

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE CALIBRATION AUTOMATIQUE
POUR TOUT MODÈLE DE RIVIÈRE BASÉ SUR LE LOGICIEL SRH-2D

SIMON DESLAURIERS

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

AVRIL 2017

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE CALIBRATION AUTOMATIQUE
POUR TOUT MODÈLE DE RIVIÈRE BASÉ SUR LE LOGICIEL SRH-2D

présenté par : DESLAURIERS Simon

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FUAMBA Musandji, Ph. D., président

M. MAHDI Tew-Fik, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. SHAKIBAEINIA Ahmad, Ph. D., membre

DÉDICACE

À tous ceux qui m'ont encouragé durant cette étape.

REMERCIEMENTS

Ce mémoire est le résultat d'un long travail de recherche et d'un investissement considérable de temps et d'énergie. Je souhaite remercier du fond du cœur tous ceux qui m'ont encouragé durant mon parcours.

Je souhaite remercier tout particulièrement mon Directeur de Maîtrise, le professeur Tew-Fik Mahdi, à qui j'adresse toute ma gratitude. Merci de m'avoir épaulé durant mon travail, de m'avoir conseillé durant mon parcours et surtout d'avoir eu confiance en moi.

Je remercie aussi tous les membres de ma famille ; ma mère, mon père, Michel et mon frère, tous mes amis pour leurs encouragements et Alice, à qui je dois énormément pour sa patience, son écoute et son appui. Merci Alice.

RÉSUMÉ

Les modèles numériques de rivière sont largement utilisés dans de multiples domaines de l'ingénierie. Au cours des années, le perfectionnement de ces modèles numériques les a rendus indispensables pour répondre à des questions de prévisions, de prédictions et de designs. Ils servent notamment à adresser des situations qui ne peuvent pas être étudiées directement ou à étudier des problèmes trop complexes pour être approchées par des simplifications. Ces modèles gagnent en complexité par l'intégration continue de modules supplémentaires permettant d'augmenter la capacité et la précision des simulations. On y compte également de plus en plus d'outils de représentation graphique des résultats pour le bienfait visuel de l'utilisateur. Cependant, peu est fait pour aider dans la calibration de ces modèles qui comptent de plus en plus de paramètres d'ajustement.

Dans la construction d'un modèle numérique, la calibration du modèle est une étape clé en vue de l'exploitation de celui-ci. La méthode de calibration la plus répandue reste encore aujourd'hui la calibration manuelle où l'utilisateur modifie graduellement les paramètres du modèle jusqu'à l'obtention de résultats satisfaisants. Cette façon de procéder est très exigeante en termes de temps et la qualité de l'ajustement dépendra de l'expérience de l'utilisateur.

Plusieurs méthodes de calibration automatique ont été développées au fil du temps afin d'assister dans l'étape de la calibration. L'intégration de ces différentes méthodes reste cependant difficile compte tenu de l'architecture variable des modèles numériques.

O.P.P.S., un outil de calibration automatique, a donc été construit afin d'assister dans la tâche de la calibration des modèles de rivière. L'outil conçu combine PEST, un logiciel de calibration automatique indépendant du modèle qu'il calibre à SRH-2D, un logiciel de modélisation hydrodynamique capable de modéliser des systèmes de rivières en deux dimensions.

PEST (Parameter ESTimation) utilise l'algorithme de Gauss-Marquardt-Levenberg, une méthode d'estimation non-linéaire, afin de l'assister dans la recherche du jeu de paramètre offrant la meilleure représentativité du phénomène étudié. PEST tente de réduire au minimum une fonction objectif contenant les différences entre des valeurs mesurées ou observées et les valeurs simulées par le modèle numérique. PEST a l'avantage d'être complètement indépendant du modèle auquel il est associé mais requiert une préparation relativement fastidieuse.

SRH-2D est un logiciel de modélisation de l'écoulement 2D et de transport de sédiments basé sur la résolution des équations de propagation d'une onde dynamique. Le maillage flexible permet de diviser facilement les différentes zones d'une rivière et d'y appliquer un maillage distinct.

L'outil conçu combine les deux logiciels en facilitant grandement la préparation du processus de calibration de PEST. Avec un minimum d'interaction de la part de l'utilisateur, O.P.P.S. permet de mettre en marche la calibration d'un modèle de rivière rapidement et simplement. L'utilisateur n'a qu'à spécifier les coefficients de Manning qu'il souhaite soumettre à la calibration ainsi que les valeurs des observations. O.P.P.S. crée les fichiers et les liens nécessaires à la mise en marche du processus de calibration. Le processus de calibration est conçu pour être exécuté en arrière-plan sans déranger l'utilisateur.

Le modèle de la rivière Ha! Ha! a été utilisé pour mettre à l'épreuve l'outil de calibration. Le modèle a été construit en se basant sur les données topographiques mesurées suite à la rupture de la digue du lac Ha! Ha!. Le modèle compte plus de 15 km de rivière divisée en cinq sections caractérisées par des coefficients de Manning distincts.

Plusieurs séries de calibration ont été réalisées dans le but d'étudier la variabilité des résultats de la calibration des coefficients de Manning selon différentes configurations. D'une série de calibration à l'autre, le nombre de points d'observations, leur positionnement ainsi que leur contenu diffère. Les premières séries de calibration utilisent un nombre variable de points d'observation contenant seulement les hauteurs d'eau, puis les mesures de vitesses sont incorporées dans les points d'observations. Dans les séries de calibration suivantes, on procède à l'introduction d'une erreur dans les hauteurs d'eau mesurées puis dans le débit entrant du modèle afin de comparer les résultats de la calibration utilisant les hauteurs d'eau avec les résultats de calibration utilisant à la fois les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement.

Les résultats montrent qu'au moins une mesure est nécessaire par section afin d'obtenir une calibration adéquate lorsque seulement les hauteurs d'eau sont utilisées. Les sections sans points d'observation ne peuvent être calibrées convenablement, laissant les paramètres à leur valeur de départ. L'ajout des mesures de vitesses aux points d'observation permet d'obtenir une calibration convenable en utilisant moins de points d'observation.

Finalement, les résultats des dernières séries de calibration montrent que l'ajout des mesures de vitesses aide à réduire l'erreur de calibration des paramètres dans le cas où une erreur est introduite

dans les données du modèle. Lorsque l'ajustement des paramètres privilégie la correspondance entre les mesures de vitesses mesurées et simulées l'erreur de calibration est moindre. À l'inverse, lorsque la calibration privilégie la correspondance entre les niveaux d'eau mesurés et simulés, l'erreur de calibration est plus grande.

ABSTRACT

River models are of a variety of usage for engineers in many fields. Over the years, the improvement of these numerical models made them essential to assess matters of prediction, prevision and design. These models are relied upon to tackle problems that cannot be studied directly or that are too complex to be appraised with simplified approached. The continuous integration of additional tools to the models has made them capable of simulating more with a higher degree of precision but with a higher degree of complexity. Countless additions are also made within the graphical interface and in the graphical presentation of the results. However, not much is done to assist the user in the calibration.

In the process of building a numerical model, the calibration is a key step in the process of obtaining a reliable model. The manual calibration is the most commonly used method where the user gradually modifies the parameter values until a satisfying agreement between simulated values and measure values is obtained. This method is limited since the task is time consuming and the quality of the adjustment depends on the user's experience.

Automatic calibration methods have been developed throughout the years to assist in the calibration task. The integration of these methods to the numerical model is a complex task since the architecture of each model is different.

O.P.P.S., an automatic calibration tool, has been developed to assist in the calibration task of river models. The tool combines PEST, an automatic calibration software that has the advantage of being independent from the model, to SRH-2D, a two-dimensional river flow model.

PEST (Parameter ESTimation) uses the Gauss-Marquardt-Levenberg algorithm, a non-linear parameter estimation method, to assume the task of calibration. The calibration is undertaken by reducing to a minimum the objective function which holds the differences between the measures values and the results given by the model. PEST has the advantage of being completely independent from the model but it does require a tedious preparation.

SRH-2D is a two dimensional hydraulic model for river systems based on the resolution of the dynamic wave equation. The flexible mesh allows the division of the river system into zones with different parameters.

The developed tool combines the two softwares by easing the preparation of the calibration process of PEST. O.P.P.S. reduces to a minimum the interaction with the user and can easily set-up and execute a calibration process of any river model based on SRH-2D. The user has to specify the Manning coefficient to calibrate and the observation values and O.P.P.S. will create the required files and links for the execution of PEST. The calibration process is made to be executed in the background to avoid interference.

The Ha! Ha! river model was used to test the tool. The model was built based on the topographic data measured after the failure of the Ha! Ha! lake dyke. The model is composed of five different reaches represented by distinct roughness coefficient.

Multiple calibration series were undertaken to study the variability of the calibration results with different configurations. The series of calibrations are carried out with different settings where the number of observation points, their position and their content varies in each series. The first series of calibration use a variable number of observation points with only the water depths and then the water velocities are added to the observations points. In the following calibration series, an error is introduced in the water depths and in the model discharge to compare the calibration results when only the water depth are used against the calibration results using the water depths and the water velocities.

Results show that at least one measured value is required for each reach to obtain satisfying calibration results. Reaches without any observation points cannot be calibrated, leaving the parameters at their starting values. By adding the measured water velocities to the observation points, better calibration results can be achieved with less observation points.

Finally, the results from the last calibration series showed that the addition of water velocities reduces the calibration error of the parameters when an error is introduced in the model data or in the measured water depths. When the calibration process adjusts the Manning's coefficient with a tendency to match the measured water velocities, the calibration error is decreased. Conversely, when the adjustment parameters are adjusted for a better fit of the water depths, the calibration error is greater.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT	VIII
TABLE DES MATIÈRES	X
LISTE DES FIGURES.....	XIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XVIII
LISTE DES ANNEXES	XIX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	4
2.1 Calibration manuelle	4
2.2 Méthodes de calibration automatique	5
2.3 Que calibre-t-on ?.....	7
2.4 Choix du critère de performance.....	9
2.5 Équifinalité	12
2.6 La méthode de calibration choisie.....	13
CHAPITRE 3 SYNTHÈSE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL.....	15
3.1 Logiciel SRH-2D.....	17
3.1.1 Fondement théorique de l'écoulement fluvial.....	17
3.1.2 Description du logiciel	18
3.2 Logiciel SMS.....	20
3.3 Logiciel PEST	20

3.3.1	Algorithme de PEST	23
3.3.2	Fondement théorique de l'algorithme de PEST	23
3.3.3	Description du logiciel PEST	26
3.4	Rivière Ha! Ha!, cas à l'étude	34
3.4.1	Séquentiel des simulations	36
3.5	Logiciel O.P.P.S	36
3.5.1	Interface graphique.....	37
3.6	Fonctionnalité.....	40
CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE		43
4.1	Calibration avec la hauteur d'eau.....	47
4.1.1	Points d'observation au centre des sections	48
4.1.2	Points d'observation aux frontières des sections.....	55
4.2	Calibration avec hauteur d'eau et vitesse	59
4.3	Étude de sensibilité – mesures de hauteur d'eau.....	64
4.3.1	Hauteur d'eau seulement.....	64
4.3.2	Hauteur d'eau et vitesse	68
4.4	Étude de sensibilité – Mesure de débit.....	73
CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....		79
BIBLIOGRAPHIE		82
ANNEXE A - ARTICLE 1: AUTOMATIC CALIBRATION OF RIVER REACH 2D SIMULATIONS BASED ON SRH-2D.....		85
ANNEXE B - RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ESSAIS DE CALIBRATION.....		113

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Valeurs originales des coefficients de Manning et valeurs des données observées47

Table A- 1 Original values of Manning coefficient and observation values96

LISTE DES FIGURES

Figure 3-1 Exemple de maillage où la densité des éléments est plus grande autour de la rivière et plus grossière sur les plaines inondables (Lai, 2008).....	19
Figure 3-2 Vecteur de progression u selon la méthode de PEST (Doherty, 2010).....	26
Figure 3-3 Progression en « dents-de-scie » (Doherty, 2010).....	26
Figure 3-4 Exemple d'un fichier d'entrée contenant les données du modèle (a) et un fichier gabarit (b)	28
Figure 3-5 Exemple d'un fichier de sortie contenant les valeurs simulées (a) et un exemple de fichier d'instruction (b)	30
Figure 3-6 Sections modélisées de la rivière Ha! Ha! au Saguenay (T. Mahdi & Marche, 2003)	36
Figure 3-7 Interface graphique de O.P.P.S. intégrée dans un classeur Excel.	38
Figure 3-8 Formulaires de saisie en vue de la préparation de l'optimisation (a) et formulaire de saisies du choix des matériaux (b).....	39
Figure 3-9 Formulaire de saisies du bouton " <i>Préparation de l'optimisation</i> " et fenêtre de choix des matériaux à soumettre à l'optimisation.....	39
Figure 3-10 Formulaire de saisies des paramètres avancées contrôlant les opérations de PEST. .	40
Figure 3-11 Schéma de procédure du processus de calibration	42
Figure 4-1 Discrétisation des différentes sections du modèle.....	46
Figure 4-2 Profil du modèle de la rivière	46
Figure 4-3 Résultats de la calibration utilisant 2 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)	49
Figure 4-4 Résultats de la calibration utilisant 3 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)	49
Figure 4-5 Résultats de la calibration utilisant 4 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)	50

Figure 4-6 Résultats de la calibration utilisant 5 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)	50
Figure 4-7 Différences de niveau entre les valeurs observées et les valeurs simulées – Hauteur d'eau seulement.....	51
Figure 4-8 Résultats de la calibration utilisant 2 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ ajustées)	53
Figure 4-9 Résultats de la calibration utilisant 3 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ ajustées)	54
Figure 4-10 Résultats de la calibration utilisant 4 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ ajustées).....	54
Figure 4-11 Résultats de la calibration utilisant 5 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ ajustées).....	55
Figure 4-12 Résultats de la calibration utilisant 2 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01).....	57
Figure 4-13 Résultats de la calibration utilisant 3 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01).....	57
Figure 4-14 Résultats de la calibration utilisant 4 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01).....	58
Figure 4-15 Résultats de la calibration utilisant 5 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01).....	58
Figure 4-16 Résultats de la calibration utilisant 6 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01).....	59
Figure 4-17 Résultats de la calibration utilisant 2 points d'observation	61
Figure 4-18 Résultats de la calibration utilisant 3 points d'observation	62
Figure 4-19 Résultats de la calibration utilisant 4 points d'observation	62
Figure 4-20 Résultats de la calibration utilisant 5 points d'observation	63

Figure 4-21 Différences de niveau entre les valeurs observées et les valeurs simulées – Hauteur d'eau et vitesse	63
Figure 4-22 Études de sensibilité - résultats des calibrations en utilisant les hauteurs d'eau seulement – Hauteur d'eau seulement.....	65
Figure 4-23 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 10 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau seulement	66
Figure 4-24 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 5 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau seulement	66
Figure 4-25 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 5 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau seulement	67
Figure 4-26 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 10 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau seulement	67
Figure 4-27 Études de sensibilité - résultats des calibrations en utilisant les hauteurs d'eau et les vitesses	69
Figure 4-29 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 10 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau et vitesse.....	70
Figure 4-28 Distributions de l'erreur relative du paramètre de calibration en fonction de l'ajustement des mesures fournies	70
Figure 4-30 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 5 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau et vitesse.....	71
Figure 4-31 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 5 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau et vitesse.....	71
Figure 4-32 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 10 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau et vitesse.....	72
Figure 4-33 Résultats des calibrations - étude de sensibilités sur le débit	74
Figure 4-34 Distributions de l'erreur relative du paramètre de calibration en fonction de l'ajustement des mesures fournies	74

Figure 4-35 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 20 % sur le débit entrant.....	75
Figure 4-36 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 15 % sur le débit entrant.....	75
Figure 4-37 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 10 % sur le débit entrant.....	76
Figure 4-38 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 5 % sur le débit entrant.....	76
Figure 4-39 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 20 % sur le débit entrant.....	77
Figure 4-40 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 15 % sur le débit entrant.....	77
Figure 4-41 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 10 % sur le débit entrant.....	78
Figure 4-42 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 5 % sur le débit entrant.....	78
Figure A-1 O.P.P.S. first form	91
Figure A-2 O.P.P.S. second form (left) and secondary form where the project material can be selected for optimisation (right)	92
Figure A-3 Advanced parameter forms for the adjustment of the variables controlling the optimisation process	93
Figure A-4 O.P.P.S. flow chart	94
Figure A-5 Ha!-Ha! river map and model overview.....	96
Figure A-6 Calibration results using water depths - 2 observation points	99
Figure A-7 Calibration results using water depths - 3 observation points	100
Figure A-8 Calibration results using water depths - 4 observation points	100

Figure A-9 Calibration results using water depths - 5 observation points	100
Figure A-10 Overall water depths differences between original values and calibrated results using 5 observation points	101
Figure A-11 Calibration results using water depths and water velocities - 2 observation points	102
Figure A-12 Calibration results using water depths - 3 observation points	103
Figure A-13 Calibration results using water depths - 4 observation points	103
Figure A-14 Calibration results using water depths - 5 observation points	103
Figure A-15 Overall water depths differences between original values and calibrated results using 5 observation points containing water depths and velocities	104
Figure A-16 Calibration sensitivity against measured water depths only.....	105
Figure A-18 Calibration error distribution of calculated water depth error and the summed error of calculated water velocities	107
Figure A-17 Calibration sensibility against measured water depths with additional information in the observation points.....	106
Figure A-19 Calibration sensitivity against model input flow using measured water depth and velocities.....	108
Figure A- 20 Calibration error distribution of calculated water depth error and the summed error of calculated water velocities	108

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

D.R. %	Différence relative (%)
H	Hauteur d'eau
m	mètres
N	Coefficient de Manning
Obs.	Valeur observée
Sim.	Valeur simulée
SRH-2D	Sedimentation and River Hydraulics – Two Dimensional
USBR	United States Bureau of Reclamation (Bureau des Réclamations des États-Unis)

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A ARTICLE 1: AUTOMATIC CALIBRATION OF RIVER REACH 2D SIMULATIONS BASED ON SRH-2D	85
ANNEXE B - RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ESSAIS DE CALIBRATION.....	113

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Depuis l'ère du numérique, les ingénieurs font continuellement appel à des modèles numériques à des fins de contrôle, de prévision, de gestion de risque ou de protection. En hydraulique, ces outils secondent l'ingénieur dans de différentes pratiques environnementales comme les prévisions d'inondation, le transport de contaminants ou la gestion du risque associée aux ouvrages hydrauliques. De façon générale, l'élaboration d'un modèle numérique est composée de quatre étapes distinctes: la construction du modèle, sa calibration, sa validation et son exploitation (Cunge, 2003).

Dans le cas d'un modèle de rivière l'étape de la construction consisterait à la synthèse des données physiques relevées sur le terrain vers le modèle numérique : l'implantation de la topographie, la discrétisation physique de la rivière, la définition des limites du modèle, la composition du lit de la rivière et des plaines inondables, etc. La calibration consiste en l'ajustement des paramètres qui régissent le comportement du modèle jusqu'à ce que les résultats fournis par celui-ci concordent avec les différentes mesures relevées sur le terrain. La calibration, aussi appelée calage, est nécessaire lorsque le modèle utilisé contient plusieurs variables ou paramètres qui ne sont pas directement mesurables sur le terrain (Kavetski et al., 2006; Li et al., 2012; Vidal et al., 2007). Il est aussi possible que des contraintes budgétaires ou physiques forcent les utilisateurs à s'en tenir à une estimation de plusieurs paramètres dans le modèle. Il sera de la tâche de l'utilisateur, à l'étape de la calibration, d'ajuster ces valeurs précédemment estimées. À l'étape de la validation, le modèle calibré est comparé avec des événements passés afin de juger de la qualité de son ajustement. Si les résultats simulés par le modèle à la suite de sa calibration sont assez près des observations enregistrées durant l'évènement, le modèle peut être exploité. Le présent travail porte sur l'étape de la calibration et la présentation d'un outil facilitant cette étape.

Bien que les modèles soient de plus en plus complexes, performants et outillés en ce qui concerne l'élaboration de l'environnement physique ou du traitement des données, les outils de calibration ont un retard monumental (Vidal et al., 2007). Il existe en effet un lot de fonctionnalités supplémentaires grandissant qui permet d'aider à la visualisation et au traitement de données, mais très peu d'ajouts sont faits afin d'encadrer l'utilisateur avec des conseils de saine pratique de calibration. Le manque à gagner vient probablement du fait qu'il n'existe pas de consensus sur la méthode de calibration à choisir. Différentes approches sont suggérées compte tenu du type de

problème, mais aussi du nombre de paramètres à calibrer ainsi que la qualité et la quantité des informations disponibles. Ce dernier point sera traité plus loin dans cette section.

