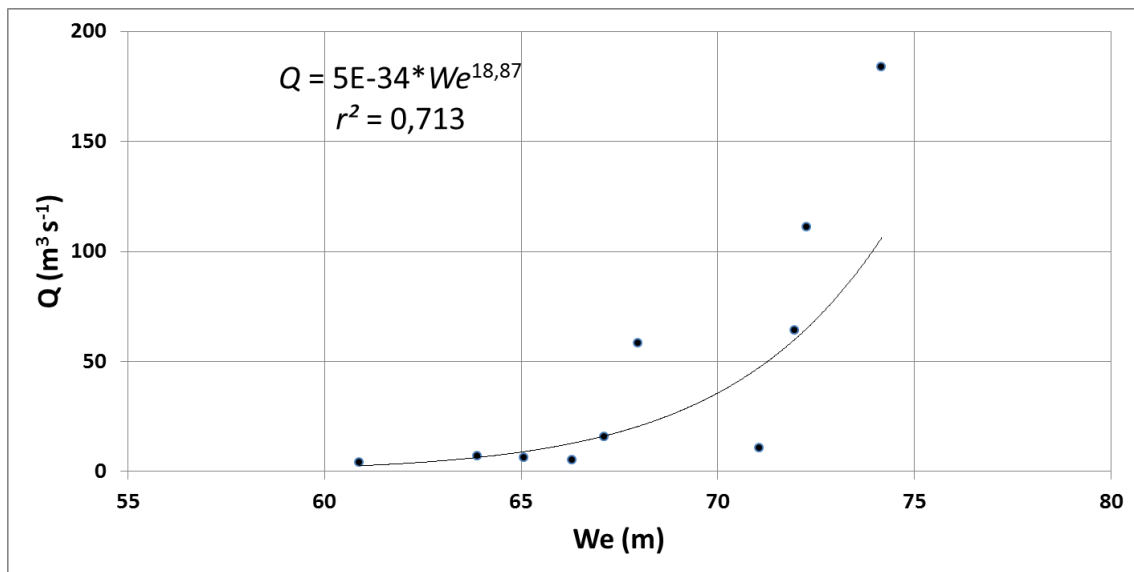


5.2.1.2 Seuils Zmf : $a = -18$ et $b = -14$

Distance d'intégration (d) :



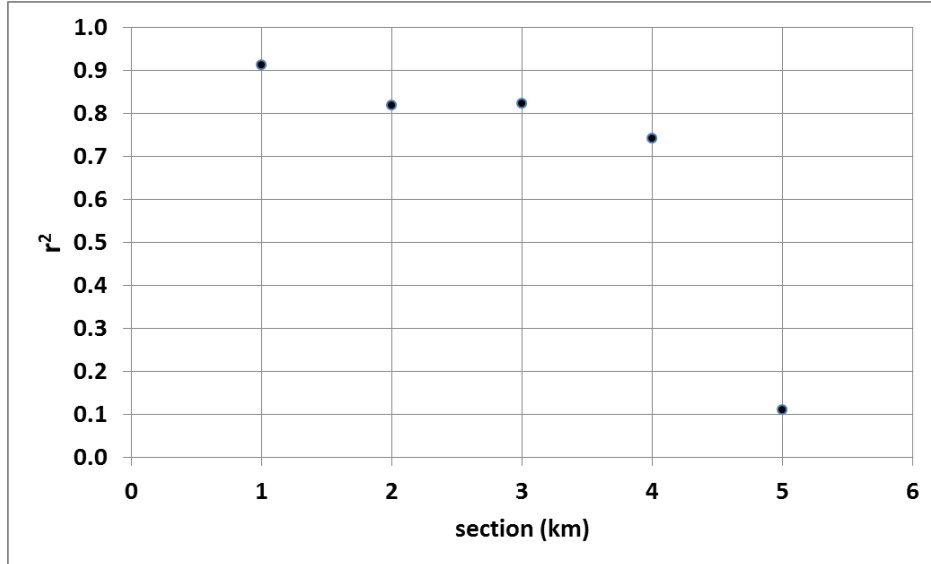
Courbe de tarage correspondante pour $d=1$ km :



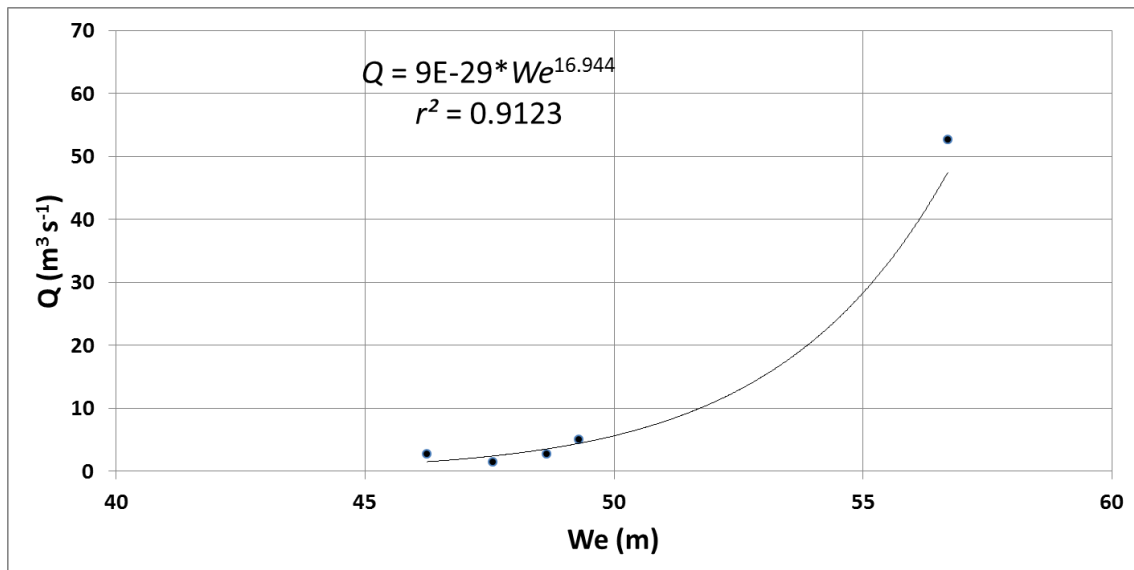
5.2.2 Station hydrométrique « aux Brochets » (02OH008)