À des fins de simplification de lecture, il est important de faire la distinction entre les valeurs mesurées et simulées. Les valeurs mesurées correspondent à des observations en laboratoire ou sur le terrain. Les valeurs simulées sont les résultats donnés par le modèle et ils sont ordinairement contenus dans des fichiers de sortie générés par le modèle numérique. Dans l'exercice de calibration, les valeurs simulées sont forcées à correspondre à leurs équivalents mesurés. Les mots « observations » ou « mesures » seront employés pour faire référence aux informations relevées sur le terrain et les valeurs données par les modèles seront identifiées comme « simulées ».

La méthode de calibration la plus courante consiste en un exercice de réglage manuel des paramètres. Par essai-erreur, l'utilisateur ajuste les paramètres et juge de la qualité des résultats simulés par le logiciel en comparant les valeurs calculées par celui-ci avec les valeurs observées. Tout dépendant de l'expérience de l'utilisateur, une bonne calibration peut ressortir de cet exercice, mais beaucoup de temps doit y être investi (Boyle et al., 2000; Kim et al., 2007; Madsen, 2000).

Ce projet de recherche porte sur le développement d'un outil facilitant la préparation d'un exercice de calibration automatique de n'importe quel modèle de rivière basé sur le logiciel d'hydraulique fluviale SRH-2D. SRH-2D permet de modéliser l'écoulement de l'eau et le transport des sédiments (Lai, 2008). Par l'utilisation d'un maillage hybride, SRH-2D permet la modélisation de l'écoulement de l'eau dans des systèmes complexes de rivières composés de multiples branches ou encore de différentes zones d'écoulement.

La calibration est menée par PEST, un logiciel d'optimisation indépendant du modèle numérique soumis au calage. PEST utilise l'algorithme de Gauss-Marquardt-Levenberg afin de minimiser une fonction objectif comprenant la différence entre les valeurs simulées et observées (Doherty, 2010). PEST prend le contrôle du modèle et communique avec lui directement à travers les fichiers d'entrée et de sortie lui donnant donc l'avantage d'être indépendant de l'architecture interne du modèle.

Le programme O.P.P.S. (Optimisation Program PEST SRH-2D) a été créé afin de faciliter l'initiation de la procédure de calibration. Il assure le lien entre PEST et SRH-2D en présentant une interface graphique où l'utilisateur n'a qu'à inscrire les données mesurées et à identifier les

paramètres à optimiser sans avoir à préparer les fichiers qui contiennent les instructions nécessaires à la calibration par PEST.

Ce mémoire est formé de 5 chapitres : le chapitre 1 présente l'introduction, le chapitre 2 présente la revue de la littérature, le chapitre 3 synthétise le travail accompli en présentant la méthodologie des simulations accomplies, les fonctionnalités de SRH-2D, le fonctionnement de PEST et l'utilisation de O.P.P.S. ainsi que la rivière modélisée. Le chapitre 4 présente et discute des résultats obtenus et le chapitre 5 offre une conclusion sur le travail accompli.

CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

L'utilisation intensive des modèles numériques est une pratique courante dans presque tous les domaines de l'ingénierie. Ces modèles sont utilisés à des fins de conception, de prédiction et de prévisions. L'utilisateur est donc en devoir de s'assurer que le modèle est ajusté correctement à la situation modélisée et que les résultats sont justes et fiables. La calibration des modèles est donc une étape critique, mais elle demande encore beaucoup de temps dans le processus de modélisation (Vidal et al., 2007). Cette étape reste encore problématique et il ne semble pas y avoir de consensus sur la méthodologie idéale à adopter. Afin d'optimiser les modèles, plusieurs procédures de calibration manuelle ou automatique ont été développées afin d'assister l'utilisateur dans cette tâche. En calibration automatique, on distingue deux approches différentes : la méthode globale et la méthode locale. La méthode globale est utilisée de façon plus régulière pour les modèles hydrologiques (Arnold et al., 2012; Duan, 1991; Gallagher & Doherty, 2007; Madsen, 2000) où l'on y retrouve un grand nombre de paramètres. La méthode locale a une présence plus marquée dans les modèles hydrodynamiques où le nombre de paramètres est réduit. Compte tenu des nombreuses variantes développées au cours des années pour ces deux différentes méthodes, aucune n'a été reconnue comme étant supérieure, mais plutôt mieux adaptée selon le cas traité.

Cette revue de littérature présente les différentes approches existantes dans le domaine de la calibration des modèles reliés au domaine de l'hydraulique et de l'hydrologie. Elle se concentrera principalement sur les modèles de rivières et les différentes approches de calibration expérimentées dans les études antérieures. Le survol de l'état de l'art permettra aussi de justifier le choix de l'approche d'optimisation dans le développement de l'outil mis de l'avant dans la présente étude.

2.1 Calibration manuelle

Dans l'univers de la modélisation, la calibration est une tâche essentielle, mais ardue. La méthode la plus accessible est sans doute la calibration manuelle parce qu'elle reste simple dans la mesure où l'utilisateur n'a qu'à modifier les paramètres du modèle à travers l'interface du logiciel, exécuter les simulations et comparer les résultats obtenus avec les données d'observations. Il est alors possible de juger de la qualité de l'ajustement en comparant visuellement ou numériquement les résultats du modèle et les observations (Madsen, 2000; Vidal et al., 2007).

Le temps requis afin d'obtenir satisfaction dépendra de l'expérience et de la familiarité de l'utilisateur avec le modèle ainsi que son expérience en la matière. La justesse de la calibration dépendra de la qualité de l'ajustement recherchée par l'utilisateur ou demandée par le cas traité.

La calibration manuelle reste exigeante sur le plan du temps et des ressources, surtout pour un utilisateur inexpérimenté. De plus, le jugement de la qualité de l'ajustement est une tâche très subjective et dépendra de la personne qui l'accomplit. Dans des cas où plusieurs paramètres variables sont utilisés, il est difficile de savoir si la solution retenue est la plus appropriée. Plus le nombre de paramètres augmente, plus il y aura de combinaison de paramètres presque aussi performantes les unes que les autres. C'est ce qui a été mis en évidence par Pappenberger (2005) lors de la calibration des coefficients de Manning d'un modèle de rivière basé sur le logiciel HEC-RAS. En tentant de représenter l'hétérogénéité de la rivière en multipliant les coefficients de Manning du modèle, un large spectre de valeurs de coefficient des plaines inondables et du lit de rivière est identifié comme ayant des solutions aussi bonnes les unes que les autres. Il est donc difficile de spéculer sur le niveau de confiance du modèle puisque le résultat d'une calibration manuelle variera d'un utilisateur à l'autre (Kim et al., 2007).

2.2 Méthodes de calibration automatique

Étant donné la difficulté de la calibration manuelle, plusieurs ont développé des méthodes de calibration automatique. Ces méthodes se basent sur une fonction objectif qui mesure la différence entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Cette dernière est réduite à son minimum à l'aide d'un algorithme qui ajuste progressivement la valeur des paramètres. L'algorithme a pour but de réduire la fonction objectif, et donc d'améliorer la similitude entre les valeurs simulées et mesurées, jusqu'à la satisfaction d'un critère d'arrêt.

Les méthodes de calibration automatique sont généralement plus faciles à utiliser et sont beaucoup plus rapides que les méthodes manuelles. Une calibration automatique permet d'enchaîner un grand nombre de simulations l'une à la suite de l'autre afin de progresser vers une solution avec l'assistance d'un algorithme décisionnel qui ajuste progressivement la valeur des paramètres. Ceci permet de générer un plus grand nombre d'observations en un temps plus court que la calibration manuelle. Cette affirmation est encore plus vraie dans les cas où un très grand nombre de paramètres sont ciblés comme étant variables. Une procédure de calibration automatique avec un

algorithme d'optimisation robuste donnera des résultats équivalents ou meilleurs qu'une calibration manuelle (Kim et al., 2007; Li et al., 2012). Parmi les méthodes de calibration automatique, il existe plusieurs méthodes que l'on peut présenter sous deux types de procédures distinctes, soit la méthode globale et la méthode locale.

La méthode d'optimisation locale, par exemple la méthode de Gauss-Marquardt-Levenberg, évolue graduellement dans un espace défini, d'une solution voisine à une autre. Cette méthode possède un point de départ défini et l'algorithme guide l'évolution des paramètres vers la prochaine solution qui offre la plus grande réduction de la fonction objectif. Cette méthode est la moins exigeante en ce qui concerne les ressources de calcul, car elle exécutera moins de simulations avant de réussir à minimiser la fonction objectif. Le risque de l'utilisation de cette méthode est l'emprisonnement dans un minimum local. La forme non linéaire de la fonction objectif complique l'atteinte du minimum global par ses multiples sommets, ses formes curvilignes et son paysage complexe (Kavetski et al., 2006). Il est donc possible que la solution converge vers différentes réponses selon le point de départ donné aux paramètres. La méthode locale est donc beaucoup plus sensible à la forme et les discontinuités de la fonction objectif à l'étude (Fabio et al., 2010). Une première estimation convenable de la valeur de départ des paramètres aide à éviter de coincer l'optimisation dans un minimum local. Il est toutefois possible de vérifier si une solution résultante de la calibration est un minimum local en comparant les résultats de deux calibrations ayant des valeurs de départ distantes. Par exemple, si les résultats de deux calibrations différentes ayant des points de départ (valeurs extrêmes des paramètres de calibration) éloignés sont similaires, il est possible de croire qu'il ne s'agit pas d'un minimum local, mais bien du minimum global de la fonction objectif.

La méthode globale quant à elle cherche une solution optimale en évoluant avec des ensembles de paramètres générés de façon aléatoire en mesurant la fonction objectif à chaque essai. La méthode globale couvre une étendue beaucoup plus vaste de la fonction objectif afin de pouvoir en dresser un portrait complet. Cette méthode est plus exigeante sur le plan des ressources informatiques puisqu'elle peut nécessiter des milliers de simulations. Contrairement à la méthode locale, l'approche globale telle que le « Shuffled Complex Evolution » (SCE) (Duan et al., 1992) ou le « Generalized Likelihood Uncertainty Estimation » (GLUE) (Beven & Binley, 1992) sont des méthodes robustes dans leur recherche du minimum global de la fonction objectif.

De sa nature, la méthode globale doit étudier l'espace des paramètres plus largement afin de pouvoir déterminer la meilleure solution. Étant donné que les combinaisons de paramètres mis à l'épreuve sont générées de façon aléatoire ou semi-aléatoire, un très grand nombre de simulations doit être fait. Dans le cas de la modélisation de l'écoulement en rivière dans un modèle en deux dimensions, l'application de la méthode globale serait probablement inappropriée compte tenu du temps de calcul requis par simulation. Les modèles de rivière en deux dimensions prennent plusieurs minutes et même des heures à s'exécuter, selon la complexité du modèle, de la durée de l'évènement simulé et de la précision du maillage. La méthode globale est donc trop exigeante en matière de temps de calcul pour les modèles de rivières. La méthode locale est plus appropriée puisqu'elle exige un nombre moindre de simulations. La méthode globale est très populaire dans les applications hydrologiques où le nombre de paramètres à calibrer est très élevé et où les simulations sont relativement courtes. Dans ces situations, la forme de la fonction objectif serait possiblement trop complexe pour une recherche locale. Puisque les modèles de calcul hydrodynamiques 2D sont beaucoup plus exigeants en matière de ressources numériques, une méthode de calibration globale est le seul choix envisageable si la calibration veut être accomplie dans délai raisonnable.

2.3 Que calibre-t-on ?

En hydraulique des rivières, comme dans bien d'autres cas, on cherche à calibrer les paramètres qui ne se mesurent pas directement. C'est un point crucial dans la modélisation : certains des paramètres qui ont une grande influence sur le comportement du modèle sont impossibles ou très difficiles à mesurer (Cunge, 2003). Considérant que les modèles sont utilisés à des fins de prévisions et de décisions, le phénomène physique simulé doit non seulement être représenté de la façon la plus juste possible, mais les paramètres utilisés se doivent d'être ajustés de façon à produire des résultats acceptables. Sans une approximation adéquate de ces paramètres, le modèle donnera des prévisions erronées, peu importe la robustesse de son fonctionnement interne.

Parmi les paramètres les plus communs, on y retrouve le coefficient de rugosité de la rivière et des plaines inondables, la schématisation de la végétation, les coefficients associés aux structures hydrauliques, les pertes de charge locales et la géométrie de la rivière. Plus d'une étude place le coefficient de rugosité comme étant le paramètre le plus influent dans les modèles.

Interrogé sur l'ordre d'importance des incertitudes amenées par les paramètres d'un modèle d'écoulement (Warmick et al., 2010), un groupe d'experts a identifié, après le débit entrant dans le modèle, le coefficient de rugosité du canal principal comme étant le facteur le plus influent dans les applications basé sur l'étude du niveau d'eau. S'en suivent ensuite les coefficients associés aux structures hydrauliques, la rugosité associée aux plaines inondables ainsi que sa schématisation.

Plusieurs autres aussi placent le coefficient de Manning comme étant le facteur étant le plus problématique dans la calibration (F Pappenberger et al., 2005; Vidal et al., 2007). Dans son étude de sensibilité, Hall (2005) démontre bien que la variation du coefficient de Manning a le plus d'influence sur la performance globale du modèle, devant la largeur du canal, l'élévation du fond et des plaines ainsi que le débit entrant. L'auteur démontre que la valeur du coefficient de rugosité est la cause principale de la variation du critère de performance globale dans la calibration du modèle.

L'expérience cumulée au travers des années permet d'estimer la valeur du coefficient de Manning de plusieurs façons. Il est possible d'estimer le coefficient de rugosité de la rivière en calculant la perte d'énergie en suivant une méthode développée par l'Institut d'Études Géologiques des États-Unis (USGS) (Dalrymple & Benson, 1967). Pour une estimation plus rapide sans le besoin de faire des relevés intenses, une autre méthode consiste à estimer le paramètre en analysant certaines caractéristiques ou composantes de la rivière. En observant les tronçons de la rivière étudiée, il est possible de les comparer visuellement avec des rivières déjà répertoriées ou d'utiliser des tables de référence permettant des associations qualitatives selon la composition de la rivière. Il existe effectivement des banques de données exhaustives sous forme d'images ou de tableaux de valeurs. Plusieurs équations ont aussi été développées afin de produire une évaluation appréciable de la rugosité de lit d'une rivière en se basant sur le diamètre des sédiments. Le coefficient de rugosité a été largement documenté et un utilisateur d'expérience serait capable de faire une première estimation du coefficient de rugosité qui soit raisonnablement bonne.

Bien que le coefficient de rugosité soit un sujet largement documenté, il doit être calibré avec prudence. Le coefficient de rugosité est souvent le seul paramètre variable dans les modèles de rivière et il doit compenser pour toutes les suppositions du modèle : interpolation ou imprécision de la géométrie de la rivière, profondeur moyenne simulée, simplification des structures hydrauliques, limitation des équations de résolution, etc. (Fabio et al., 2010). L'exercice de

calibration ne doit pas se résoudre à la recherche des paramètres qui satisfont la qualité de la correspondance du modèle et des observations sans se soucier du réalisme de la solution.

Les paramètres mentionnés précédemment sont dits continus, car ils peuvent être exprimés sous un nombre infini de valeurs dans une certaine limite. Ces valeurs se retrouveront normalement sous une forme numérique dans les fichiers d'entrée du modèle. Ces fichiers, qui ont une architecture unique relative au logiciel utilisé, contiennent généralement toutes les caractéristiques du modèle ainsi que les informations relatives à l'exécution et au fonctionnement de celui-ci. On y retrouve également les paramètres discontinus qui se présentent comme des valeurs entières. Par exemple, le choix des équations utilisées dans la résolution de la solution hydrodynamique se présenterait sous un nombre entier associé à une méthode de résolution en particulier. Dans certains cas, il serait avantageux de calibrer en fonction des paramètres discontinus du modèle. Seulement, les paramètres discontinus peuvent amener des irrégularités considérables dans la fonction objectif (Kavetski et al., 2006). De plus, d'un point de vue numérique, les paramètres discontinus causent un problème de compatibilité avec les algorithmes de calibration qui requièrent une continuité dans l'évolution de la fonction objectif en réponse à la modification des paramètres de calibration. Pour ces raisons, il est très difficile d'inclure les paramètres discontinus dans les algorithmes de calibration. McKibbin et Mahdi (2010) ont réussi à contourner cette difficulté en développant un outil de calibration basé sur le logiciel hydrosédimentaire MHYSER (T.-F. Mahdi, 2009). L'outil mis au point permet à la fois la calibration des paramètres continus et des paramètres discontinus. Le logiciel de calibration PEST optimise les paramètres continus et un second algorithme indépendant met à l'épreuve les paramètres discontinus choisis par l'utilisateur. Le logiciel à l'avantage de tester de façon automatique un plus grand nombre de paramètres.

2.4 Choix du critère de performance

Afin de juger de la qualité de la calibration, un indice de performance doit être utilisé afin de suivre la progression de la calibration. Avec une concordance parfaite entre les valeurs simulées et celles observées, la calibration s'arrêterait ici. Dans le cas contraire, il est essentiel de pouvoir chiffrer la performance du modèle avec la configuration testée. C'est justement avec cet indice que l'utilisateur saura différencier une « bonne » configuration d'une « mauvaise ». C'est principalement le rôle de la fonction objectif : communiquer la performance du modèle selon la configuration en cours. On cherche à minimiser la fonction objectif ou à la maximiser selon ce

qu'elle représente. Généralement, les critères de performance dans les modèles hydrodynamique se basent sur des mesures ponctuelles ou des mesures qui reflètent la performance du modèle dans son ensemble.

Les mesures ponctuelles peuvent aussi bien être des mesures d'élévation d'eau, de hauteur d'eau, de vitesse, de débit ou toutes autres mesures ponctuelles dans une rivière. On juge de la qualité de l'ajustement en calculant l'erreur moyenne entre les observations et les mesures données par le logiciel de modélisation.

Les mesures de performance dites globales portent un regard sur l'ensemble du modèle afin de juger de la qualité de l'ajustement. Par exemple, l'information spatiale décrivant l'étendue d'une inondation sert d'indice de comparaison entre les résultats d'un modèle simulant l'évènement. Cette mesure de performance globale consiste à comparer le nombre de cellules inondées (ou mouillées) et le nombre de cellules qui sont restées sèches dans le modèle en comparaison avec l'étendue réelle de l'inondation. Un code binaire est utilisé afin de déclarer si une cellule est à la fois inondée dans le modèle et dans les observations de l'étendue de l'inondation (Aronica et al., 2002). En comparant chacune des cellules entre elles, on réduit la performance du modèle en un seul indice de performance.

Il est possible de calibrer le modèle à la fois avec des mesures ponctuelles en rivière et des mesures de performance globale. Il serait intuitif de croire que les résultats découlant d'une calibration basée sur une performance globale devraient être sensiblement les mêmes que ceux obtenus par une méthode locale. Pappenberger (2007) a soulevé que le choix du critère de performance influence les prédictions du modèle. Un ensemble de paramètres retenus comme étant optimaux sous une calibration globale risque de différer de ceux obtenus par une calibration locale. Dans son approche, la méthode globale demande de connaître et d'être capable de chiffrer l'étendue réelle de l'inondation. Ce genre d'information est souvent étendue aléatoirement sur le territoire et la précision en est très variable « autant sur le plan de la couverture spatiale et temporelle ». Une calibration faite par le biais d'une performance globale ne tient pas en compte que la modélisation d'un écoulement est un phénomène aussi global que local. Il serait donc possible d'avoir une mauvaise estimation autour de certaines zones d'intérêt dans le modèle tout en ayant quand même une performance générale acceptable. Le résultat d'une calibration sera donc différent compte tenu de la façon dont on chiffre la performance du modèle.

La fonction d'un modèle de rivière étant couramment d'étudier l'effet local de l'eau, il est probablement préférable d'utiliser un critère de performance local. C'est ce qu'a reconnu Fabio (2010) dans son étude de calibration. L'auteur s'est servi de l'outil de calibration PEST afin de reproduire l'inondation de la rivière Mulde en 2002 en se basant sur des observations ponctuelles d'hauteur d'eau. Dans le cas étudié, la topographie modélisée représentait une plaine délimitée par un terrain très escarpé. L'utilisation d'un critère de performance global lors de la calibration serait inappropriée compte tenu de la morphologie du terrain modélisé, la profondeur d'eau peut augmenter de plusieurs mètres sans avoir un impact considérable sur l'étendue de l'inondation. Donc des variations importantes des paramètres de calibration n'amèneraient pas de changements significatifs dans l'étendue de l'inondation. Par conséquent, plusieurs configurations différentes de paramètres auraient un indice de performance semblable. Ce manque de précision à l'échelle locale justifie l'utilisation d'un critère de performance basé sur des mesures ponctuelles.

Dans cette même étude, l'auteur calibre plusieurs paramètres de rugosité dans l'étendue de l'inondation de la rivière. Plusieurs scénarios sont mis à l'épreuve en augmentant graduellement le nombre de paramètres variables. On se rend compte que plus il y a de paramètres à calibrer, plus l'intervalle de confiance du paramètre augmente, rendant la prévision plus incertaine. Par le fait même, on augmente le risque d'équifinalité où plusieurs combinaisons de paramètres pourraient satisfaire les observations. (F Pappenberger et al., 2005) a observé le même phénomène dans son étude sur l'incertitude reliée à la calibration des coefficients de rugosité dans le logiciel HEC-RAS. Afin d'augmenter la qualité de son optimisation et de tempérer le problème d'équifinalité, l'auteur a réduit le nombre de points d'observations en éliminant les points montrant le plus d'incohérences à travers les différents essais de calibration. S'en suivent une augmentation significative de la qualité de la calibration et une diminution de l'incertitude face au choix des paramètres. L'étude démontre que la performance de la calibration augmente avec la qualité des données utilisées. Un plus grand nombre d'observations ne certifie donc pas nécessairement une meilleure calibration surtout si la précision des données diminue avec la quantité.

Il a été observé que l'utilisation de mesures ponctuelles réduit l'incertitude des solutions amenées par la calibration (Werner et al., 2005). La comparaison des deux indices de performance montre que les incertitudes sont moindres lorsque l'on juge de la qualité de l'ajustement en se basant sur des mesures ponctuelles plutôt que sur un indice global. La combinaison des deux n'amène pas un apport significatif dans la réduction des incertitudes.

Dans le cas de PEST (Doherty, 2010), la fonction objectif est basée sur les différences entre les valeurs simulées et les valeurs observées. PEST se sert d'un algorithme qui ajuste les paramètres du modèle de manière à réduire la fonction objectif à son minimum. Par son approche unique, PEST peut aussi bien rassembler des mesures ponctuelles que des indices de performances globales dans sa fonction objectif.

2.5 Équifinalité

Il est bien reconnu que la calibration des modèles hydrauliques et hydrologiques peut mener à plusieurs configurations différentes des paramètres reproduisant les valeurs observées. Ce problème d'équifinalité (Beven & Freer, 2001) ajoute à l'incertitude de l'étape de la calibration et oblige l'utilisateur à la vigilance face aux résultats. Bien qu'une solution satisfasse les valeurs observées dans un scénario particulier, à un moment ou un endroit précis, il n'est pas certain que ce même jeu de paramètre produise de bons résultats dans des conditions différentes. De plus, il est possible qu'une autre configuration donne d'aussi bons résultats. Il devient donc de la responsabilité de l'utilisateur de choisir la solution la plus adaptée selon le contexte et d'exploiter le modèle calibré avec certaines limites. Bien qu'il s'agisse de calibration automatique, le bon jugement et l'expérience de l'utilisateur sont un outil supplémentaire aux bonnes pratiques de modélisation. Sans un bagage adéquat en calibration et sans une certaine habitude avec le logiciel utilisé, le modèle pourrait se voir attribuer des propriétés le rendant inapte à faire des prévisions fiables.

Le problème de l'équifinalité est en partie causé par l'évaluation de la qualité de la calibration par une fonction objectif unique. Afin de contrer ce problème, des méthodes de calibration se basant sur des objectifs multiples furent mises de l'avant, notamment par Madsen (2000). Plutôt que de se fier à un seul indice de performance, plusieurs aspects peuvent être mesurés afin d'avoir une vue d'ensemble plus globale sur le niveau de satisfaction du modèle. Un exemple courant provient de la calibration des modèles hydrologiques. Il est commun de calibrer l'hydrogramme de sortie d'un modèle d'un bassin versant en fonction des données historiques récoltées à l'embouchure du site. Connaissant les conditions météorologiques du bassin versant donné, les paramètres physiques du modèle sont ajustés jusqu'à ce que le comportement de l'hydrogramme de sortie simulé présente des données similaires à ce qui a été mesuré. Cette situation mène à un comportement du modèle très semblable à la réalité, mais mène à de grandes difficultés à reproduire les événements extrêmes.

Dans un cas où le modèle serait utilisé à des fins de prédictions pour des événements dépassant ce qui a été utilisé pour la calibration, l'ajustement serait probablement inadéquat. Le modèle arrivera quand même à une solution, mais il est difficile de déterminer s'il s'agit d'une prédiction valide.

Dans des scénarios de calibration à objectifs multiples, on propose de baser la qualité de l'ajustement sur plusieurs critères différents. Par exemple, en plus de mesurer la similarité des hydrogrammes de sorties, Madsen (2000) propose aussi de mesurer la balance de masse, les débits de pointes ainsi que les débits faibles. De cette façon, la qualité de la calibration peut se rapporter sur différents facteurs. D'autres, comme Rode (2007), ont utilisé deux fonctions objectif ou plus afin de juger de la qualité de l'ajustement.

2.6 La méthode de calibration choisie

La calibration est une étape clé permettant d'augmenter le niveau de confiance des données du modèle utilisé. Plusieurs méthodes de calibration différentes se présentent et un choix éclairé doit être fait autant sur l'algorithme de calibration que sur le critère de performance.

Dans la présente étude, le logiciel de calibration automatique PEST est intégré au modèle hydrodynamique SRH-2D. Le résultat de la combinaison des deux logiciels, PEST et SRH-2D, est une interface graphique se nommant « Optimization Program for PEST & SRH-2D » (O.P.P.S.). O.P.P.S. simplifie l'exécution de la calibration en exigeant un minimum de manipulation de la part de l'utilisateur. Bien que PEST soit complètement indépendant du logiciel de modélisation et que son intégration soit plus simple que d'autres logiciels, O.P.P.S. assure d'avance la communication des informations nécessaires afin de mener à terme un exercice de calibration.

Le logiciel développé est donc une innovation en comparaison avec les méthodes traditionnelles de calibration manuelle. De plus, PEST utilise l'algorithme de Gauss-Marquardt-Levenberg, une méthode locale basée sur le gradient de la fonction objectif afin de trouver la descente la plus rapide de la fonction objectif. Comme il en a été discuté précédemment, la méthode locale est plus adéquate pour la calibration des modèles hydrodynamiques. L'outil calibre les coefficients de rugosité du modèle en se basant sur les mesures ponctuelles fournies par l'utilisateur. Ayant fait ses preuves avec plusieurs types de modèles différents, PEST est considéré comme étant le plus performant parmi les outils qui emploient la méthode de calibration locale (Doherty, 2010).

PEST est notamment inclus dans avec le logiciel de simulation du ruissellement de surface et d'écoulement sous-terrain GMS de la suite de modélisation de Aquaveo. PEST est directement intégré à l'interface graphique de GMS, facilitant la calibration des paramètres du modèle.

CHAPITRE 3 SYNTHÈSE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL

Le travail accompli consiste en la conception d'un outil de calibration muni d'une interface graphique facile d'utilisation permettant la calibration de modèles de rivières basés sur SRH-2D avec l'outil de calibration PEST. L'interface graphique a pour objectif d'assister dans tout le processus, de la préparation des fichiers nécessaires à l'exécution de la calibration, jusqu'à la visualisation des résultats. Une fois l'interface bâtie, plusieurs séries de simulations ont été lancées selon différents scénarios.

L'étude porte sur la calibration d'un modèle de la rivière Ha! Ha! après l'inondation particulièrement sévère subie en 1996 (Capart et al., 2007). Le modèle de la rivière est long de 15 km et est divisé en cinq régions distinctes caractérisées par des coefficients de Manning différents.

Afin de calibrer le modèle, PEST se base sur l'évolution d'une fonction objectif qui se traduit en un indice de performance de l'ajustement. Dans le cas de cette étude, la fonction objectif renferme la différence entre les valeurs mesurées et les valeurs simulées à des points distincts dans le modèle de la rivière. Ces points d'observations contiennent des mesures de hauteur d'eau ainsi que des mesures de vitesse.

Les mesures de hauteur d'eau et de vitesse d'écoulement des points d'observation ont été générées par une première simulation avec des coefficients de Manning originaux. Cette première simulation a donc permis d'établir les conditions originales d'écoulement et les résultats découlant de celle-ci sont utilisés dans le processus de calibration par le biais d'un point d'observation par section. Tous les paramètres de calcul (temps de simulation, pas de temps, etc.) ainsi que les paramètres de l'écoulement sont restés les mêmes à l'exception bien sur des coefficients des Manning. La toute première itération d'un essai de calibration s'initialise avec la solution finale de la simulation originale en employant des valeurs de coefficient de Manning décalé des valeurs originales. Avec les points d'observations contenant différentes mesures simulées lors de la configuration initiale, les séries de calibration mentionnée plus haut auront donc toutes l'objectif de retrouver ces conditions d'écoulement originales.

En premier lieu, plusieurs essais de calibration ont été menés avec différentes configurations de calibration. La répartition des points d'observation ainsi que les mesures associées à ces points diffère d'une calibration à l'autre suivant un ordre établi afin de juger de l'influence de ces

variations sur la qualité de l'ajustement. En utilisant les coefficients de rugosité comme variable à calibrer, plusieurs séries de simulations ont été lancées afin de tester l'efficacité de la méthode de calibration. L'objectif est de documenter la qualité de l'ajustement selon les différentes configurations.

La première série de calibration utilise un nombre croissant de points d'observation et se limite à l'utilisation de la hauteur d'eau comme information de correspondance entre le modèle et les mesures observées. Ces points sont situés au centre des différentes régions. Cette partie de l'étude cherche à établir la quantité d'information nécessaire afin d'obtenir un niveau de confiance acceptable face à la calibration du modèle.

Une deuxième série de calibration, utilisant la même méthodologie que la première, est accomplie avec les points d'observation situés aux frontières des différentes régions de la rivière plutôt qu'au centre de la section. Comme la première série de calibration, on s'intéresse à l'influence du nombre de points d'observation sur la qualité de l'ajustement. Cependant, contrairement à la situation précédente, les points sont localisés différemment afin de déterminer l'effet de la position des points d'observation sur la qualité de la calibration.

Suivant cet exercice, d'autres mesures sont ajoutées aux points d'observations. En plus de la hauteur d'eau, les différents points d'observations contiennent les deux composantes de la vitesse (direction X et Y) ainsi que le module des composantes. De la même manière que les séries de calibrations précédentes, un nombre croissant de points est utilisé. Le but est de quantifier la qualité de l'ajustement en fonction du nombre de points d'observation utilisés suite à l'ajout d'informations supplémentaires.

En second lieu, une étude de sensibilité est aussi accomplie sur les coefficients de Manning en modifiant les mesures de hauteur d'eau puis les mesures de débit en second lieu. Le processus de calibration est repris en introduisant une erreur dans la mesure de hauteur d'eau fournie afin de mesurer l'impact sur les résultats de la calibration. L'exercice est répété en introduisant, cette fois-ci, une erreur sur le débit plutôt que sur la hauteur d'eau.

Le coefficient de Manning étant le paramètre le plus influant sur les données de hauteur d'eau simulées par le modèle, il est possible de croire que des points d'observation contenant des mesures erronées pourraient avoir un impact sur le résultat de la calibration. Plusieurs autres simulations

ont donc permis de comprendre l'influence des mesures erronées sur le résultat de la calibration des coefficients de Manning. Premièrement, une erreur sur les hauteurs d'eau mesurées a été imposée sur les points d'observations ne contenant que la hauteur d'eau comme information utile à la calibration. Deuxièmement, une erreur a été imposée sur la hauteur d'eau alors que les points d'observations contiennent aussi les mesures de vitesses. Aucune erreur n'est introduite dans les mesures de vitesse. L'objectif est de vérifier si la présence d'information additionnelle aux points d'observations permet de réduire l'impact négatif que pourraient potentiellement avoir des mesures imprécises de hauteur d'eau. Finalement, un troisième scénario a été accompli en imposant une erreur sur le débit. Huit simulations sont faites en augmentant et en réduisant le débit entrant de 20%, 15%, 10% et 5%. Les points d'observation utilisés dans ce scénario contiennent à la fois les hauteurs d'eau et les vitesses d'écoulement. Face à ces scénarios, les variations du coefficient de Manning sont observées pour être comparées avec les valeurs obtenues dans les cas où aucune erreur n'était introduite dans les données.

Les sections suivantes décrivent le fonctionnement du logiciel de modélisation SRH-2D, le logiciel de visualisation graphique SMS ainsi que le logiciel de calibration PEST. S'en suit la présentation de l'interface graphique développée liant les logiciels PEST et SRH-2D.

3.1 Logiciel SRH-2D

SRH-2D (Lai, 2008) est un logiciel hydrodynamique capable de modéliser des systèmes de rivières et le transport des sédiments. Développé au « *Bureau of Reclamation* » aux États-Unis (USBR), le modèle est conçu pour simuler l'écoulement de l'eau dans plusieurs canaux à la fois, des plaines inondables, des lieux de végétation ainsi que dans les structures hydrauliques. Le logiciel résout les équations de St.-Venant dans un maillage flexible capable de contenir des éléments triangulaires et quadrilatères. SRH-2D a été développé dans l'optique de conduire les simulations à une solution dans un délai raisonnable sans être trop complexe à utiliser.

3.1.1 Fondement théorique de l'écoulement fluvial

SRH-2D utilise les équations de St. Venant, résolues par volume fini avec un schéma implicite, afin de modéliser l'écoulement de l'eau.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU}{\partial x} + \frac{\partial hV}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial hU}{\partial t} + \frac{\partial hUU}{\partial x} + \frac{\partial hVU}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{xy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + D_{xx} + D_{xy}$$

$$\frac{\partial hV}{\partial t} + \frac{\partial hUV}{\partial x} + \frac{\partial hVV}{\partial y} = \frac{\partial hT_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial hT_{yy}}{\partial y} - gh \frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + D_{yx} + D_{yy}$$

Dans les équations présentées, t est le temps, x et y sont les coordonnées horizontales et verticales, h est la profondeur d'eau, U et V sont les vitesses moyennes dans les directions de x et y , g est l'accélération gravitationnelle, T_{xx} , T_{xy} et T_{yy} sont les efforts de turbulence moyens, D_{xx} , D_{xy} , D_{yx} et D_{yy} sont les termes de dispersion, z est l'élévation de la surface de l'eau, ρ est la densité de l'eau et τ_{bx} , τ_{by} sont les efforts de cisaillement sur le lit de la rivière. La friction appliquée sur le lit de la rivière est calculée par :

$$\begin{pmatrix} \tau_{bx} \\ \tau_{by} \end{pmatrix} = \rho C_f \begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} \sqrt{U^2 + V^2}$$

$$C_f = \frac{gn^2}{h^{1/3}}$$

Où n est le coefficient de Manning. La turbulence est calculée avec les équations de Boussinesq.

3.1.2 Description du logiciel

Le logiciel SRH-2D est conçu pour facilement diviser les différentes sections d'une rivière en des sections distinctes pouvant être maillées différemment. Le modèle de rivière peut donc être facilement délimité selon la topographie, la végétation, la morphologie ou l'occupation du sol en se servant d'une stratégie de maillage flexible. La figure 3-1 montre un exemple de l'utilisation du maillage flexible.

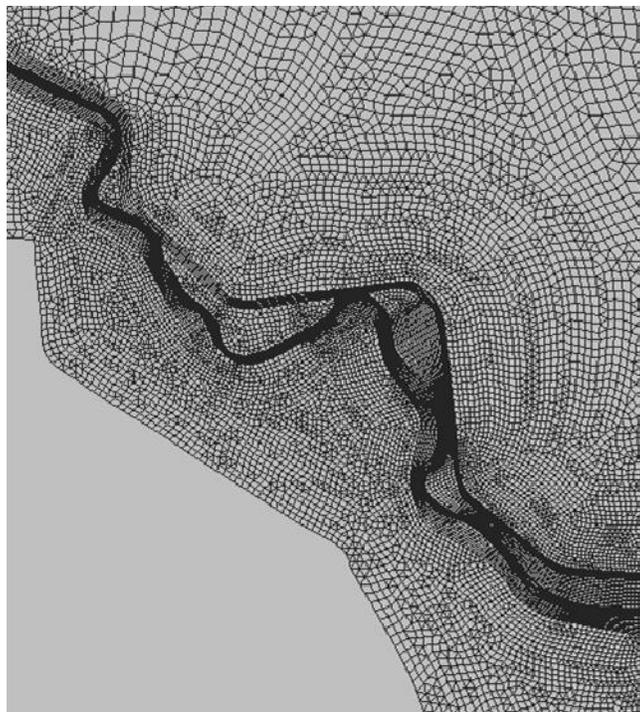


Figure 3-1 Exemple de maillage où la densité des éléments est plus grande autour de la rivière et plus grossière sur les plaines inondables (Lai, 2008).

SRH2-D est entre autres conçu pour résoudre les équations de propagation d'une onde dynamique, pour les différents régimes d'écoulement, dans un régime permanent ou non-permanent. Le maillage hybride permet une structure d'éléments triangulaires, d'éléments quadrilatères ou une combinaison des deux. SRH-2D est particulièrement efficace dans les cas où l'effet 2D est important à prendre en compte comme dans les courbures des rivières, les sections avec plusieurs tronçons ou autour des structures hydrauliques.

Le logiciel calcule l'élévation de la nappe d'eau, la profondeur d'eau moyenne, les composantes de vitesses moyennes à chaque point du maillage ou au centre des éléments. Le nombre de Froude ainsi que le cisaillement au lit de la rivière sont aussi calculés.

SRH-2D est composé de deux logiciels : *srhpre* et *srh2d*. Le premier est une interface graphique interactive qui synthétise les composantes et les paramètres du modèle afin qu'il puisse être lu par le solveur *srh2d*, le deuxième logiciel. Celui-ci est le logiciel de calcul principal qui interprète les intrants fournis par *srhpre*, exécute la simulation et rend la solution sous le format choisi.

SRH-2D offre trois conditions de départ au moment de l'initiation de la simulation. La première option amorce l'écoulement avec un domaine complètement sec. La deuxième option débute avec une certaine élévation d'eau sur le domaine. La troisième permet de démarrer la simulation avec des conditions initiales correspondantes avec la fin d'une simulation précédente.

3.2 Logiciel SMS

Le logiciel SMS (Aquaveo, 2013) est une interface graphique développée par Aquaveo permettant de construire et d'exploiter des modèles d'écoulement à surface libre en plus de permettre à l'utilisateur de visualiser, de manipuler et d'analyser les résultats des simulations. SMS permet notamment le développement de modèles numériques de rivière, de côtes, d'estuaires, de lacs, etc. Mis à part SRH-2D, cette plateforme graphique est l'hôte de plusieurs logiciels de modélisation comme BOUSS-2D, CGWAVE, FESWMS et TUFLOW pour n'en nommer que quelques-uns.

3.3 Logiciel PEST

Dans cette section, on suit Doherty (2010) afin de décrire le logiciel de calibration. Étant donné que ce logiciel n'est pas aussi bien connu par les hydrauliciens, le fonctionnement est assez détaillé afin de garder ce mémoire complet.

Afin d'en venir à une solution, le modèle a besoin de certains types de données : les données fixes, les données de contrôle, les excitations, et les paramètres (Doherty, 2010). Dans le cas d'un modèle d'hydraulique fluviale, ces différentes données sont essentielles à la résolution de la simulation de l'écoulement. Les données fixes composent l'environnement et les limites du modèle, ses structures et ses composantes. Les données de contrôle dirigent la méthode de résolution du système d'équations du modèle en dictant l'ordre logique de progression. Dans cette catégorie, on peut penser au maillage d'éléments finis, au choix d'équations pour le traitement de certains problèmes ou encore aux critères de convergence. L'excitation est l'impulsion ou la source d'énergie fournie au modèle afin qu'elle soit distribuée à travers les données de contrôle c.-à-d. l'entrée du débit ou la brèche dans un barrage. Les paramètres sont les données qui définissent les caractéristiques de l'environnement du modèle et ses propriétés physiques. Il existe de multiples paramètres dans les modèles, chacun pouvant être distribués spatialement et temporellement afin

de définir les attributs des différents éléments. Le coefficient de rugosité est un paramètre bien connu dans la modélisation de l'écoulement en rivière.