5.2.2.1 Seuils Zmf : $a = -18$ et $b = -9$

Distance d'intégration (d) :

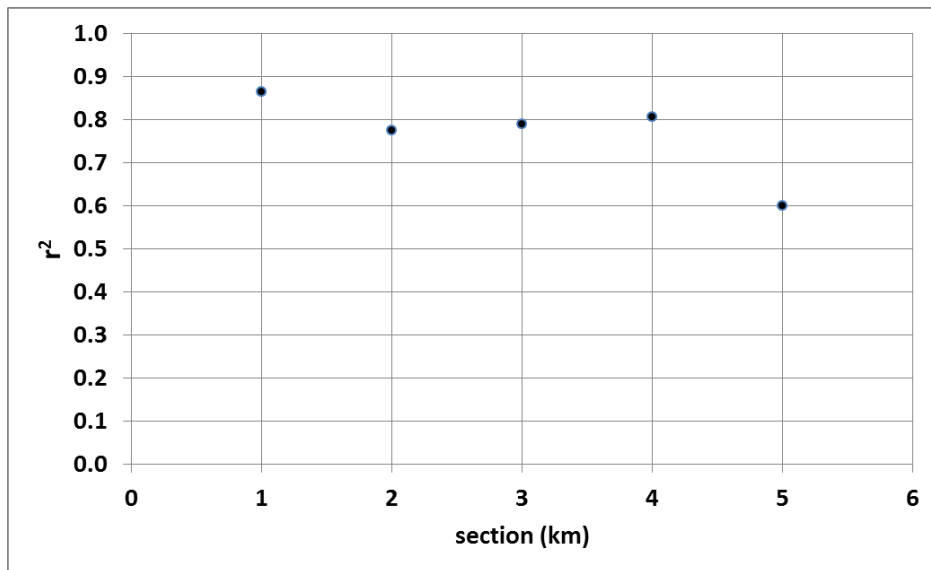


Courbe de tarage correspondante pour $d=1$ km :

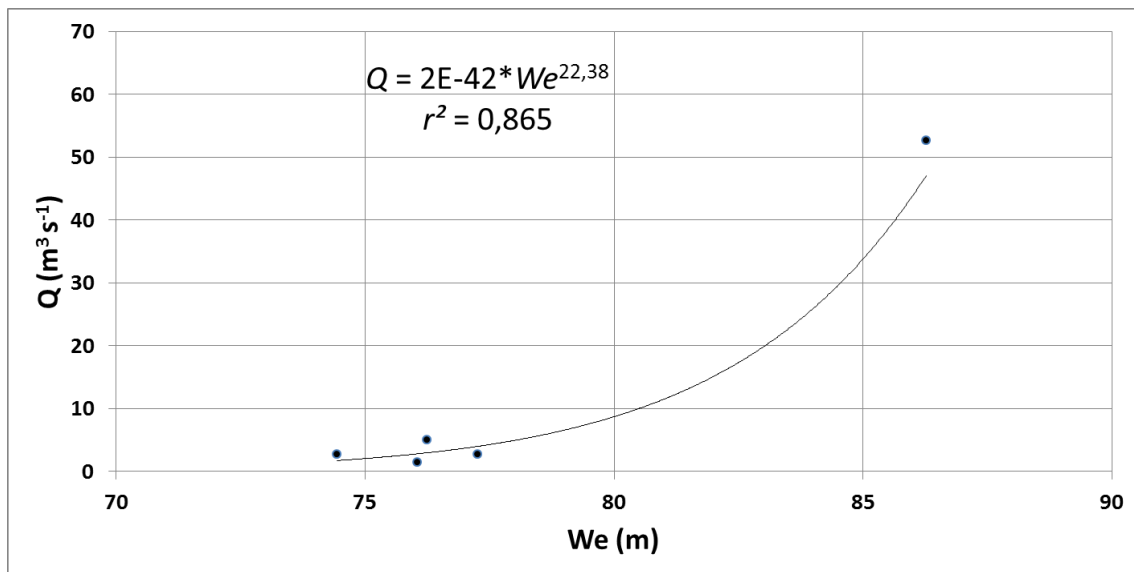


5.2.2.2 Seuils Zmf : $a = -12$ et $b = -8$

Distance d'intégration (d) :

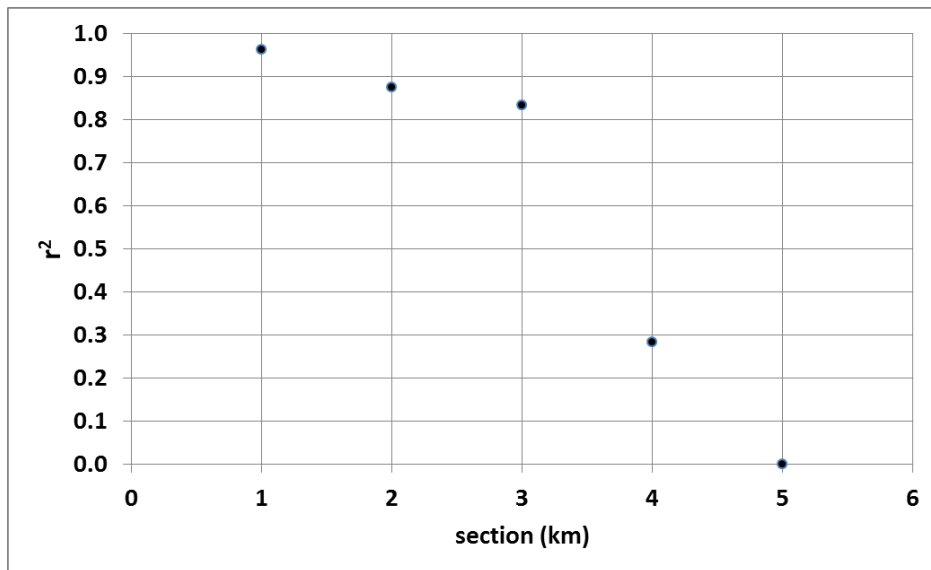


Courbe de tarage correspondante pour $d=1$ km :