Les valeurs des paramètres du modèle sont souvent décidées par l'utilisateur selon son expérience et ses connaissances ou par certaines mesures faites sur le terrain. Cependant, les valeurs choisies peuvent avoir une grande influence sur les résultats donnés par la solution du modèle. Afin d'éviter de se retrouver avec de mauvais résultats de calibration, l'utilisateur doit adopter de bonnes pratiques de calibration. La prudence est de mise quant à l'attribution des valeurs des paramètres puisque le comportement du modèle peut varier grandement en fonction de ceux-ci. L'interférence que certains paramètres ont entre eux peut parfois rendre la tâche ardue et complexe.

Étant donné que les logiciels de modélisation tentent de reproduire un phénomène réel, les résultats qui sont obtenus d'une simulation doivent être comparés à une forme de mesure réelle afin de pouvoir statuer sur la performance du modèle. Si un système physique ou un environnement naturel particulier réagit à une excitation ou une impulsion et que cette impulsion est traduite dans le logiciel de modélisation, il est possible de croire qu'il existe un ou plusieurs jeux de paramètres qui devraient permettre au modèle de générer les mêmes réactions que le système ou l'environnement modélisé (Doherty, 2010). La calibration du modèle consiste donc à l'ajustement progressif des paramètres jusqu'à ce que les valeurs simulées correspondent aux valeurs mesurées suivant un certain niveau d'acceptabilité.

Le rôle principal de PEST est donc, entre autres, d'assister l'utilisateur dans l'ajustement progressif des paramètres jusqu'à ce que le modèle ait le même comportement que le système qu'il essaie de représenter ou jusqu'à ce qu'il soit capable de reproduire un phénomène en particulier. Cette correspondance entre le système virtuel et réel se fait en liant les valeurs simulées par le logiciel et les valeurs mesurées en terrain dans une fonction objectif. La somme des différences entre ces deux types de mesures est donc contenue dans cette fonction objectif que PEST tente de réduire au minimum.

PEST exécute ses opérations de calibration en prenant le contrôle du logiciel de modélisation et en l'exécutant autant de fois qu'il en faut pour trouver le jeu de paramètres qui réduit la fonction objectif à son minimum. Avant de procéder à la calibration, l'utilisateur doit préciser à PEST à quel endroit les paramètres ajustables sont enregistrés dans les fichiers d'entrée utilisés par le logiciel de modélisation. Autant doit être fait pour identifier l'endroit où se trouvent les valeurs à être

comparées avec les mesures prises sur le terrain. En ayant accès aux paramètres du modèle et aux valeurs des points d'observations, PEST procède à l'ajustement progressif des paramètres et la réponse du logiciel peut être mesurée en observant le changement dans les valeurs identifiées préalablement. À chaque itération, l'influence qu'a la modification d'un paramètre sur les observations est enregistrée et utilisée afin de prévoir la prochaine combinaison de paramètres à mettre à l'essai. PEST utilise l'algorithme de Gauss-Marquardt-Levenberg afin de raffiner son choix de paramètre et ainsi progresser vers le minimum de la fonction objectif.

Mis à part les informations requises par PEST mentionnées plus haut, le procédé se veut complètement automatique et indépendant du modèle soumis à la calibration afin d'éliminer les interventions humaines dans le processus de calibration. Cependant, certains logiciels demandent parfois d'exécuter une série d'actions précises afin de pouvoir lancer une simulation. Certains logiciels prendront plusieurs heures à plusieurs jours avant de terminer une simple exécution dépendant de la complexité du modèle. Il serait donc difficile de demander une intervention humaine entre chaque simulation afin de permettre la progression de la calibration.

Il est possible de contourner ces difficultés à travers les outils et les fonctionnalités de PEST. Dans le cas actuel, le lancement du logiciel SHR-2D requiert le lancement de deux logiciels différents, *srhpre* et *srh2d*. Chacun des logiciels demande des entrées de touches variables selon le nom du projet et chacun aura un temps d'exécution variable, ce qui complexifie l'exécution automatique des simulations. La résolution de cette difficulté sera expliquée plus tard. Brièvement, dans l'exécution de la calibration, PEST accepte pratiquement n'importe quelle série de commandes sous forme de fichiers exécutables afin de l'assister dans le lancement automatique du logiciel de modélisation. Il a donc été possible d'encoder une séquence d'instruction permettant le lancement de SRH-2D dans un fichier qui sera lu par PEST.

3.3.1 Algorithme de PEST

PEST utilise l'algorithme de Gauss-Marquardt-Levenberg qui se base sur un raffinement progressif des paramètres pour la résolution de problèmes non linéaires. Contrairement à d'autres procédés de calibration qui utilisent des combinaisons aléatoires de paramètres dans le but de trouver une solution optimale, l'algorithme de PEST utilise une méthode de résolution autour d'un minimum local. Il est donc requis de fournir des valeurs initiales afin d'amorcer une réduction progressive de la fonction objective. Les dérivées des observations respectives aux paramètres sont calculées à chaque itération; il y aura donc autant de lancements du modèle qu'il y a de paramètres afin de calculer la matrice jacobienne (Doherty, 2010). Une fois que la relation entre les paramètres à l'étude et les observations est établie, de nouveaux jeux de paramètres seront testés. Cette procédure s'accomplit jusqu'à l'atteinte d'un critère d'arrêt.

3.3.2 Fondement théorique de l'algorithme de PEST

Étant donné un système décrit par l'équation

$$Xb = c \quad (3.1)$$

Où X est une matrice $m \times n$ et b , un vecteur colonne de n éléments et c est un vecteur de m éléments. On retrouve dans la matrice X les éléments connus du modèle ainsi que la source de la stimulation du modèle. Le vecteur c contient donc la réponse du système face aux stimulations contenues dans X , traitées par b , porteur des paramètres caractérisant l'environnement du modèle. Le contenu des vecteurs b et c se limitera aux paramètres ciblés comme étant à optimiser et aux observations connues, respectivement. Normalement, les éléments contenus dans X sont connus (Doherty, 2010).

La fonction objectif mesurant la différence entre les mesures expérimentales et les mesures générées par le modèle se définit comme;

$$\Phi = (c - Xb)^t(c - Xb) \quad (3.2)$$

Il serait donc possible d'identifier un vecteur b contenant permettant de minimiser Φ ;

$$b = (X^tX)^{-1}X^tc \quad (3.3)$$

Supposons un vecteur c_0 correspondant aux observations calculées par le modèle avec un certain jeu de paramètres contenus dans le vecteur b_0 . Il est donc possible d'approximer un vecteur c correspondant aux observations émanant d'un jeu de paramètres b ayant des valeurs très près des valeurs de b_0 .

$$c = c_0 + J(b - b_0) \quad (3.4)$$

J est une matrice jacobienne composée des dérivées des observations en relation avec les paramètres à calibrer. L'objectif de réduire la fonction objectif se traduirait par la recherche du minimum de Φ défini par :

$$\Phi = (c - c_0 - J(b - b_0))^t Q (c - c_0 - J(b - b_0)) \quad (3.5)$$

Où Q est une matrice diagonale carrée composée des poids élevés au carré des observations. Suivant cette logique le terme $(b-b_0)$ devient un vecteur de progression et $(c-c_0)$ mesure la différence entre les valeurs simulées par le modèle et les données expérimentales. Le vecteur de progression, dénoté u , est défini par :

$$u = (J^t Q J)^{-1} J^t Q (c - c_0) \quad (3.6)$$

Le vecteur b déterminé par le vecteur de progression u est le point de départ de la détermination d'un nouveau jeu de paramètre b_0 . Le principe de convergence des paramètres vers le minimum de la fonction objectif est simplifié dans la Figure 3-2. La figure illustre la progression des paramètres vers la valeur optimale de la fonction objectif dans le cas simple d'une situation ne comprenant que deux paramètres. Le choix des valeurs initiales des paramètres est important dans les cas plus complexes ou plusieurs minimums locaux pourraient entourer le minimum global.

Le gradient de la fonction objectif, le vecteur g , contient les dérivées partielles de la fonction objectif en respect avec les paramètres du modèle. Le vecteur g se définit par :

$$g = \frac{\partial \Phi}{\partial b} \quad (3.7)$$

Le vecteur $-g$ représente donc la descente la plus rapide de la fonction objectif. Le vecteur u y est différent sans toutefois avoir un angle de plus de 90 degrés avec le négatif vecteur gradient. S'il en

était le cas, le vecteur u aurait une composante dans la direction positive du gradient. Même si $-g$ offre la descente la plus rapide, u est mieux adapté pour la calibration, car il permet d'éviter une progression en « dents-de-scie », comme l'illustre la Figure 3-3. Le vecteur u est ajusté pour être près de $-g$ en incluant le paramètre de Marquardt-Lambda à l'équation 3.6 :

$$u = (J^t Q J + \alpha I)^{-1} J^t Q r \quad (3.8)$$

Où α est le paramètre de Marquardt-Lambda, I est une matrice identité $n \times n$ et r est le vecteur résiduel contenant les différences entre les valeurs simulées par le modèle et les données expérimentales.

Le paramètre d'ajustement optimal appliqué au vecteur u est donné par :

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^m (c_i - c_{0i}) w_i^2 \gamma_i}{\sum_{i=1}^m (w_i \gamma_i)^2} \quad (3.9)$$

Où c et c_0 représentent les valeurs simulées et les valeurs expérimentales, w_i est le poids associé à l'observation i et γ est donné par :

$$\gamma = J u \quad (3.10)$$

Où J est la matrice jacobienne et u est le vecteur de progression. Le nouveau jeu de paramètre b est donc déterminé par :

$$b = b_0 + \beta u \quad (3.11)$$

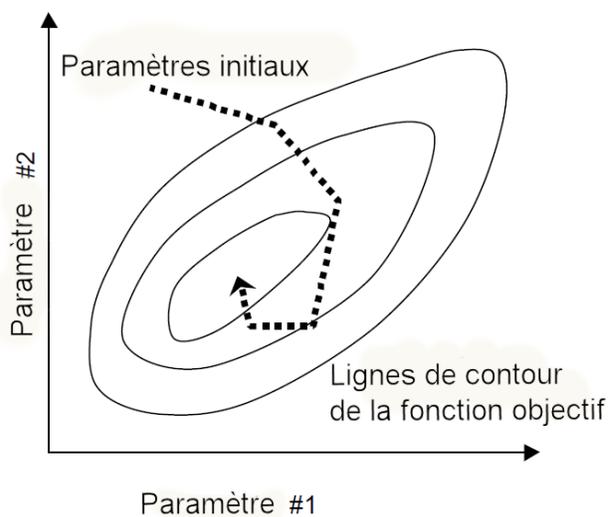


Figure 3-2 Vecteur de progression u selon la méthode de PEST (Doherty, 2010)

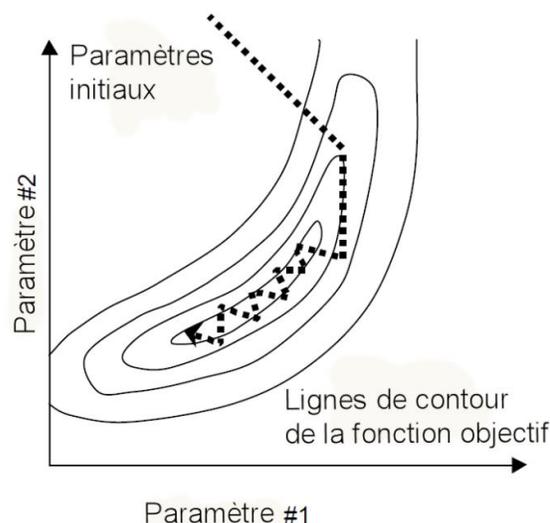


Figure 3-3 Progression en « dents-de-scie » (Doherty, 2010)

3.3.3 Description du logiciel PEST

À moins que le logiciel de modélisation soumis à la calibration soit capable de fournir les dérivées des paramètres en fonction des observations, PEST fera le calcul par différences finies. À chaque itération, PEST commence par incrémenter un paramètre et exécute le logiciel de modélisation. Les dérivées partielles sont évaluées en observant la réponse des points d'observations suite à la modification des paramètres. Ces dérivées sont les éléments qui composent la matrice jacobienne. Il y aura donc autant de lancements du modèle qu'il y a de paramètres soumis à la calibration.

Suivant le calcul des dérivées partielles, PEST tente d'améliorer les paramètres du modèle en testant différentes valeurs de Marquardt-Lambda dans le vecteur de progression u (équation 3.8) responsable de l'évolution des paramètres. Une itération est donc composée de plusieurs simulations divisées en deux séries distinctes : le calcul des éléments de la matrice jacobienne et les essais relatifs au paramètre de Marquardt-Lambda. La précision avec laquelle les dérivées sont calculées influencera le processus d'optimisation. Il est donc recommandé de bien choisir les valeurs des paramètres qui contrôlent la façon dont le calcul des dérivées s'exécute. Le passage

d'une itération à une autre est contrôlé par différents critères de régularisation établis par l'utilisateur permettant à PEST de décider le meilleur moment pour passer à une nouvelle itération.

L'utilisateur a en effet une grande latitude sur l'ajustement des valeurs des paramètres que PEST utilise dans la progression de son exercice de calibration. Il est notamment possible d'ajuster l'incrément utilisé pour le calcul des dérivées ainsi que le moment où PEST passera d'un calcul des dérivées avec une différence finie avant à une différence finie centrale. Il est aussi possible de choisir le type d'ajustement à faire au calcul des différences finies centrales.

En plus de devoir choisir la valeur de départ des paramètres soumis à l'optimisation, l'utilisateur est requis d'en préciser les limites inférieures et supérieures. Il est aussi possible de réguler la variation maximale accordée aux paramètres lors du calcul des dérivées de matrice jacobienne.

Afin de fonctionner correctement, PEST requiert la présence de trois fichiers distincts. Ces trois fichiers; le fichier gabarit, le fichier de contrôle et le fichier d'instruction doivent être créés afin d'éclairer PEST dans son exécution. Ensemble, ces fichiers permettent d'unir les données du modèle avec les nombreux paramètres de contrôle que PEST utilise dans son processus de calibration. Ces fichiers servent de guide à PEST en lui indiquant l'endroit où se trouvent les paramètres qu'il doit optimiser, le nombre d'observations, les instructions à suivre lors de la recherche des valeurs d'observations à la fin d'une simulation, à quel moment arrêter le processus d'optimisation, etc.

3.3.3.1 Le fichier gabarit

Dans sa routine d'optimisation, PEST aura à appeler le modèle à plusieurs reprises. Le fichier gabarit est essentiellement une image miroir du fichier contenant l'entièreté des données du modèle. L'emplacement des paramètres ciblés par l'optimisation est identifié par une série de caractères spécifiques. À chaque fois que PEST appellera le modèle, le fichier d'entrée contenant les données du modèle est remplacé par le fichier gabarit contenant les nouvelles valeurs des paramètres aux endroits ciblés. La figure 3-4 montre un exemple d'un fichier d'entrée de SRH-2D (a) où les paramètres de calibration sont mis en évidence et le fichier gabarit correspondant (b) où les paramètres de calibration sont remplacés par des marqueurs spécifiques.

```

MAT_DEF 2 1 "Manning's Roughness Coefficient" 2
ENDPARAMDEF
BEG2DMBC
GP_VAL 1 2 "casours3"
GP_VAL 1 6 30
GP_VAL 1 7 60
GP_VAL 1 8 "RST_File"
GP_VAL 1 9 "casefile.dat"
GP_VAL 1 10 "Meters"
GP_VAL 3 1 "SRHN"
GP_VAL 3 2 "SI"
GP_VAL 3 3 -1
MAT_VAL 1 2 1 0.02
MAT_VAL 2 2 1 0.02
MAT_VAL 3 2 1 0.02
MAT_VAL 4 2 1 0.02
MAT_VAL 5 2 1 0.02
MAT_VAL 6 2 1 0.020
MAT_VAL 7 2 1 0.022
MAT_VAL 8 2 1 0.024
MAT_VAL 9 2 1 0.026
MAT_VAL 10 2 1 0.028
MAT_VAL 11 2 1 0.03
MAT_VAL 12 2 1 0.032
MAT_VAL 13 2 1 0.034
MAT_VAL 14 2 1 0.036
MAT_VAL 15 2 1 0.038
MAT_VAL 16 2 1 0.04
BC_VAL N 7414 1
BC_VAL N 16198 1
BC_VAL N 23795 1
BC_VAL S 3 1 1 "Constant"
BC_VAL S 3 1 2 150
BC_VAL S 3 1 3 ""
BC_VAL S 3 1 4 "cms"
BC_VAL S 3 1 5 "hours&cfs"

```

(a)

```

MAT_DEF 2 1 "Manning's Roughness Coefficient" 2
ENDPARAMDEF
BEG2DMBC
GP_VAL 1 2 "casours3"
GP_VAL 1 6 30
GP_VAL 1 7 60
GP_VAL 1 8 "RST_File"
GP_VAL 1 9 "casefile.dat"
GP_VAL 1 10 "Meters"
GP_VAL 3 1 "SRHN"
GP_VAL 3 2 "SI"
GP_VAL 3 3 -1
MAT_VAL 1 2 1 0.02
MAT_VAL 2 2 1 0.02
MAT_VAL 3 2 1 0.02
MAT_VAL 4 2 1 0.02
MAT_VAL 5 2 1 0.02
MAT_VAL 6 2 1 ~man1 ~
MAT_VAL 7 2 1 0.022
MAT_VAL 8 2 1 0.024
MAT_VAL 9 2 1 ~man2 ~
MAT_VAL 10 2 1 ~man3 ~
MAT_VAL 11 2 1 0.03
MAT_VAL 12 2 1 ~man4 ~
MAT_VAL 13 2 1 0.034
MAT_VAL 14 2 1 ~man5 ~
MAT_VAL 15 2 1 0.038
MAT_VAL 16 2 1 0.04
BC_VAL N 7414 1
BC_VAL N 16198 1
BC_VAL N 23795 1
BC_VAL S 3 1 1 "Constant"
BC_VAL S 3 1 2 150
BC_VAL S 3 1 3 ""
BC_VAL S 3 1 4 "cms"
BC_VAL S 3 1 5 "hours&cfs"

```

(b)

Figure 3-4 Exemple (a) d'un fichier d'entrée contenant les données du modèle et (b) un fichier gabarit

3.3.3.2 Le fichier d'instruction

Le fichier d'instruction dirige PEST vers les valeurs simulées par le modèle devant être comparées aux valeurs mesurées. Plutôt que de fournir l'endroit exact où se trouvent les valeurs d'intérêts, comme le fait le fichier gabarit, le fichier d'instruction indique comment se déplacer à l'intérieur du fichier de sortie afin d'extraire les valeurs simulées aux points d'observation.

Suivant un langage spécifique d'instructions et de mots-clés sous la forme de marqueurs primaires et secondaires, le fichier d'instruction est composé de plusieurs lignes de texte qui se traduisent en des directives de navigation à travers le fichier de résultats. Dans sa lecture du fichier de sortie, PEST progresse du haut vers le bas, cherchant les mots-clés fournis par les marqueurs primaires. Dans ce cas-ci, le numéro d'identification des points constituant le modèle sert de marqueur primaire à PEST afin qu'il puisse arrêter sa lecture à la ligne contenant les informations sur le point d'intérêt. Puis de la gauche vers la droite, les mesures de hauteur d'eau ou de vitesse sont lues et enregistrées tout dépendant si elles ont été désignées pour servir dans le processus de calibration.

Ce sont alors les marqueurs secondaires qui aident à cette étape. Il n'est pas possible pour PEST de revenir sur ses pas dans la lecture des données : il est donc primordial d'inscrire les valeurs des points observations en ordre croissant des numéros d'identification.

La figure 3-5 montre, en exemple, un fichier de sortie (a) et un fichier d'instruction (b) où les données concernant un point de mesure sont mise en évidence. Le fichier de sortie est construit de sorte que chacune de ses lignes commence par le numéro d'identification du point utilisé dans le modèle suivi des valeurs obtenues la fin d'une simulation.