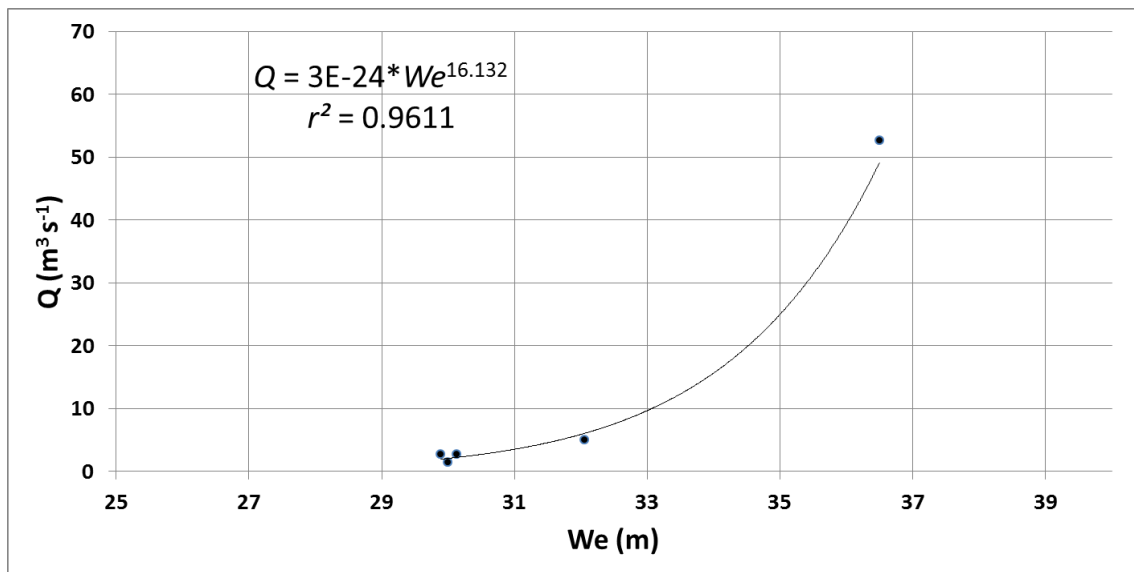


5.2.2.3 Seuils Zmf : a = -18 et b = -14

Distance d'intégration (d) :



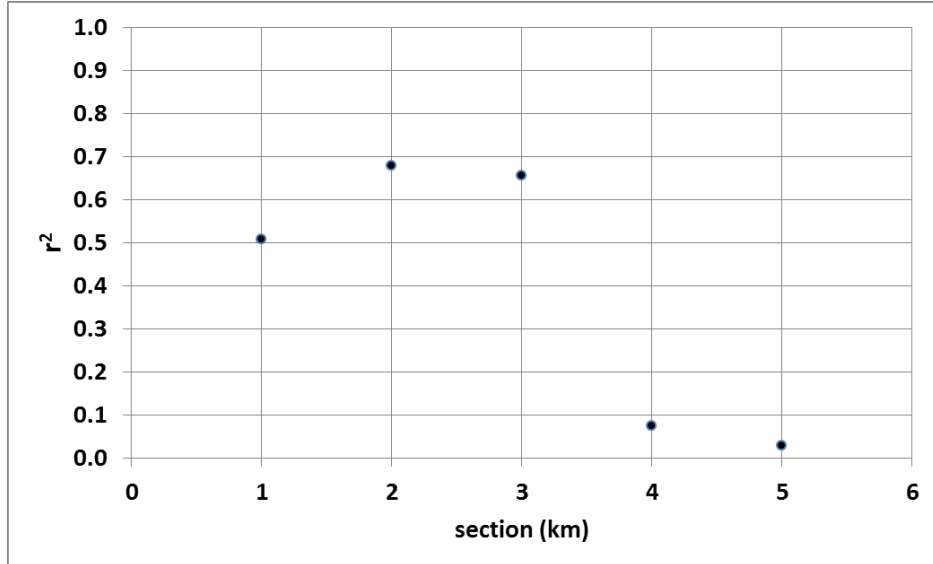
Courbe de tarage correspondante pour $d=1$ km :



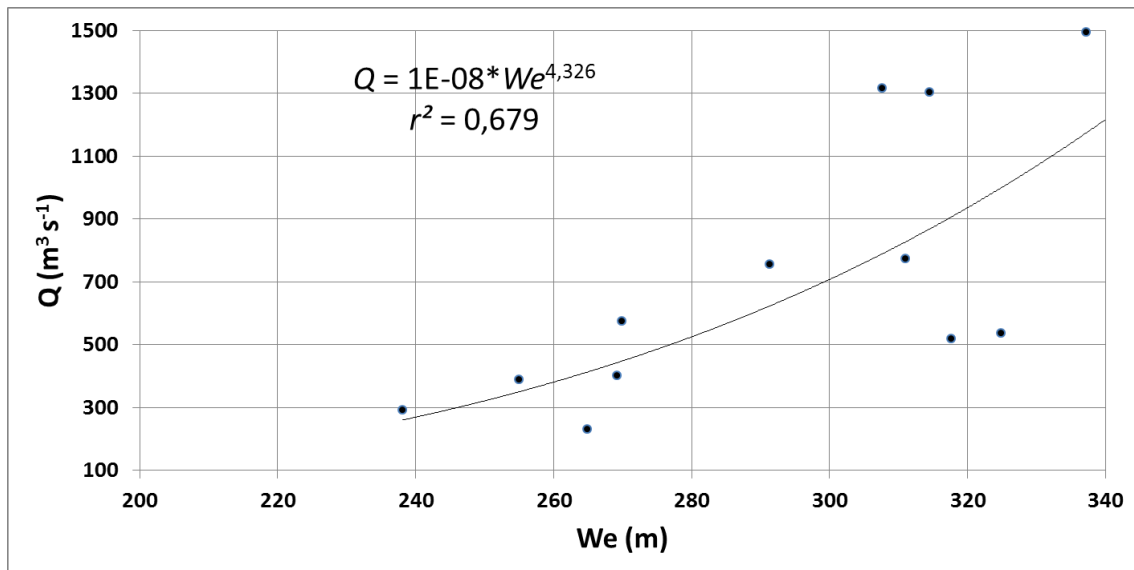
5.2.3 Station hydrométrique « Richelieu » (02OJ007)

5.2.3.1 Seuils Zmf : $a = -18$ et $b = -13$

Distance d'intégration (d) :

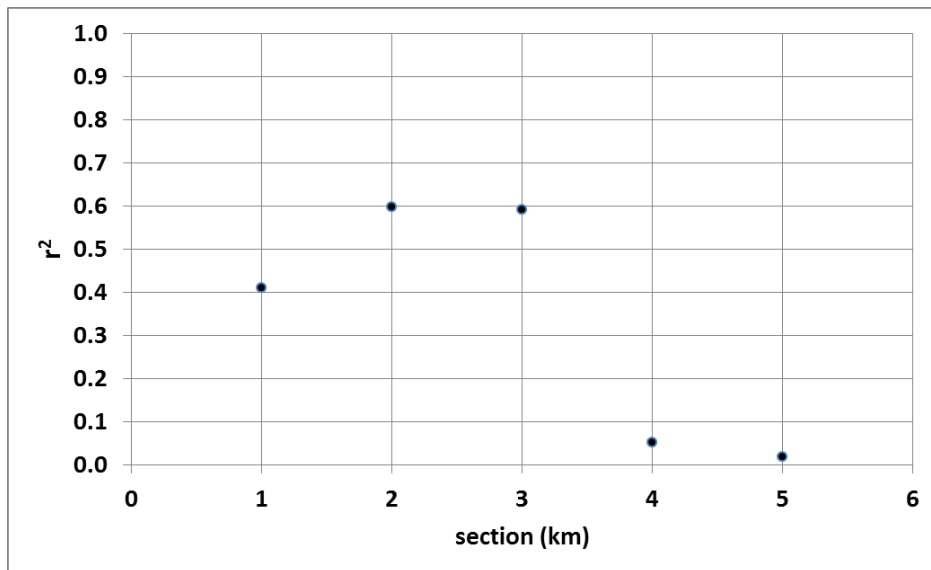


Courbe de tarage correspondante pour $d=2$ km :

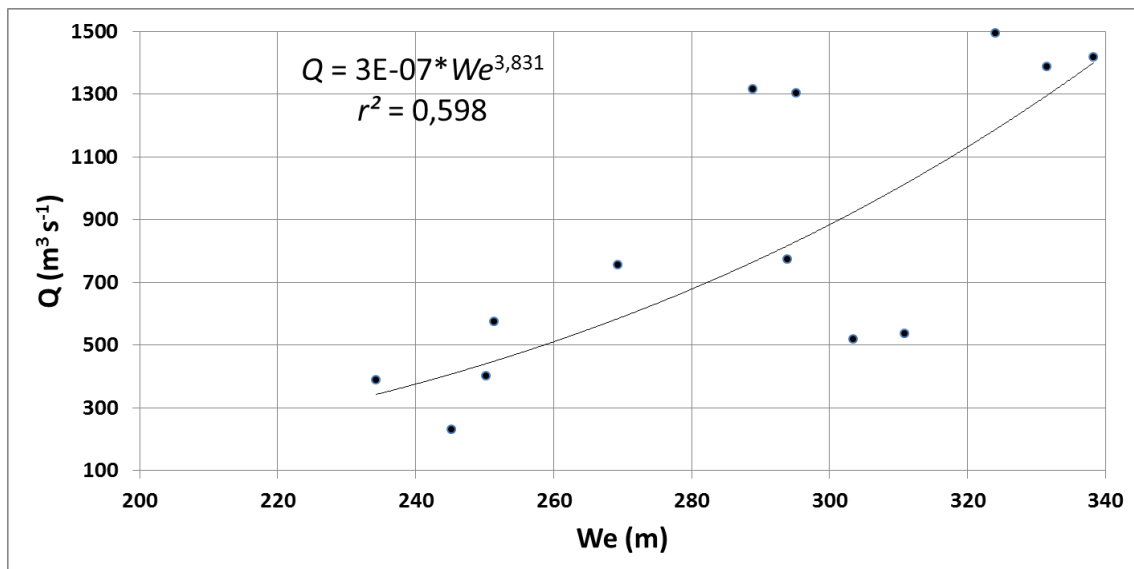


5.2.3.2 Seuils Zmf : a = -18 et b = -14

Distance d'intégration (d) :



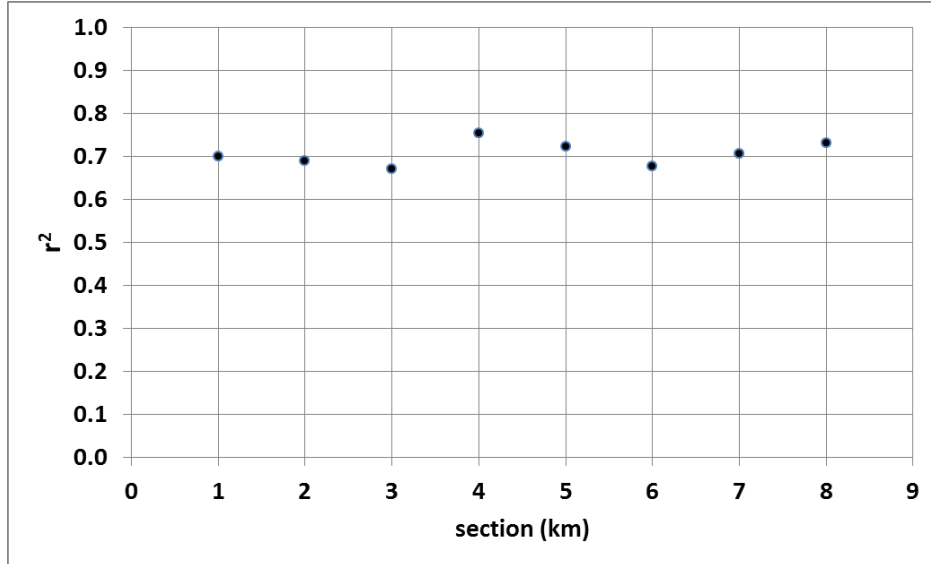
Courbe de tarage correspondante pour $d=2$ km :