Les lignes du fichier d'instruction indiquent comment naviguer à travers le fichier de sortie. Par exemple, la ligne en surbrillance à la figure 3-5 (b) montre que la ligne débutant par *17 532* contient les valeurs de *hobs3*, *VXobs3*, *VYobs3* et *VMobs3*. Comme mentionné plus haut, on se sert du numéro d'identification du point de mesure afin de se positionner à l'endroit approprié dans le fichier de sortie du modèle. Le reste des instructions indique la position des informations ciblées dans la calibration le long de la ligne du fichier de sortie.

17524,	278606.809000000,	5347143.930000000,	173.681448000,	-999.000000000,
17525,	278597.306000000,	5347132.440000000,	165.531909000,	-999.000000000,
17526,	278569.697000000,	5347121.850000000,	160.083225000,	161.997846849,
17527,	278587.805000000,	5347120.950000000,	161.691304000,	162.002082699,
17528,	278559.914000000,	5347110.550000000,	158.394425000,	161.996430755,
17529,	278664.533000000,	5347199.900000000,	201.197762000,	-999.000000000,
17530,	278518.298000000,	5347104.920000000,	158.444560000,	161.992148280,
17531,	278534.198000000,	5347102.750000000,	158.257487000,	161.994474430,
17532,	278550.129000000,	5347099.250000000,	158.397761000,	161.996531441,
17533,	278448.347000000,	5347086.780000000,	169.055212000,	-999.000000000,
17534,	278483.605000000,	5347105.490000000,	161.355294000,	161.985782012,
17535,	278495.237000000,	5347098.870000000,	160.744372000,	161.987996331,
17532,	278550.129000000,	5347099.250000000,	158.397761000,	161.996531441,
17537,	278473.528000000,	5347094.240000000,	164.153261000,	-999.000000000,
17538,	278463.357000000,	5347083.070000000,	167.346256000,	-999.000000000,
17539,	278421.939000000,	5347071.020000000,	174.570217000,	-999.000000000,
17540,	278438.073000000,	5347073.960000000,	172.345033000,	-999.000000000,
17541,	278415.400000000,	5347056.130000000,	176.000000000,	-999.000000000,
17542,	278659.378000000,	5347185.030000000,	198.868271000,	-999.000000000,
17543,	278645.621000000,	5347182.220000000,	197.445566000,	-999.000000000,
17544,	278641.244000000,	5347168.250000000,	193.319295000,	-999.000000000,
17545,	278633.413000000,	5347155.760000000,	188.107800000,	-999.000000000,
17546,	278624.076000000,	5347144.120000000,	180.407789000,	-999.000000000,
17547,	278614.714000000,	5347132.530000000,	171.880108000,	-999.000000000,
17548,	278605.356000000,	5347120.920000000,	163.747372000,	-999.000000000,

(a)

```

pif #
# 7359,# [hobs1]97:103 [vxobs1]117:123 [vyobs1]137:143 [vmobs1]157:163
# 13535,# [hobs2]97:103 [vxobs2]117:123 [vyobs2]137:143 [vmobs2]157:163
# 17532,# [hobs3]97:103 [vxobs3]117:123 [vyobs3]137:143 [vmobs3]157:163
# 22171,# [hobs4]97:103 [vxobs4]117:123 [vyobs4]137:143 [vmobs4]157:163
# 28448,# [hobs5]97:103 [vxobs5]117:123 [vyobs5]137:143 [vmobs5]157:163

```

(b)

Figure 3-5 Exemple d'un fichier de sortie contenant les valeurs simulées (a) et un exemple de fichier d'instruction (b)

3.3.3.3 Le fichier de contrôle

Le fichier contrôle est le cerveau des opérations contenant les paramètres de réglage du processus d'optimisation en plus de contenir les informations permettant la liaison des fichiers décrits précédemment. Suivant une structure bien établie, le fichier de contrôle contient les informations nécessaires à la régularisation de l'évolution des paramètres de calibration, les instructions de progression des itérations, les critères d'arrêts, etc. C'est également dans le fichier de contrôle que l'on retrouve les données des valeurs mesurées. Les informations contenues dans ce fichier sont divisées selon quatre types de données : les données de contrôle, les données sur les paramètres, les données sur les observations et les données sur le modèle et ses fichiers de sortie et d'entrée.

Données de contrôle

Les données de contrôle permettent d'initialiser l'optimisation, de diriger sa progression et de décider si le processus doit s'arrêter, passer à une autre étape ou changer complètement de direction. Durant l'optimisation, PEST aura à décider quand passer à l'itération suivante et quand conclure que le processus a atteint le minimum de la fonction objectif.

On y retrouve, entre autres, la valeur initiale du paramètre de Marquardt-Lambda qui initiera le processus de calibration et son facteur d'ajustement. À chaque itération, PEST réduira la valeur de ce paramètre du facteur prédéterminé dans le fichier de contrôle au fur et à mesure qu'il s'approche du minimum de la fonction objectif. Si PEST n'arrive pas à réduire la fonction objectif, il augmentera la valeur du paramètre de Marquardt-Lambda par ce même facteur. À l'itération suivante, PEST reprendra cette procédure en utilisant la valeur de Marquardt-Lambda de l'itération précédente qui a donné la plus faible différence entre les valeurs mesurées et simulées.

Suivant cette procédure, PEST a besoin de critères de décision afin d'entreprendre la meilleure action possible durant la progression de la calibration. Dans ce cas-ci, PEST aura à décider si la progression obtenue avec les valeurs du paramètre de Marquardt-Lambda amène une réduction suffisante de la fonction objectif afin de procéder à l'itération suivante. Lorsque le rapport entre la valeur de la fonction objectif obtenue avec un paramètre de Marquardt-Lambda et la fonction objectif de l'itération précédente à celle qui est en cours tombe sous le seuil S , PEST est autorisé à procéder à la prochaine itération.

$$\frac{\Phi_i^j}{\Phi_{i-1}} \leq S \quad (3.12)$$

Où Φ_i^j est la valeur de la fonction objectif obtenue avec le $j^{\text{ième}}$ paramètre de Marquardt-Lambda à l'essai pour l'itération i , Φ_{i-1} est la valeur de la fonction objectif obtenue à la fin de l'itération précédente.

Si les différentes valeurs du paramètre de Marquardt-Lambda ne réussissent pas à réduire la fonction objectif sous le facteur S , PEST aura recours à un autre critère afin de décider s'il passera

à la prochaine itération. Si la réduction relative de la fonction objectif passe sous le seuil S_r , PEST jugera qu'il est préférable de passer à la prochaine itération.

$$\frac{\Phi_i^{j-1} - \Phi_i^j}{\Phi_i^{j-1}} \leq S_r \quad (3.13)$$

Où Φ_i^j et Φ_i^{j-1} sont respectivement les valeurs de la fonction objectif obtenues à l'itération i en utilisant les paramètres Marquardt-Lambda j et $j-1$.

S'il s'avère impossible d'atteindre ces deux limites, PEST procédera automatiquement à la prochaine itération lorsque le nombre limite de paramètres de Marquardt-Lambda décidé par l'utilisateur aura été mis à l'essai.

Il est important de limiter la variation des paramètres d'optimisation afin qu'ils ne dépassent pas leur valeur optimale. Dans les modèles hautement non linéaires, une trop grande variation des paramètres pourrait facilement projeter la fonction objective loin de son minimum, prolongeant le processus d'optimisation inutilement. Il est donc possible de limiter la variation des paramètres entre chaque itération de façon relative ou factorielle. Les paramètres se voyant imposer une limite de variation relative devront respecter la condition suivante :

$$\frac{b_{i-1} - b_i}{b_{i-1}} \leq R \quad (3.14)$$

Où b_i et b_{i-1} sont respectivement les valeurs des paramètres à l'itération actuelle et à l'itération précédente et R est la limite de changement relative.

Les paramètres se voyant imposer une limite de variation factorielle seront contenus entre les limites suivantes:

$$b_{i-1}/f \leq b_i \leq fb_{i-1} \quad (3.15)$$

Où f est la variation factorielle.

PEST utilise un certain nombre de critères d'arrêt afin de mettre fin à son processus d'optimisation et par le fait même de décider si la fonction objective est à son minimum et que les paramètres ont

atteint leur valeur optimale. D'une part, PEST observera la variation de la fonction objective. Si, après plusieurs itérations, aucune progression n'est accomplie, PEST mettra fin à son exécution. Plus précisément, après un certain nombre consécutif d'itérations au cours duquel la fonction objectif n'atteint pas de meilleurs résultats que la valeur minimale qu'à plus faible valeur atteinte à date, le processus d'optimisation se termine. Si la fonction objective n'est pas réduite après un certain nombre d'itérations consécutives, le processus s'arrêtera aussi.

D'autre part, PEST observera le comportement des paramètres à titre d'indicateur de convergence vers le minimum de la fonction objective. Lorsque des itérations successives n'amènent aucun changement significatif aux valeurs des paramètres, le processus se terminera.

Données des paramètres

Les données des paramètres renferment toutes les informations nécessaires au contrôle de l'évolution des paramètres. Il est entre autres possible de décider du type d'incrément à donner aux paramètres selon qu'ils aient une variation factorielle ou relative.

Au cours de son processus de calibration, PEST devra estimer les dérivées partielles des paramètres afin de choisir le prochain jeu de paramètre qui amènera la plus grande réduction de la fonction objective. Il est requis de fournir un incrément aux paramètres lors du calcul de ces dérivées partielles ainsi que la méthode de différence finie préférée : différence avant, différence centrale ou une combinaison des deux. La combinaison des deux méthodes de différence finie utilisera la méthode de différence avant au début des procédures avant de changer pour l'utilisation des différences centrales une fois que la fonction objectif sera descendue sous une certaine limite.

En plus de ces données de contrôle, PEST a besoin d'une valeur de départ à donner aux paramètres soumis à l'optimisation ainsi que d'une valeur maximale et minimale entre lesquelles le paramètre devra rester d'une itération à l'autre. Un choix convenable de la valeur de départ local et l'imposition de valeurs limites physiquement vraisemblables sont des pratiques qui contribueront à réduire les chances d'atteindre un minimum local. Il est aussi important de choisir des valeurs adaptées pour les données contrôlant la variation des paramètres. Le paysage d'une fonction objectif d'un système hautement non linéaire est irrégulier et possiblement garant d'un ou de plusieurs minimums locaux distincts du minimum global. Une trop grande variation des paramètres

pourrait conduire PEST au-delà du minimum global et, à l'inverse, une variation plus faible pourrait ralentir inutilement le processus en exigeant plus d'itérations que nécessaire.

Données d'observations

Les données d'observations contiennent les différentes valeurs mesurées auxquelles les valeurs simulées par le modèle devront correspondre au cours du processus d'optimisation. Dans le cas du logiciel O.P.P.S., les données d'observations seront constituées de valeurs de hauteur d'eau, de mesures de vitesse selon les composantes orthogonales ainsi que le module de la vitesse.

Le reste de l'information contenue dans le fichier de contrôle permet de localiser les fichiers d'entrées et de sortie contenant les valeurs simulées par le logiciel ou les valeurs des paramètres de calibration. C'est aussi parmi ces données que l'on retrouve le chemin vers le fichier exécutable contenant la séquence d'actions à entreprendre afin de lancer le logiciel de modélisation. PEST utilisera ce fichier afin de lancer chacune des simulations durant son processus d'optimisation.

3.4 Rivière Ha! Ha!, cas à l'étude

Dans cette étude, la rivière Ha! Ha! est partiellement modélisée en utilisant des données topographiques mesurées suite à la rupture d'une digue du lac Ha! Ha! en 1996. Située en amont de la rivière, cette digue céda sous la montée rapide des eaux dans le lac Ha! Ha! causée par des pluies diluviennes qui se sont abattues durant trois jours sur la région du Saguenay au Québec. La vidange rapide du lac Ha! Ha! causa une augmentation excessive du débit dans la rivière (jusqu'à $1000 \text{ m}^3/\text{s}$), transformant sa morphologie en creusant son chemin dans les dépôts sédimentaires autour des bases rocheuses du lit de la rivière (Capart et al., 2007).

La rivière de 35 km de long, du lac Ha! Ha! jusqu'à son embouchure dans la rivière Saguenay, est alimentée par un bassin versant couvrant 610 km^2 . Le modèle est composé d'un tronçon de 15 km en amont de la baie (KM-20 à KM-35) afin de réduire le temps de calcul à une durée plus acceptable en vue de la procédure de calibration qui peut avoir recours à plus d'une centaine d'appels du modèle avant de converger vers une solution satisfaisante.

Le tronçon modélisé est divisé en cinq régions différentes d'environ 3 km de long chacune caractérisées par des valeurs distinctes du coefficient de Manning. La discrétisation des différentes sections s'est faite en isolant les tronçons qui présentaient des caractéristiques physiques

homogènes, tels la pente, la morphologie des berges ou l'étendue des plaines inondables. La figure 3-6 montre le positionnement de la rivière et les divisions utilisées dans la présente étude. Le coefficient de Manning est la seule valeur ajustable dans le cas soumis à la calibration puisque PEST permet l'ajustement de paramètres continus seulement.

Le modèle comprend environ 32 000 nœuds et quelque 64 000 éléments triangulaires ou quadrilatères. Chaque simulation est faite avec un débit constant de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ et le modèle exécute 60 heures d'écoulement avec un pas de temps de 30 secondes. Étant donné que les coefficients de Manning sont modifiés abondamment durant la calibration et que la qualité de l'ajustement est basée sur le résultat final de chaque simulation, un temps de simulation suffisamment long doit être choisi afin que l'écoulement se stabilise. Chaque simulation lancée commence avec la solution précédemment calculée ainsi qu'un nouveau jeu de paramètres, occasionnant nécessairement des modifications à la hauteur d'eau et la vitesse au cours de la progression de la simulation. Il est donc important de choisir un temps total de calcul qui laissera assez de temps à la simulation à atteindre un état stable.

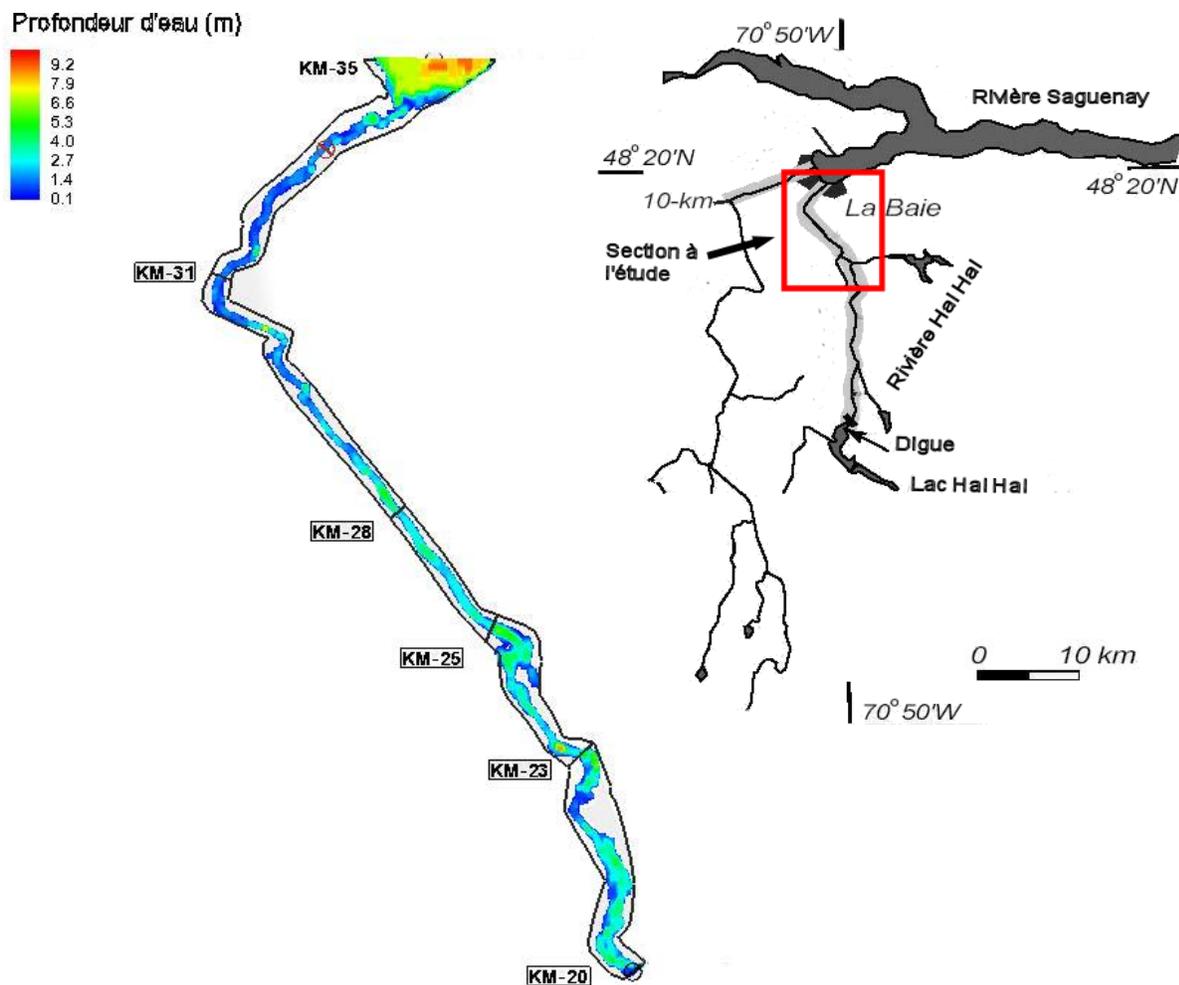


Figure 3-6 Sections modélisées de la rivière Ha! Ha! au Saguenay (T. Mahdi & Marche, 2003)

3.5 Logiciel O.P.P.S

L'interface graphique a été créée avec un objectif de convivialité pour l'utilisateur lui offrant la possibilité d'utiliser PEST afin de calibrer un modèle de rivière sans avoir à comprendre les étapes nécessaires à son exécution ou son implémentation. Les étapes de préparation que requiert PEST avant de pouvoir exécuter une calibration automatique sont évitées et l'utilisateur n'a qu'à spécifier les détails des points d'observations et les paramètres qu'il souhaite calibrer.

3.5.1 Interface graphique

Lors de son ouverture, le programme O.P.P.S. se présente comme une interface graphique dans une feuille Excel (figure 3-7). La page d'accueil présente d'abord des précisions sur le mode d'emploi du programme en étalant des détails d'utilisation quant aux conditions initiales du modèle soumis à la calibration ainsi que des précisions sur les étapes à suivre lors de l'utilisation de O.P.P.S. Certaines précautions doivent être prises avant le lancement du processus de calibration, car le programme d'optimisation requiert que des conditions spécifiques soient respectées pour des raisons logistiques. Notamment, les logiciels composant SRH-2D ainsi que les documents relatifs au projet doivent être dans un fichier commun. De plus, le modèle à optimiser doit avoir été préalablement initié par une première simulation afin que la première simulation amorcée par le processus de calibration ne démarre pas avec un modèle complètement dépourvu d'eau. SRH-2D doit être mis en mode « restart », amorçant chaque simulation avec les conditions finales de la simulation précédente. Le débit doit être constant, le temps doit être en heure et le mode d'enregistrement des solutions doit être « SRHN » (enregistrement des valeurs de la simulation aux nœuds) avec une fréquence d'enregistrement unique à la fin de la simulation. Comme il l'a été mentionné précédemment, le temps de simulation doit être choisi convenablement afin de permettre à l'écoulement de se stabiliser avant la fin de la simulation.

La section suivant les instructions de base est l'espace réservée à l'inscription des informations sur les points d'observations. La dernière section se présente comme un tableau de bord résumant l'état de la préparation de la calibration en indiquant la présence ou l'absence des fichiers nécessaires. À sa première utilisation, O.P.P.S. présentera un tableau de bord indiquant que les fichiers requis sont absents. Le tableau de bord sera mis à jour lorsque les fichiers de base seront créés.

3.5.1.1 Saisie des données

Il est d'abord requis d'inscrire les informations concernant les points d'observation en respectant un ordre croissant des numéros d'identification des points. La profondeur d'eau observée, les composantes de la vitesse et le module de la vitesse doivent être inscrits dans les colonnes suivantes respectives. Il n'est pas requis de remplir toutes les colonnes, cependant chaque ligne doit contenir au moins une donnée d'observation outre le numéro d'identification. L'ajout ou la suppression de lignes se fait par les boutons de commandes respectifs.