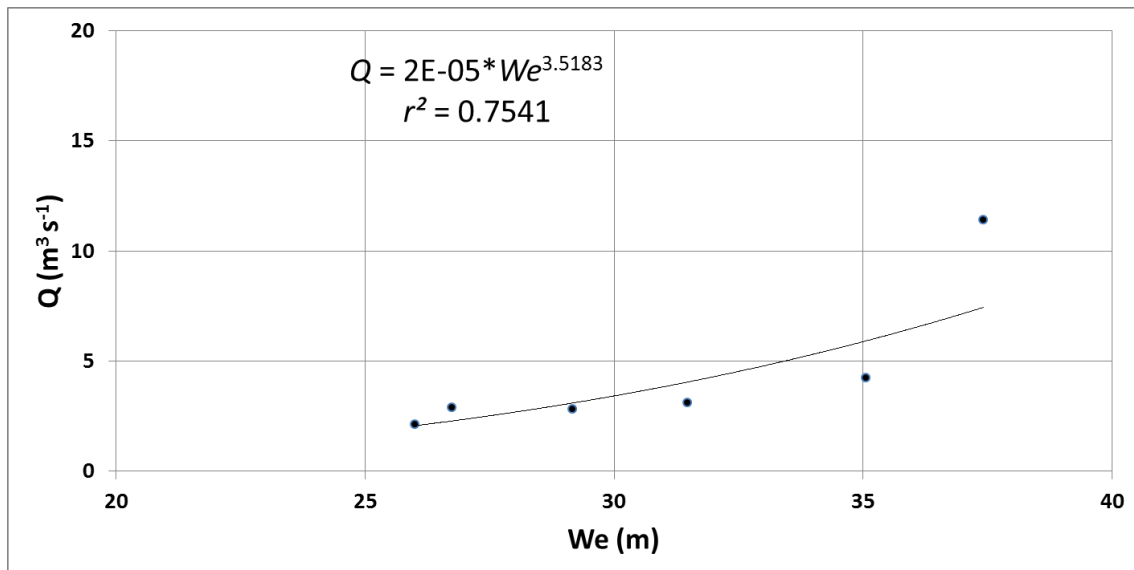
5.2.4 Station hydrométrique « Acadie » (02OJ026)

5.2.4.1 Seuils Zmf : $a = -10$ et $b = -5$

Distance d'intégration (d) :

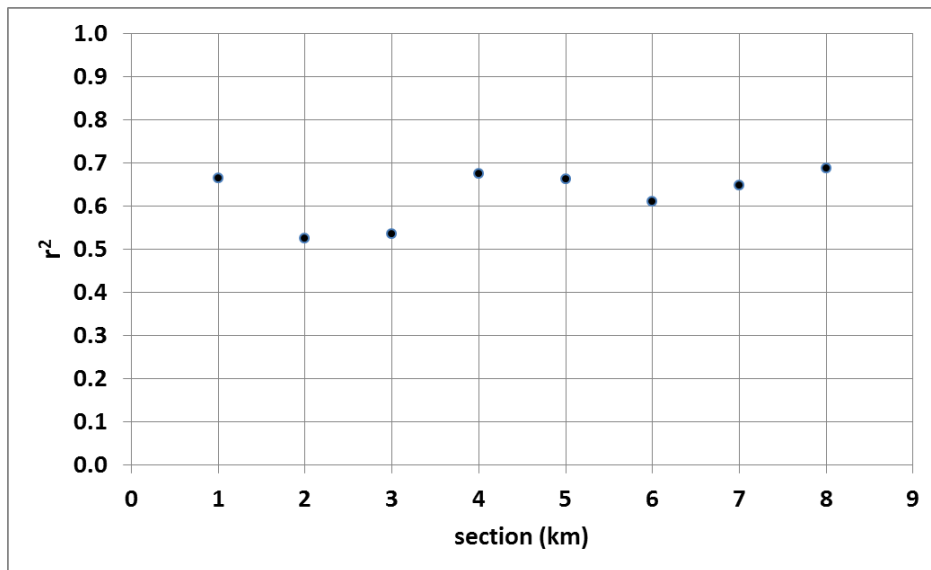


Courbe de tarage correspondante pour $d=4$ km :

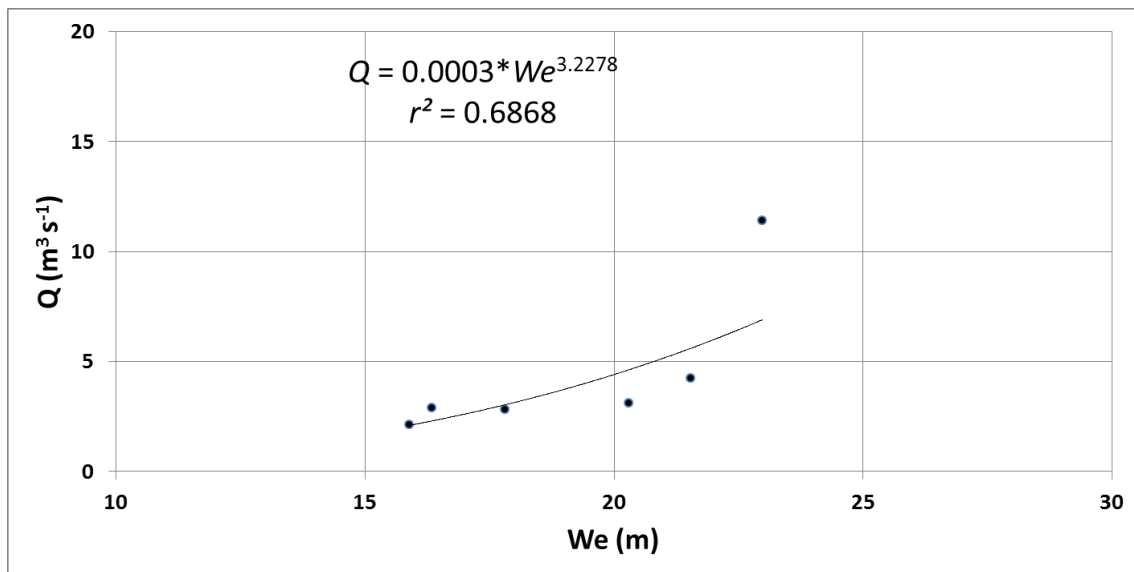


5.2.4.2 Seuils Zmf : $a = -18$ et $b = -14$

Distance d'intégration (d) :



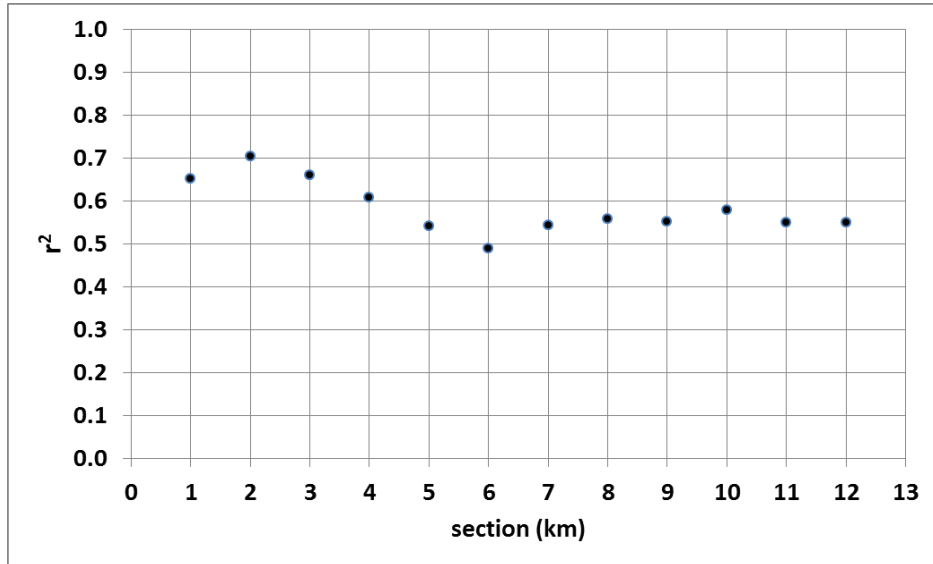
Courbe de tarage correspondante pour $d=8$ km :



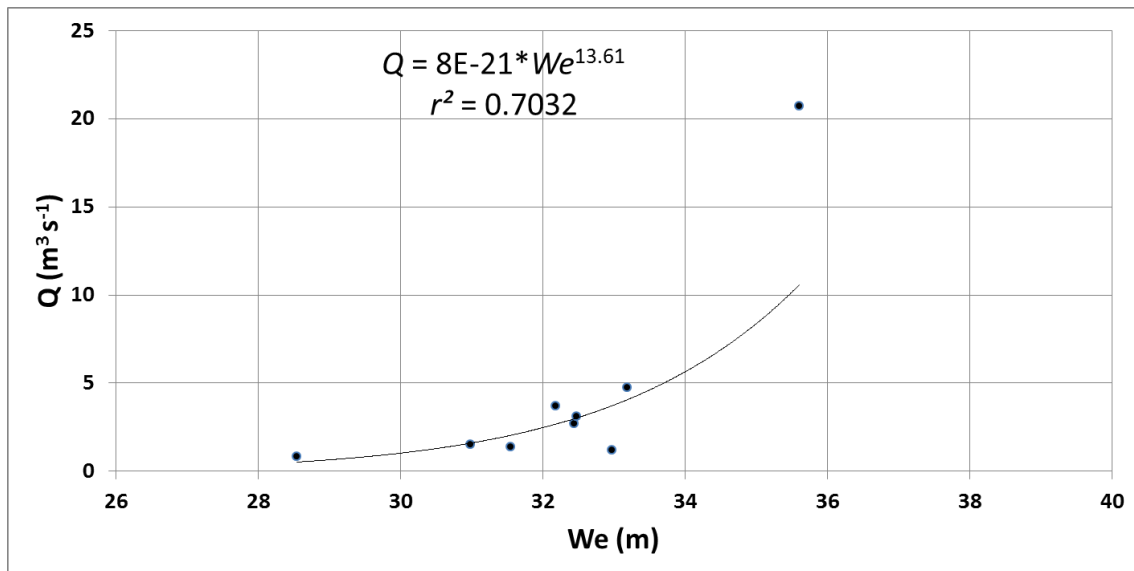
5.2.5 Station hydrométrique « Point Wolfe » (01BV006)

5.2.5.1 Seuils Zmf : $a = -16$ et $b = -10$

Distance d'intégration (d) :

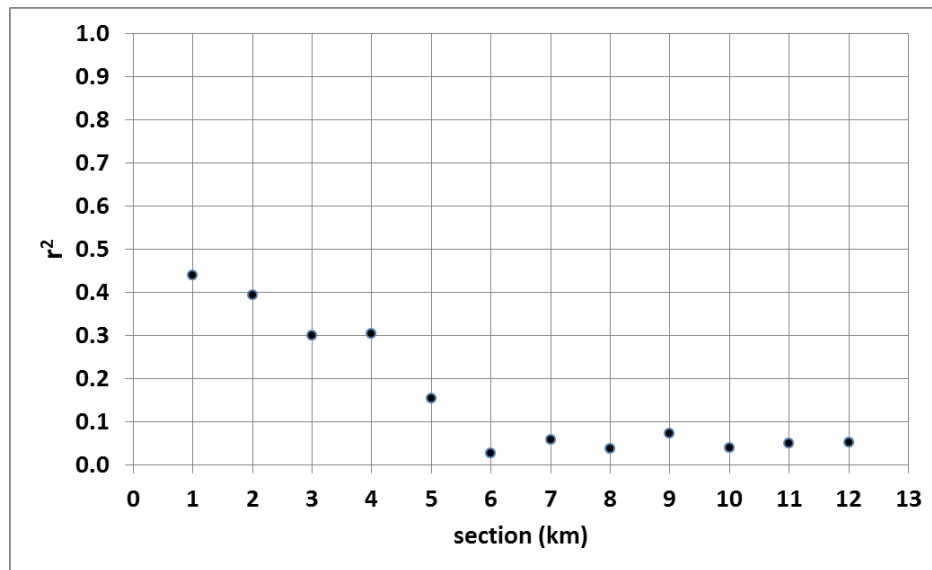


Courbe de tarage correspondante pour $d=2$ km :