Instructions

1. Ajoutez vos lignes d'observations avec les données qui vous sont disponibles. Les points d'observation doivent être en ordre croissant. Si vous ne disposez pas de certaines informations, laissez la case vide. Une ligne d'information doit contenir au moins une mesure.
2. Ajoutez ou supprimez des lignes d'observation en se servant des boutons appropriés. Ne laissez aucune ligne vide.
3. "Préparer l'optimisation" permet de compiler les informations nécessaires à l'initialisation de l'optimisation. À cette étape, identifiez votre projet et les paramètres à optimiser.
4. Une fois que la préparation de l'optimisation terminée, lancer l'optimisation en actionnant la commande "Lancer PEST".
5. En cas d'erreur durant l'optimisation, il est possible de reprendre la simulation à sa plus récente itération avec "Redémarrer la dernière simulation".
6. À la conclusion d'une optimisation, visionner les résultats grâce à "Afficher les résultats".
7. Si l'utilisateur n'a pas les privilèges d'administrateur, le passage d'une simulation à une autre pourrait être problématique.

Le clavier ne pourrait être désactivé pendant l'envoi d'une commande automatique. Utilisez "Redémarrer la dernière simulation" afin de reprendre une optimisation accidentellement interrompue.

Conditions d'utilisations de SRH-2D

Le logiciel SRH-2D doit être dans le même dossier que le projet à optimiser
 Le projet SRH-2D doit être fonctionnel et complet avant l'utilisation de ce logiciel. Unités en SI, débit constant et temps en heure
 Temps de simulation suffisant afin d'avoir un écoulement stable à la fin d'une simulation
 Fichier de sortie SRH-2D en mode SRHN (valeur au nœuds de maillage) et un seul fichier de sortie à la fin d'une simulation (output frequency = -1)

Entrer les informations des points de mesure (observations)

Point d'observation	ID du point (m)	Profondeur d'eau observée (hobs#)	Vitesse en X observée (m/s) (VXobs#)	Vitesse en Y observée (m/s) (VYobs#)	Vitesse résultante (m/s) (VMobs#)		
1						Ajouter une ligne d'observation	Préparer l'optimisation
2						Supprimer une ligne d'observation	
3							
4							
5							

Fin des observations

Panneau de contrôle.

Les fichiers "instruction, template, control doivent être créés avant de démarrer une simulation.

Fichiers d'optimisation	Nom	État	Date
Fichier Projet	HaHa-test.2dm	Absent	-
Fichier "instruction"	-	-	-
Fichier "template"	-	-	-
Fichier "control"	-	-	-

Lancer PEST

Redémarrer la dernière simulation

Présenter les résultats

Figure 3-7 Interface graphique de O.P.P.S. intégrée dans un classeur Excel.

Les informations de profondeur d'eau ou de vitesse seront utilisées individuellement dans le processus de calibration : il y aura donc autant de points d'observations que de mesures distinctes. Les points d'observations utilisés dans la calibration sont nommés selon le numéro se trouvant dans la colonne « *Point d'observation* ». Par exemple, les informations contenues sur la ligne 3 de O.P.P.S. généreront les points d'observations *hobs3*, *VXobs3*, *VYobs3* et *VMobs3* auxquels seront associées les valeurs inscrites dans les colonnes respectives.

3.5.1.2 Préparer l'optimisation

En appuyant sur le bouton « *Préparer l'optimisation* » un formulaire de saisie, présenté à la figure 3-8 (a), demande de fournir les informations supplémentaires suivantes : le nom du fichier « *.2dm* » relatif au modèle à calibrer, le chemin menant vers PEST ainsi que les coefficients de Manning qui devront être soumis à l'optimisation en se référant au nom du matériau qui est associé au

coefficient. Ces matériaux composent les différentes sections de la rivière auxquelles un coefficient de Manning distinct y est associé.

En appuyant sur le bouton « *Choisir* » dans la section réservée au choix des matériaux, un formulaire de saisies présente les matériaux contenus dans le projet choisi, comme le montre la figure 3-8 (b), en donnant le choix de sélectionner ceux qui devront être inclus dans l'optimisation. Le choix de la valeur de départ du coefficient de Manning et de ses limites se fait à ce moment. Une fois le choix accompli, les matériaux sélectionnés ainsi que les noms qui y sont attribués sont présentés dans la fenêtre « *Choix des matériaux du projet* » (figure 3-8 (a)).

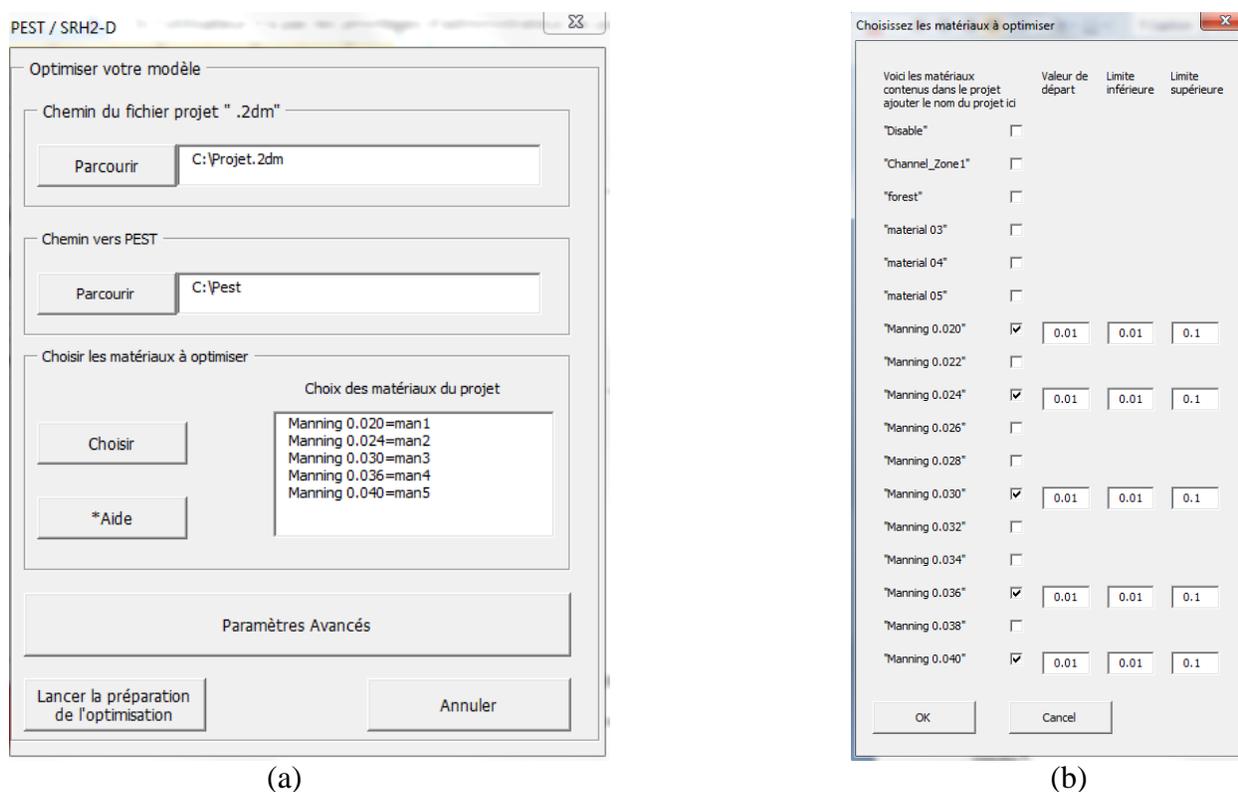


Figure 3-8 Formulaires de saisie en vue de la préparation de l'optimisation (a) et formulaire de saisies du choix des matériaux (b)

Le bouton « *Paramètres Avancés* » permet d'atteindre le formulaire de saisie contenant les paramètres de contrôle spécifiques au fonctionnement de PEST (Figure 3-10). Ces paramètres contrôlent notamment l'évolution du vecteur de progression, les critères décisionnels, les critères d'arrêt, les incréments des paramètres et le type d'incrément, la méthode de calcul des différences

finies, etc. Ce formulaire se présente sous la forme de deux onglets distincts. Il est toujours possible de revenir aux paramètres par défaut au besoin.

The image displays two side-by-side screenshots of the 'Paramètres avancés' (Advanced Parameters) dialog box for the PEST software. Both windows have a title bar that reads 'Paramètres avancés' and a close button (X) in the top right corner.

The left window shows the 'Général' (General) tab. It contains several input fields for optimization parameters:

- Valeur initiale du facteur lambda (RLAMBDA1): 10.0
- Facteur d'ajustement du lambda (RLAMFAC): -3.0
- Ratio maximal de la fonction objective avant de passer à la prochaine itération (PHIRATSUF): 0.3
- Reduction relative maximale de la fonction objective avant de passer à la prochaine itération (PHIREDLAM): 0.01
- Nombre maximal de lambda testé par itération (NUMLAM): 10
- Variation maximale des paramètres entre chaque itération:
 - Variation relative max (RELPARMAX): 1.0
 - Facteur de variation max (FACPARMAX): 2.0
- Seuil du ratio de de la fonction objective pour permettre le passage aux dérivées centrales (PHIREDSWH): 0.1
- Nombre maximum d'itération durant une séance de calibration (NOPTMAX): 30

At the bottom of this window are three buttons: 'OK', 'Annuler', and 'Paramètres par défaut'. A small note at the bottom left states: 'Arrêt de l'optimisation après NPHISTP itérations où la fonction objective est sous le seuil de PHIRE DSTP'.

The right window shows the 'Paramètres d'optimisation' (Optimization Parameters) tab. It contains several dropdown menus and numerical input fields:

- Type (INCTYP) d'incrémentation pour le calcul de dérivées partielles et la fraction utilisée pour l'incrément (DERINC): INCTYP is set to 'absolute', DERINC is 0.002.
- Limite inférieure de l'incrément, ignoré si INCTYP est "absolute" (DERINCLB): 0.002
- Méthode des différences finies adoptée (FORCEN): 'switch'
- Facteur multiplicatif à DERINC en cas de différences finies centrales (DERINCMUL): 1.0
- Ajustement désiré pour la méthode des différences finies centrées (DERMTHD): 'best_fit'
- Ajustement des variables avec RELPARMAX ou FACPARMAX (PARCHGLIM): 'factor'

At the bottom of this window are three buttons: 'OK', 'Annuler', and 'Paramètres par défaut'.

Figure 3-10 Formulaires de saisie des paramètres avancés contrôlant les opérations de PEST.

3.6 Fonctionnalité

La figure 3-11 présente un schéma des procédures du logiciel O.P.P.S. Dès la sélection d'un fichier *.2dm*, O.P.P.S. commence une recherche des informations clés relatives au projet et procède à l'enregistrement de celles-ci. Cette première lecture du fichier d'entrée s'inscrit dans le processus de préparation précédant le lancement de PEST où toutes les informations essentielles sont extraites automatiquement sans que l'utilisateur ait à les fournir. Par exemple, lors du choix des matériaux, le formulaire de saisie qui s'offre à l'utilisateur (figure 3-8 (b)) est ajusté en fonction du choix du fichier *.2dm* afin de ne présenter que les matériaux présents dans le projet.

Les données inscrites dans les différents formulaires (les matériaux choisis, les paramètres de progression de PEST ainsi que les données sur les points d'observations) sont donc enregistrées dans cette première étape de préparation. Les données fournies par l'utilisateur dans ces différents

formulaire sont vérifiées afin de s'assurer d'un bon fonctionnement du processus de calibration. Cette vérification évitera de permettre le lancement de simulation qui causera des erreurs à l'initiation du processus.

Une fois la vérification faite, O.P.P.S. compile les données saisies par l'utilisateur dans les différents formulaires et crée le fichier gabarit, le fichier d'instruction ainsi que le fichier de contrôle. Les données d'observation sont inscrites dans le fichier d'instruction en respectant la disponibilité des différentes mesures possibles et le fichier de contrôle est créé en synthétisant un grand nombre d'informations : les valeurs des observations, les paramètres avancés, l'emplacement des fichiers d'intérêt, etc.

Suite à ces différentes étapes, une copie des fichiers clés du projet sera effectuée s'il n'en existe aucune. Dans la mesure où les simulations successives modifient les paramètres du projet de façon permanente, ce fichier de récupération servira à rétablir les paramètres de départ du projet si nécessaire.

O.P.P.S.

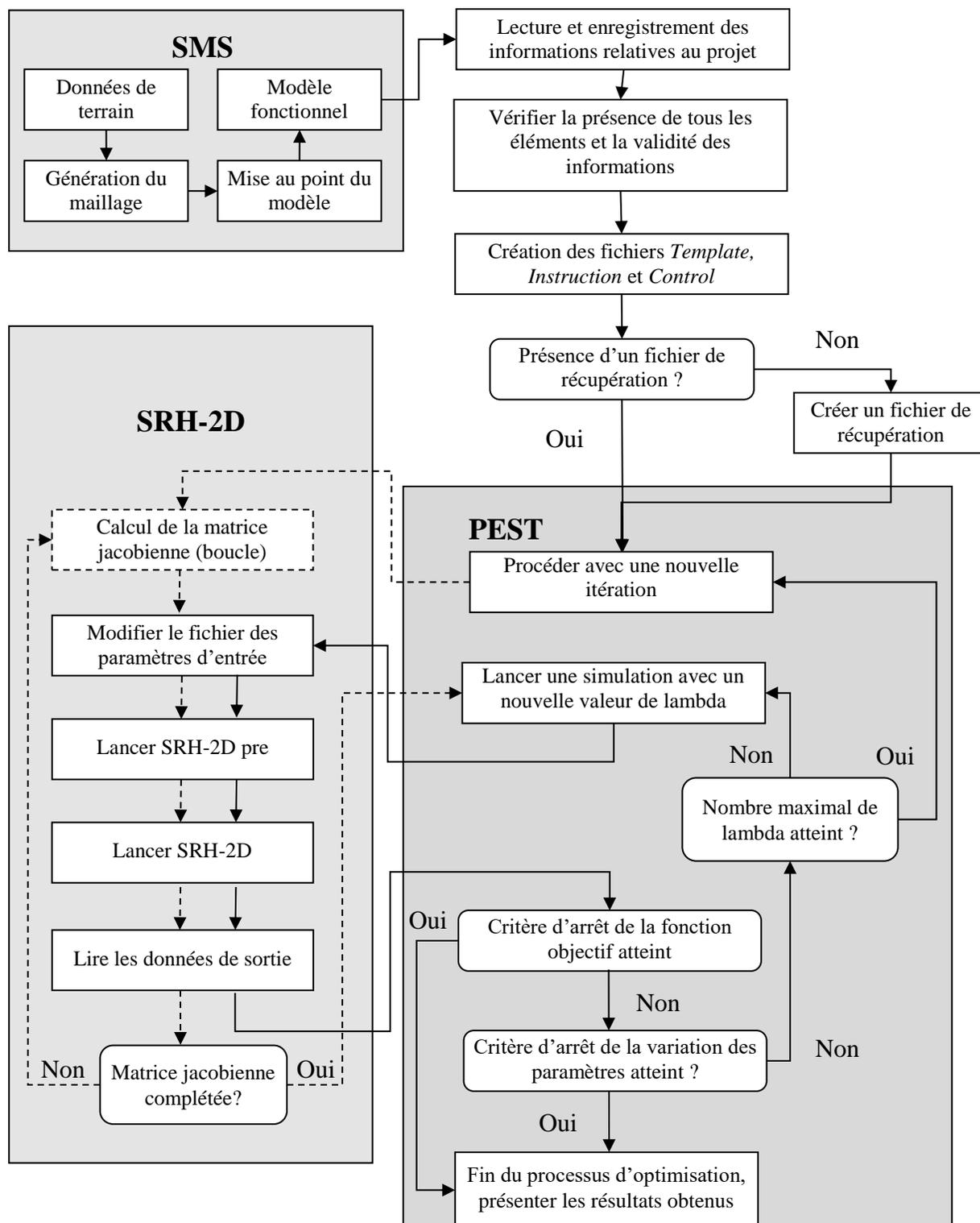


Figure 3-11 Schéma de procédure du processus de calibration

CHAPITRE 4 DISCUSSION GÉNÉRALE

Dans son ensemble, l'interface graphique permet d'assembler rapidement le contenu nécessaire à l'exécution de la calibration par PEST. Cette interface graphique fonctionnelle a permis d'exécuter plusieurs séries de calibration avec des configurations variables. Un total de huit séries de calibration ont été conduites dans lesquelles la position des points d'observation, le nombre de points disponibles ainsi que l'information contenue dans ces points d'observation varie d'une série à l'autre.

Par souci de constance, chaque simulation est démarrée avec les mêmes conditions générales : les coefficients de Manning ont tous la même valeur de départ de 0,01 (à quelques exceptions près qui seront spécifiées dans le texte) et les paramètres contrôlant la progression calibration restent inchangés. Au départ de chaque calibration, l'initiation du processus force les coefficients de Manning à la valeur de départ mentionnée. Il est attendu que le processus de calibration retrouve les valeurs des coefficients de Manning de la configuration initiale qui sont associés aux valeurs comprises dans les points d'observation. En effet, les valeurs de hauteur d'eau et de vitesses d'écoulement utilisées aux différents points d'observation ont été générées à même le modèle dans sa configuration initiale. En brouillant les valeurs des coefficients de Manning au départ du processus de calibration, l'objectif est de retrouver cet état initial qui correspond aux valeurs fournies. Considérant que certaines simulations contiennent moins d'informations aidant à la calibration comparativement à d'autres et que certaines séries de calibration contiennent des erreurs introduites volontairement, il est attendu que les performances de la calibration varieront d'une situation à l'autre.

La première série de calibration tente de calibrer le modèle en utilisant les mesures de hauteur d'eau comme information de correspondance entre les valeurs simulées par le modèle et les observations. Le premier essai de calibration de cette série contient deux points d'observation. La dernière calibration de cette série comprend un point d'observation pour chacune des cinq sections. Entre la première et la dernière calibration, un point d'observation est ajouté dans une des sections qui en était précédemment dépourvue. PEST a donc seulement accès à un nombre limité de points contenant chacun une seule mesure de hauteur d'eau afin de le conduire à son objectif de calibration du modèle de rivière. Cette série contient donc quatre essais de calibration distincts.

Dans un cas, les points d'observation se situent au centre des différentes sections de la rivière et dans l'autre, les points se situent aux frontières unissant les sections.

La deuxième série de calibration utilise aussi un nombre croissant de points d'une simulation à l'autre avec comme différence le positionnement des points d'observation. C'est dans cette série que les points sont situés à la frontière de deux sections plutôt qu'au centre comme dans la série précédente. Le scénario contient donc un total de six points : quatre points situés aux jonctions des sections ainsi qu'un point près de chacune des frontières (amont et aval) du modèle.

Étant donné que certaines de ces calibrations contiennent très peu d'information et que la valeur de départ très basse a eu un effet négatif sur le reste de la calibration, elles ont été reprises en utilisant des valeurs de départ du coefficient de Manning plus près de la valeur recherchée.

La série de calibration suivante progresse aussi avec un nombre croissant de points d'observation cette fois-ci en ajoutant les composantes de la vitesse d'écoulement à la mesure de la hauteur d'eau dans le lot d'informations disponibles à la calibration. PEST a donc accès à un nombre grandissant de points contenant chacun plusieurs mesures distinctes (hauteur d'eau, composantes de vitesses X et Y ainsi que le module de la vitesse) afin de calibrer le modèle. Dans tous les cas traités, les points d'observation se trouvent au centre des différentes sections de la rivière.

D'autres séries de calibration axées sur la sensibilité des paramètres face à la variation des données d'entrées sont conduites dans l'optique de déterminer l'influence de la présence d'erreur dans les mesures données à PEST. Parmi ces séries, deux portent sur la sensibilité du résultat de la calibration du coefficient de Manning face à des variations de la hauteur d'eau fournie dans les points d'observation. Dans le premier cas, seulement les mesures de hauteur d'eau figurent parmi les informations servant comme donnée de correspondance avec le modèle et dans le deuxième cas les composantes de la vitesse sont intégrées à l'information contenue dans les points d'observation. Il s'agit ici d'adresser l'amélioration potentielle des résultats de la calibration face à la présence d'erreurs de mesure en ajoutant des informations additionnelles aux points d'observation.

La dernière série de calibration porte sur la sensibilité du résultat de la calibration des coefficients de Manning face à la variation du débit d'entrée. Plusieurs cas sont traités afin d'observer l'effet d'une surestimation ou d'une sous-estimation du débit sur la qualité de l'ajustement.