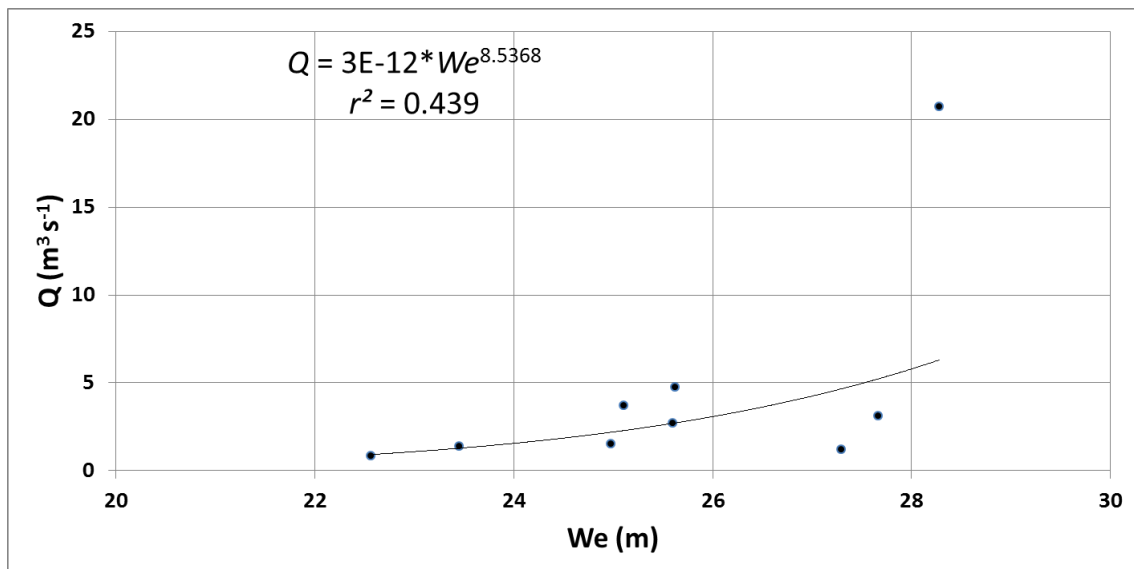


5.2.5.2 Seuils Zmf : a = -18 et b = -14

Distance d'intégration (d) :



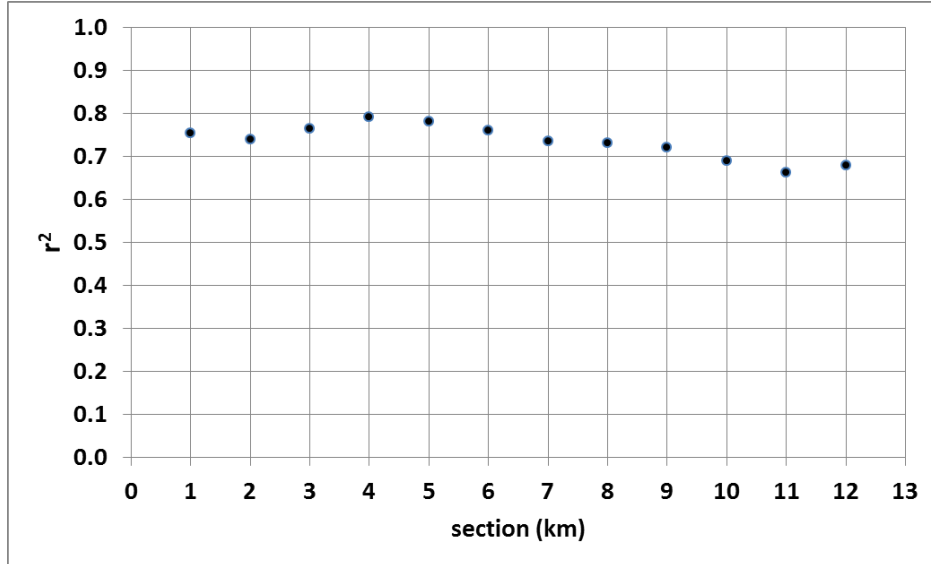
Courbe de tarage correspondante pour $d=1$ km :



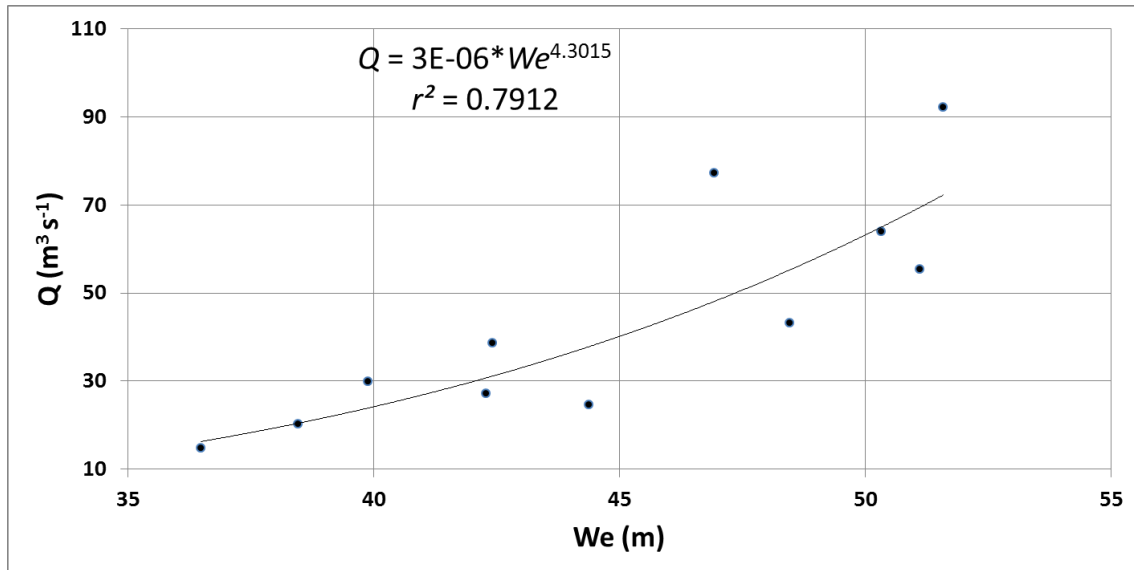
5.2.6 Station hydrométrique « Terra Nova » (02YS005)