Le modèle général de la rivière Ha! Ha! est présenté à la figure 4-1, montrant les différentes sections et les valeurs originales de leur coefficient de Manning respectif, variant de 0,02 à 0,036. Les valeurs des points d'observation ont été générées avec les configurations initiales. Le profil de la section de rivière étudiée est présenté à la figure 4-2. Les sections 1, 2 et 5 présentent des pentes moyennes d'environ 3% tandis que les sections 3 et 4 ont une pente moyenne de 1 %. Le tableau 1 montre les valeurs originales des coefficients des Manning qui sont recherchées dans les exercices de calibration ainsi que les valeurs des différentes données d'observations.

Les résultats sommaires de la calibration sont présentés dans cette section sous la forme de graphiques montrant les valeurs des coefficients de Manning obtenues en fonction des valeurs recherchées. Un tableau montrant les valeurs de hauteur d'eau mesurées et simulées accompagne les graphiques afin de montrer les valeurs obtenues par le modèle et également afin de montrer le positionnement et le nombre de points d'observation impliqués dans la calibration du cas présenté. Les résultats complets se trouvent en annexe où tous les comparatifs entre les valeurs simulées et observées seront présentés. Des informations additionnelles sur les détails des simulations sont aussi présentes.

À titre indicatif, le temps d'exécution d'une simulation de 50 heures d'écoulement est d'environ 1 heure (Intel® Core™ i5 CPU, 2,77 GHz, 6,00 Go Ram) et chaque exercice de calibration requiert de 40 à 200 appels de modèle, tout dépendant de la complexité du cas. Les résultats des exercices de calibrations sont présentés avec plus de détails en annexe.

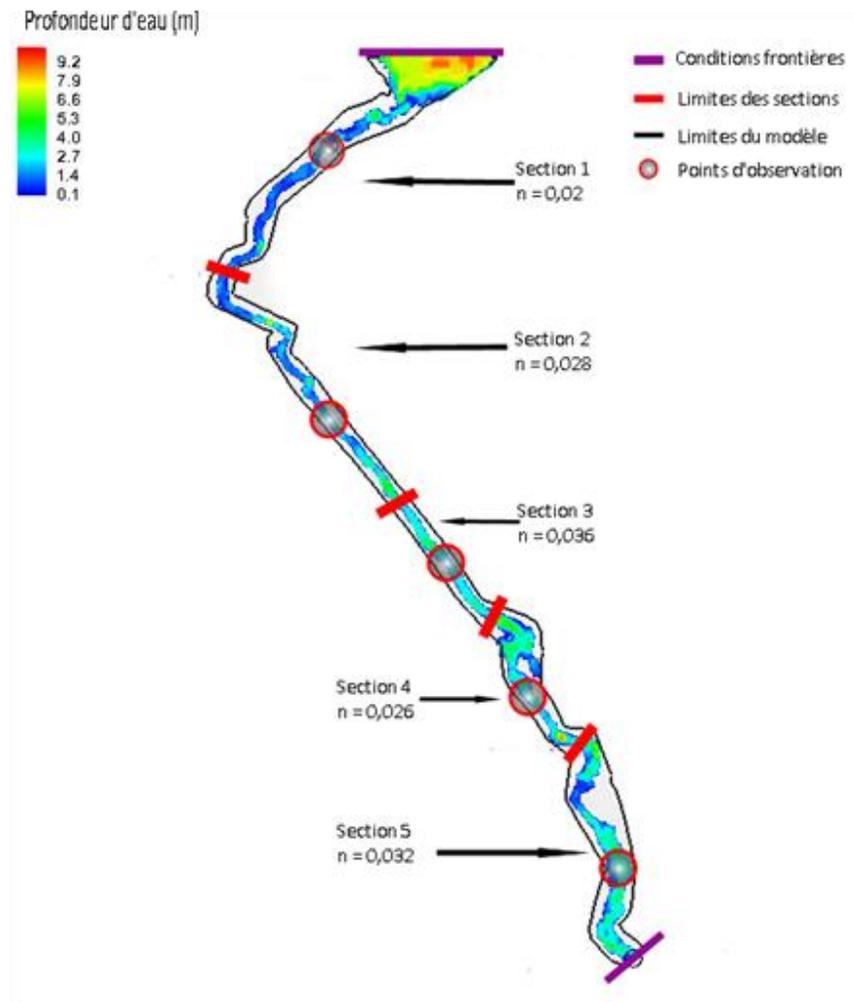


Figure 4-1 Discretisation des différentes sections du modèle



Figure 4-2 Profil du modèle de la rivière

Tableau 1 Valeurs originales des coefficients de Manning et valeurs des données observées

Section	Valeur originale des coefficients de Manning	Valeurs des points d'observations			
		Profondeur d'eau observée (m)	Vitesse X (m/s)	Vitesse Y (m/s)	Module vitesse (m/s)
1	0,02	1,416	1,146	0,941	1,481
2	0,028	2,786	-1,231	0,902	1,528
3	0,036	3,551	-0,559	0,526	0,769
4	0,026	3,463	-0,28	0,537	0,605
5	0,032	3,222	-0,215	0,367	0,425

4.1 Calibration avec la hauteur d'eau

4.1.1 Points d'observation au centre des sections

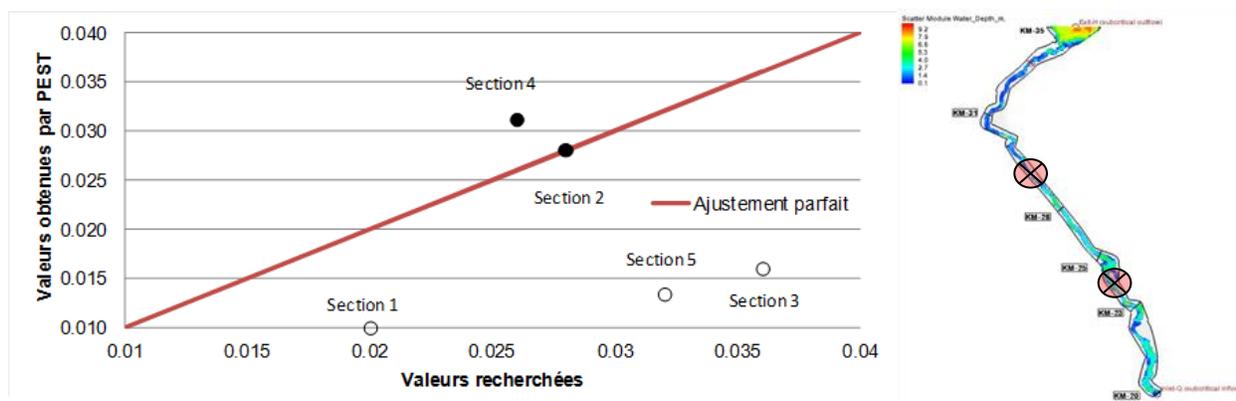
Valeurs de départ à 0,01

D'une calibration à l'autre, les sections contenant un point d'observation sont correctement calibrées et ceux qui n'en contiennent pas voient leur coefficient de Manning rester sensiblement près de leur valeur de départ. Une valeur de paramètre qui est restée sensiblement inchangée à la fin de la calibration démontre généralement que PEST a conclu que le paramètre n'a pas d'influence sur la fonction objectif. Si, durant la calibration, PEST ne trouve pas de corrélation entre la modification d'un paramètre et la réduction de la fonction objectif, la variation du paramètre sera abandonnée. Les résultats obtenus lors de cette série de calibration démontrent qu'il est requis d'avoir au moins une mesure de hauteur d'eau pour chaque section afin d'y avoir une calibration fiable ou du moins raisonnable. Seule la calibration où tous les points d'observation sont inclus contient des résultats satisfaisants. Les figure 4-3 à Figure 4-6 présentent les détails des résultats des essais de calibration.

La figure 4-3 et la figure 4-4 montrent un exemple où PEST ne réussit pas à converger vers la valeur du coefficient de Manning recherchée. Les valeurs des coefficients de Manning restent en effet pratiquement inchangées de leur valeur de départ puisque la section visée n'est pas associée avec un point d'observation. On remarque que la section 3 garde un coefficient de Manning à sa valeur initiale durant presque toute la série de calibration, faute de présence d'information afin d'aider à la calibration. En restant à sa valeur de départ, la section 3 influence la hauteur d'eau en amont, à la section 4. Dans sa tentative d'égaliser la hauteur d'eau fournie à la section 4, PEST est forcé de surestimer la valeur du coefficient de Manning à cette section. Par conséquent, la calibration de la section 4 donne une valeur un peu plus élevée que la valeur recherchée jusqu'à ce que la section aval soit correctement calibrée, soit lors de l'attribution d'un point d'observation.

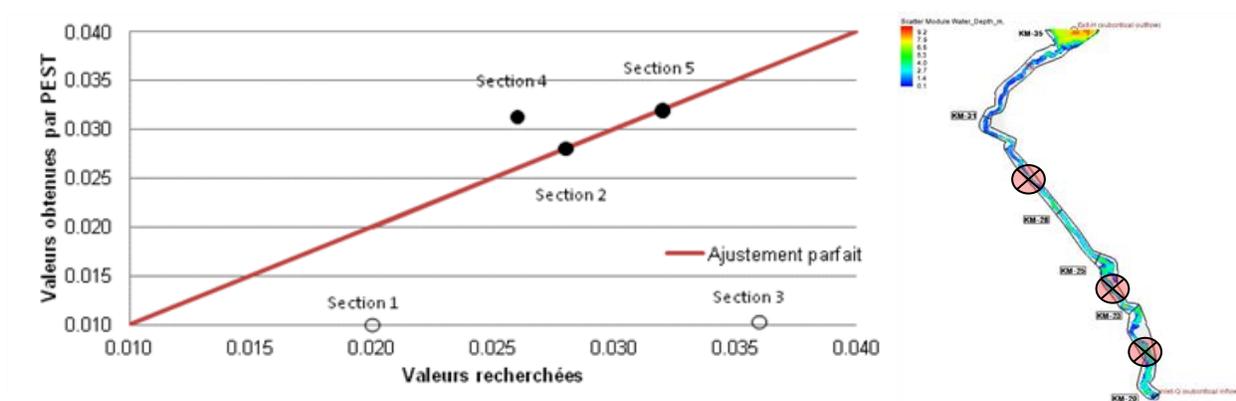
La figure 4-7 montre la différence entre les niveaux d'eau simulés à la fin de la calibration utilisant tous les points d'observation et les niveaux d'eau observés avec les valeurs originales des paramètres. Les différences avec les valeurs simulées sont très faibles considérant que les niveaux dans le modèle sont reproduits à une précision de 0,005 m sur l'ensemble sur modèle. La majorité

des différences plus élevées (0,1 m à 0,3 m) sont situées dans la section 2 où certaines instabilités ont été observées au niveau de la hauteur d'eau simulée.



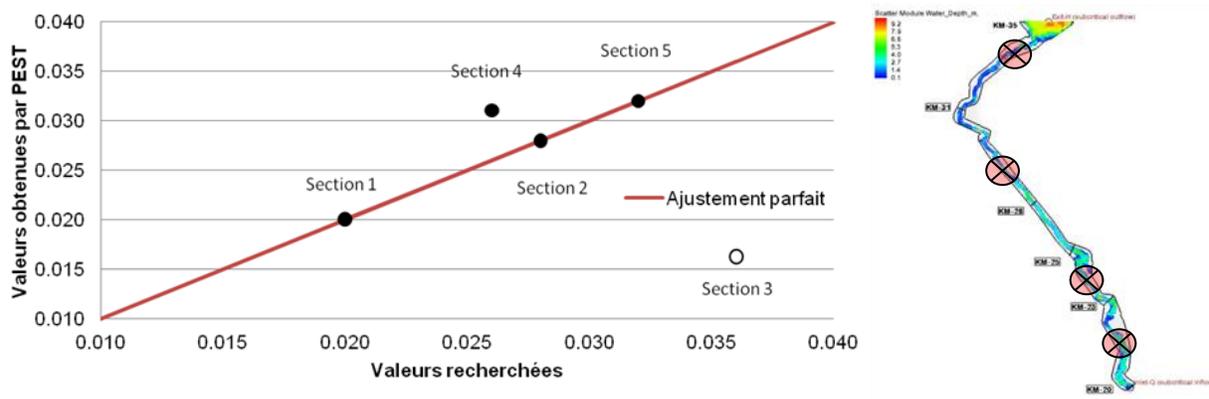
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00

Figure 4-3 Résultats de la calibration utilisant 2 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)



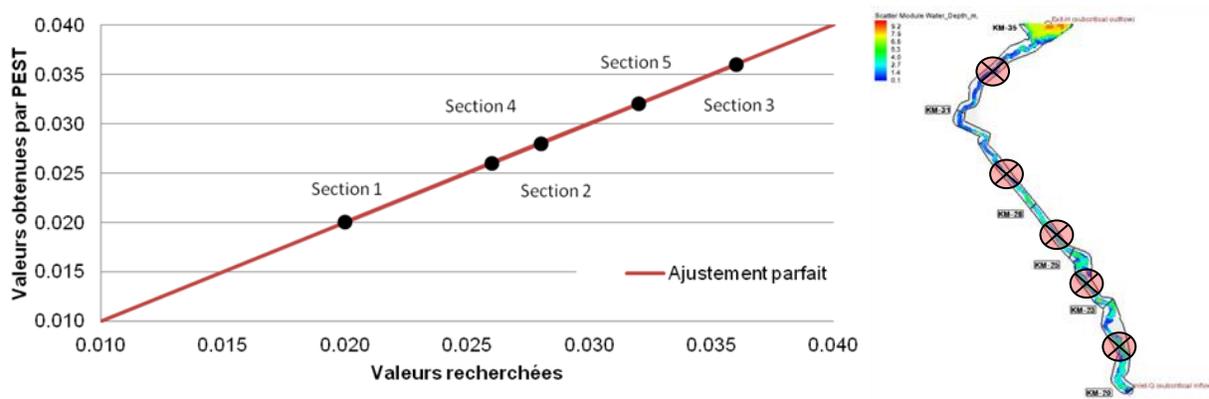
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

Figure 4-4 Résultats de la calibration utilisant 3 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)



Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.416	1.416	0.00
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

Figure 4-5 Résultats de la calibration utilisant 4 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)



Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.416	1.416	0.00
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 3	3.551	3.551	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

Figure 4-6 Résultats de la calibration utilisant 5 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)

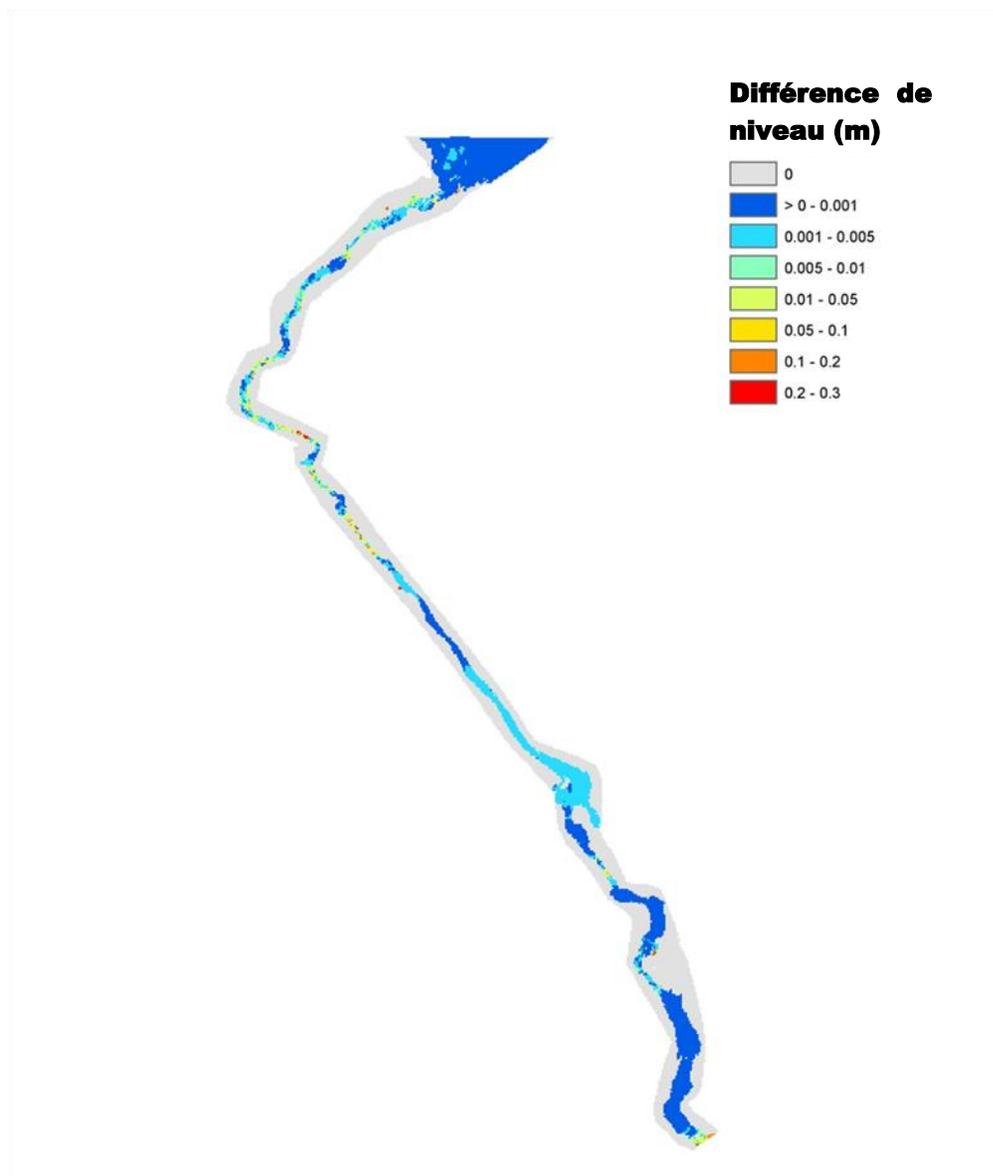


Figure 4-7 Différences de niveau entre les valeurs observées et les valeurs simulées (hauteur d'eau seulement)

Valeurs de départ ajustées

Puisque PEST montre une certaine difficulté à faire varier les coefficients de Manning des sections sans points d'observation, la série de calibration a été reprise en utilisant des valeurs de départ plus près de la valeur recherchée. Dans cette nouvelle série de calibration, les valeurs des coefficients de Manning se voient attribuer une valeur initiale qui diffère d'environ 25% de la valeur recherchée. Ces valeurs de départ cherchent à se rapprocher d'une estimation pouvant être faite par

un utilisateur. Les figure 4-8 à Figure 4-11 présentent les détails des résultats des essais de calibration.

À la première calibration de cette série, où seulement deux points figurent parmi les informations de calage, les coefficients de Manning des sections contenant un point d'observation sont plus ou moins près de leurs valeurs recherchées. Les sections de la rivière ne contenant pas de points d'observation restent presque inchangées, comme au scénario précédent. Lors de la calibration, la variation des coefficients de Manning de ces sections n'avait encore peu, voir même aucune, influence sur la qualité de l'ajustement.

En ajoutant un point d'observation, à la calibration suivante, les coefficients de Manning des régions qui étaient déjà munies d'un point d'observation connaissent une certaine amélioration en s'approchant encore un peu plus de leur valeur originale (figure 4-9). En plus d'augmenter la qualité de l'ajustement de la section dont il fait partie, le point d'observation supplémentaire ajouté aide à réduire l'erreur de calibration des autres sections. L'écart entre la valeur obtenue par PEST et la valeur recherchée à la section 3 diminue avec l'ajout successif des points d'observation en amont et en aval. Cet ajout n'a cependant aucun effet sur la section 1 qui reste inchangée.