5.2.6.1 Seuils Zmf : $a = -18$ et $b = -11$

Distance d'intégration (d) :

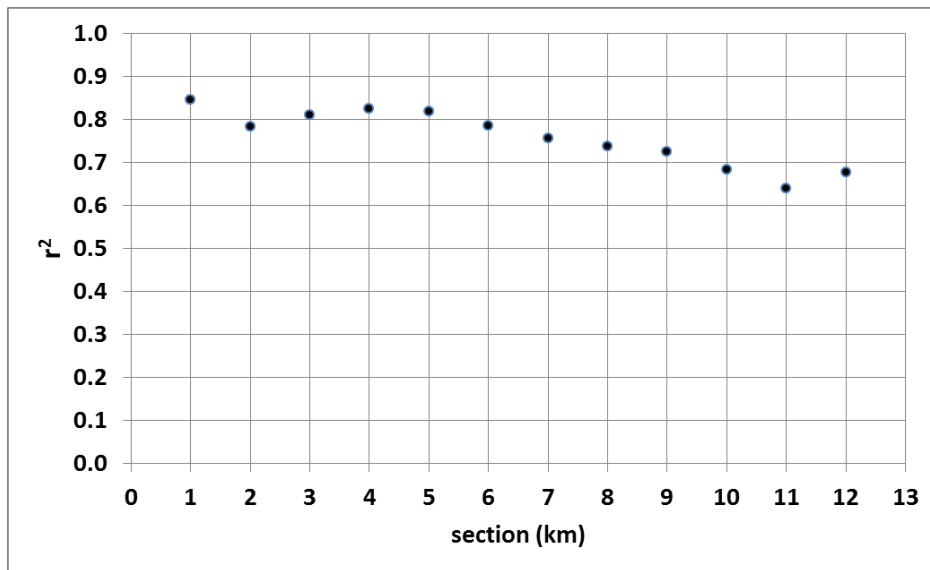


Courbe de tarage correspondante pour $d=4$ km :

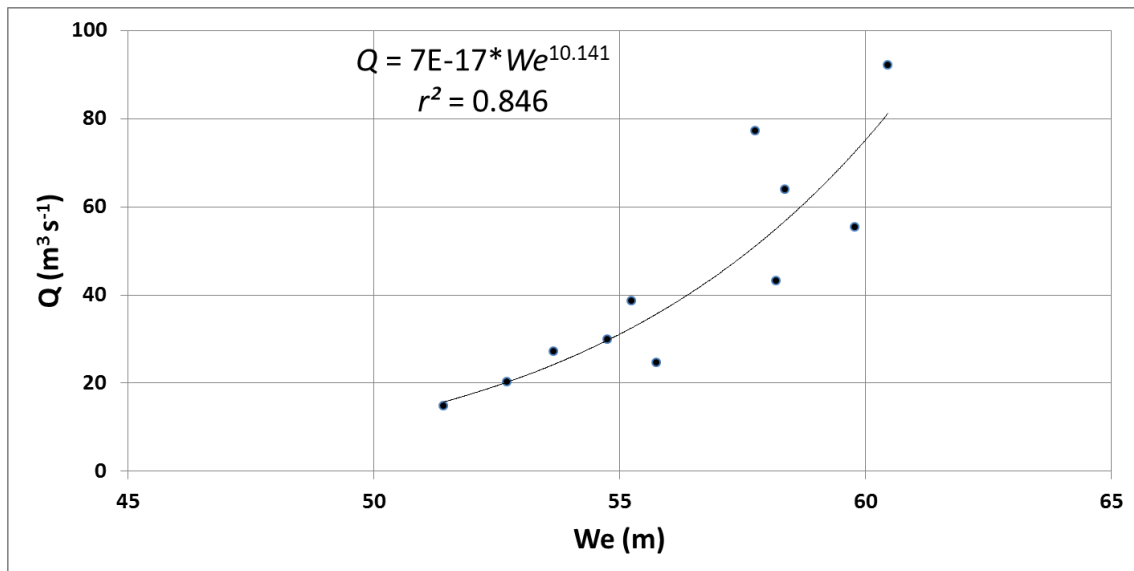


5.2.6.2 Seuils Zmf : a = -14 et b = -9

Distance d'intégration (d) :

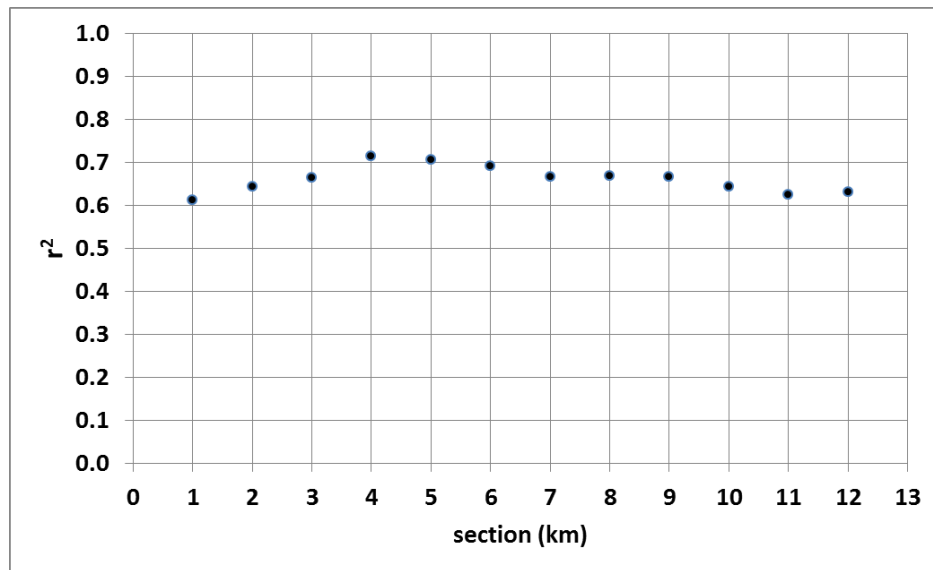


Courbe de tarage correspondante pour $d=1$ km :



5.2.6.3 Seuils Zmf : $a = -18$ et $b = -14$

Distance d'intégration (d) :



Courbe de tarage correspondante pour $d=4$ km :