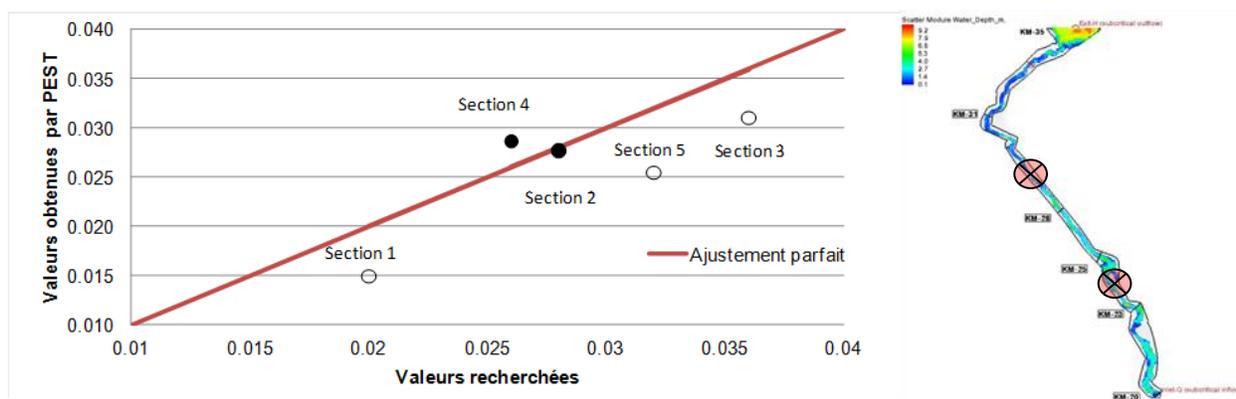
La calibration suivante montre une amélioration marquée pour la section 1, où un point d'observation y a été ajouté, et une légère progression vers les valeurs recherchées pour les sections 3 et 4. On remarque que le coefficient de la section 4 semble encore subir les contrecoups du manque de données à la section 3, comme il l'a été observé précédemment. Cette erreur relative est présente tout au long de la série de calibration même si un point d'observation y est présent. En fait, l'ajustement de cette section atteint la valeur cherchée seulement lorsqu'un point d'observation est ajouté dans la section suivante, la section 3. Autrement, la calibration du coefficient de Manning de cette section reste avec une valeur de différence relative plus élevée que les sections calibrées avec un point d'observation présent dans leur domaine.

Ici encore, la meilleure solution est donc amenée par la calibration avec les cinq points d'observation où un ajustement quasi parfait est obtenu pour les valeurs du coefficient de Manning. On y mesure notamment une erreur relative maximale de 0,34 %. Une correspondance parfaite est observée entre les hauteurs d'eau mesurées et les hauteurs d'eau simulées par la dernière simulation du modèle au niveau des points d'observation. Globalement, PEST réussit très bien à faire correspondre au modèle les données fournies en observation. Dans chacune des calibrations de

cette série, PEST a en effet été en mesure de retrouver les valeurs exactes de hauteur d'eau aux points d'observation en ajustant les coefficients de Manning des sections.

Les résultats de la calibration des sections 1 et 5 sont à prendre avec un certain niveau de méfiance lorsque la calibration ne contenait pas de point d'observation. Le processus de calibration n'a pas été en mesure de conclure avec certitude que la variation de ses coefficients de Manning améliorerait la fonction objective alors leur valeur finale peut être quelque peu arbitraire.

Il a aussi été remarqué qu'en l'absence de mesures relevées directement dans une certaine région, l'ajout progressif de points d'observation dans les sections avoisinantes aide à se rapprocher de la valeur recherchée dans la section sans points d'observation.



Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00

Figure 4-8 Résultats de la calibration utilisant 2 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ ajustées)

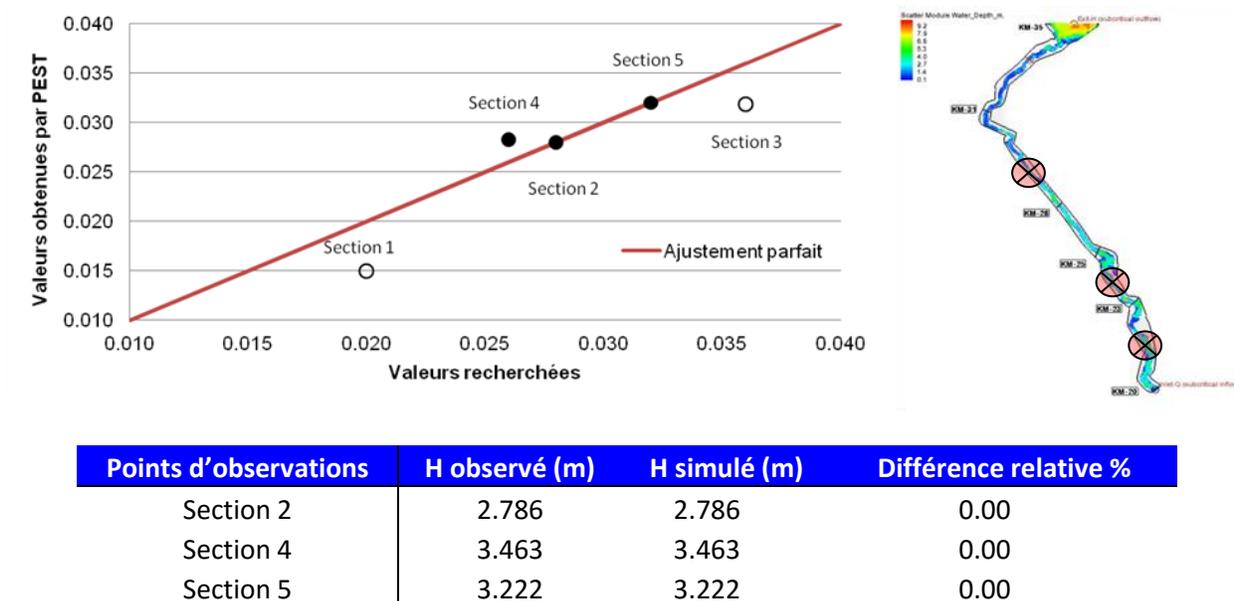


Figure 4-9 Résultats de la calibration utilisant 3 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ ajustées)

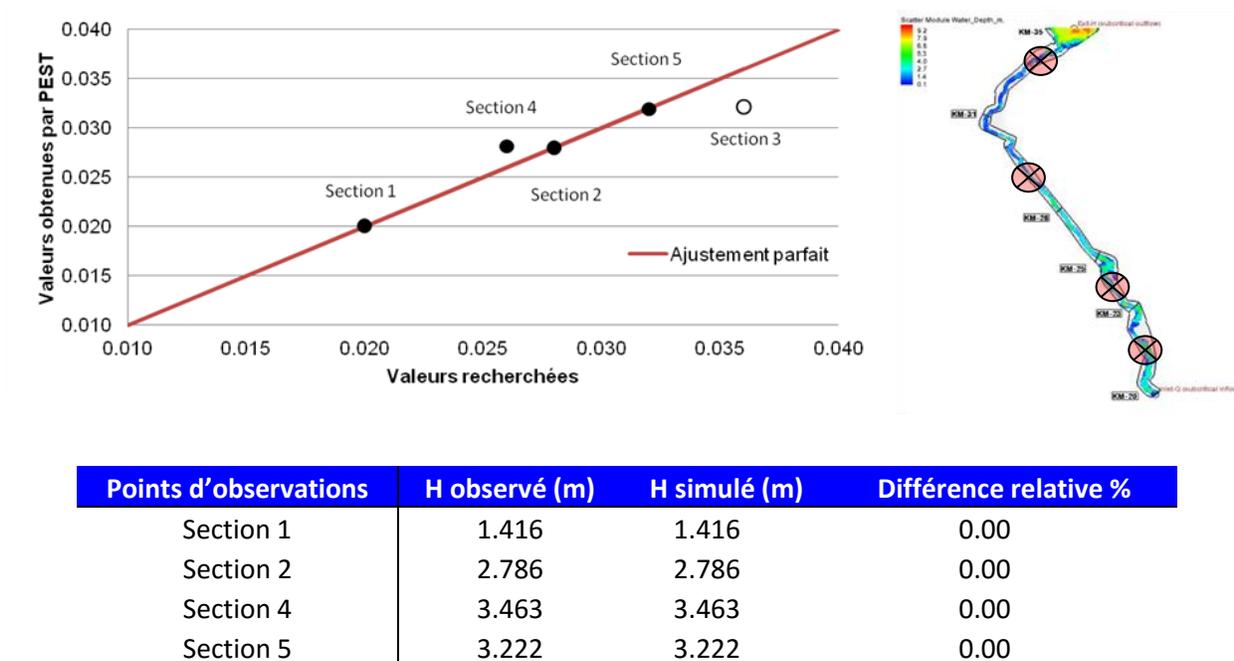
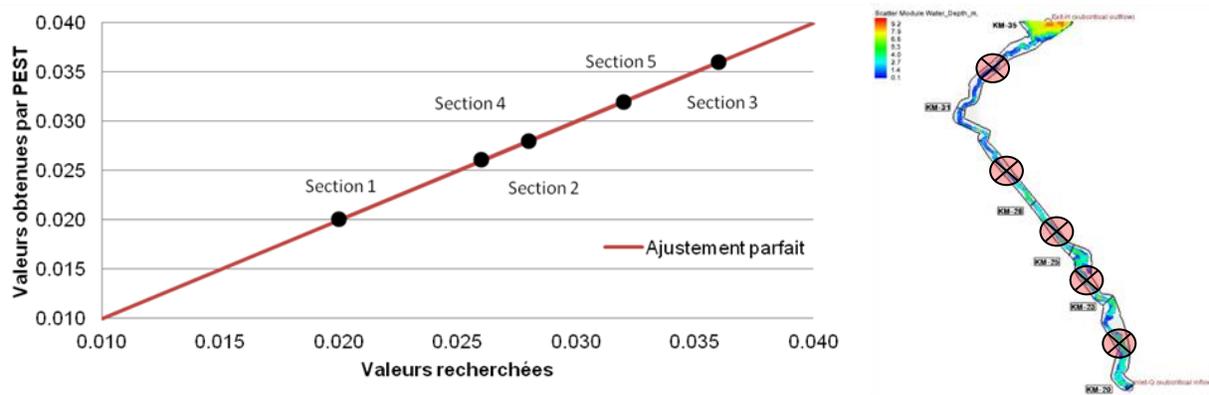


Figure 4-10 Résultats de la calibration utilisant 4 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ ajustées)



Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.416	1.416	0.00
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 3	3.551	3.551	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

Figure 4-11 Résultats de la calibration utilisant 5 points d'observation au centre des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ ajustées)

4.1.2 Points d'observation aux frontières des sections

La deuxième série de calibration tente de calibrer le modèle en ayant recours à des points d'observation situés aux frontières des sections et aux jonctions de celles-ci. La première calibration de cette série dispose de deux points d'observation, un à la jonction des sections 2 et 3 et un à la jonction des sections 4 et 5. Suivant le même ordre d'idée que la série précédente, le nombre de points augmente progressivement pour finalement avoir recours à 6 points d'observation : un à chaque jonction des sections et un près de chacune des frontières amont et aval. Les figure 4-12 à 4-16 présentent les détails des résultats des essais de calibration.

Les premières tentatives de calibration avec 2 et 3 points respectivement montrent que les sections en aval des points d'observation voient leur coefficient de Manning atteindre la valeur recherchée. Le positionnement du point à la frontière joignant les deux sections semble donc avantager la section en aval tandis que la section amont ne semble pas en bénéficier.

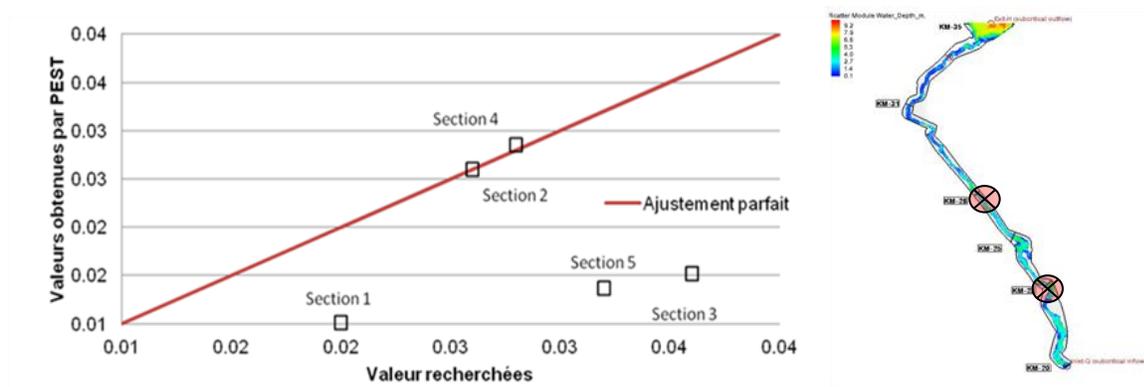
À la deuxième simulation, un point d'observation est ajouté à la frontière amont de la section 5. Suite à la calibration, le coefficient de Manning de la région 5 voit son erreur relative se rapprocher de la valeur recherchée.

À l'ajout d'un quatrième point d'observation à la frontière des sections 1 et 2, les coefficients de Manning sont presque tous calibrés à l'exception de la section 3 qui reste à peine inchangée de sa valeur de départ. On remarque donc que le point d'observation à la frontière aval n'est pas absolument nécessaire à la bonne calibration de la section 1, mais aide à réduire l'erreur de calibration.

À la dernière simulation, six points d'observation sont utilisés, ce qui permet à PEST d'atteindre un ajustement presque sans faute. L'utilisation de points d'observation à la frontière des sections permet d'éliminer l'influence négative des sections non calibrées sur la section en amont qui a été remarquée lors de la série précédente.

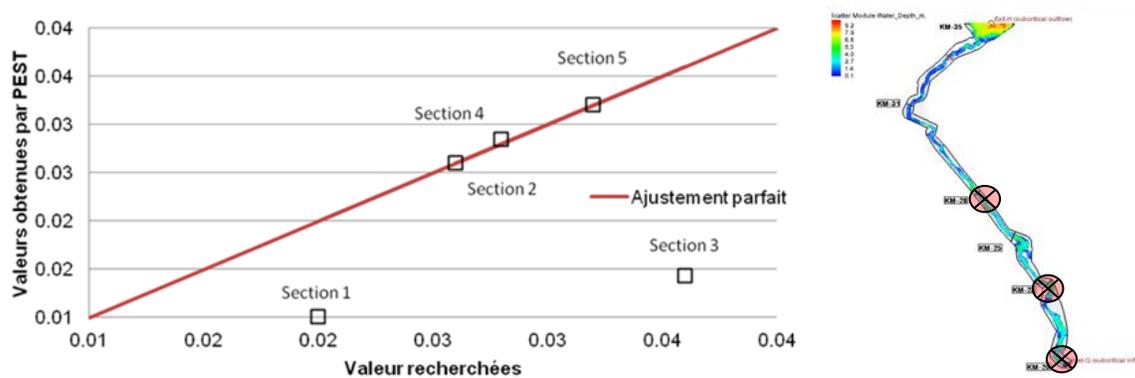
L'influence de la position du point d'observation sur la calibration n'a pas été approfondie en détail afin de stipuler sur l'endroit exact à partir duquel le point d'observation n'aide plus à calibrer la région dans laquelle il se trouve ou encore de déterminer la distance à partir de laquelle les points d'observation ne subiront plus l'influence d'une section aval mal calibrée.

La position des points d'observation a donc une certaine influence sur les résultats de la calibration. Lorsqu'ils sont situés au centre des sections, il est requis d'avoir un minimum d'un point d'observation par section ayant un coefficient de Manning à calibrer afin d'avoir des estimations fiables des paramètres. Lorsque les points d'observation sont près des limites des différentes sections, la calibration réussit à obtenir de bons résultats pour la section directement en aval du point d'observation. Pour ce qui est des sections limites, c'est-à-dire les sections associées à une condition frontière, il est préférable de fournir un point d'observation supplémentaire à la section amont tandis que la section aval peut être relativement bien estimée avec seulement un point à la frontière des deux dernières sections.



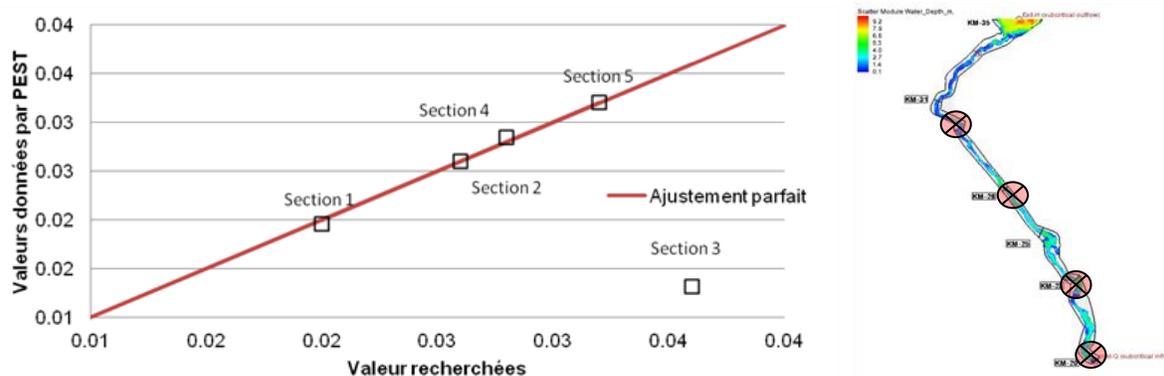
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
S2 / S3	3.537	3.537	0.00
S4 / S5	4.305	4.305	0.00

Figure 4-12 Résultats de la calibration utilisant 2 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)



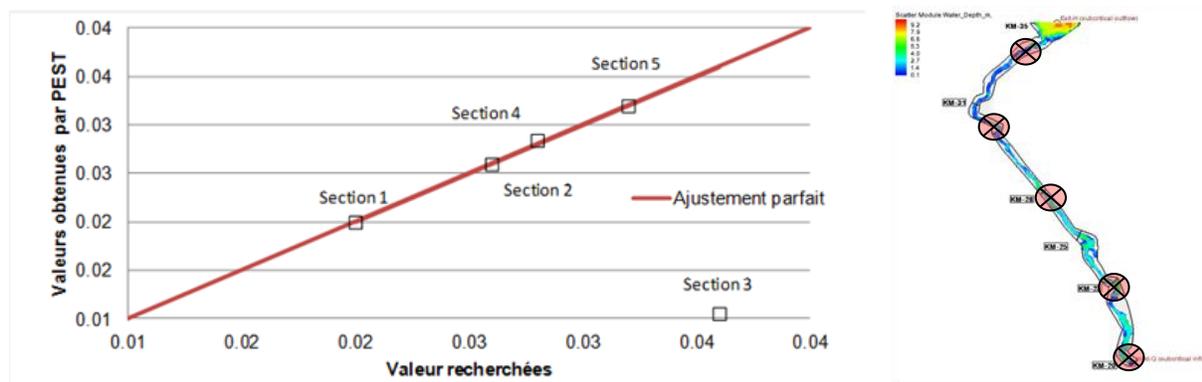
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
S2 / S3	3.537	3.537	0.00
S4 / S5	3.539	3.539	0.00
Amont	2.533	2.533	0.00

Figure 4-13 Résultats de la calibration utilisant 3 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)



Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
S1 / S2	1.277	1.277	0.00
S2 / S3	3.537	3.537	0.00
S4 / S5	4.305	4.305	0.00
Amont	2.533	2.533	0.00

Figure 4-14 Résultats de la calibration utilisant 4 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)



Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Aval	1.800	1.800	0.01
S1 / S2	1.277	1.279	0.13
S2 / S3	3.537	3.537	0.00
S4 / S5	4.305	4.305	0.00
Amont	2.533	2.533	0.00

Figure 4-15 Résultats de la calibration utilisant 5 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)



Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Aval	1.800	1.800	0.02
S1 / S2	1.277	1.2777	0.05
S2 / S3	3.537	3.5364	0.02
S3 / S4	3.539	3.539	0.00
S4 / S5	4.305	4.305	0.00
Amont	2.533	2.533	0.00

Figure 4-16 Résultats de la calibration utilisant 6 points d'observation aux frontières des sections (hauteur d'eau seulement & valeurs de départ à 0,01)

4.2 Calibration avec hauteur d'eau et vitesse

La deuxième série de calibration assume la même méthodologie que la première soit l'utilisation d'un nombre croissant de points d'observation d'une calibration à l'autre. La différence réside dans le contenu des points d'observation. Dans cette série, les composantes de la vitesse sont ajoutées à la hauteur d'eau, augmentant la quantité d'information aidant à la calibration. Chaque point d'observation contient maintenant la hauteur d'eau, la vitesse dans la direction X et dans la direction Y ainsi que le module de ces deux valeurs.

La première calibration de cette série offre une meilleure qualité d'ajustement que les deux derniers cas homologues où seulement la mesure de hauteur d'eau servait à la calibration. Effectivement, avec seulement deux points d'observation, PEST a réussi à calibrer plus que convenablement quatre des cinq régions du modèle.

Avec l'ajout de points supplémentaires, la qualité de l'ajustement augmente plus rapidement que dans les cas précédents et l'état de calibration quasi parfait est atteint avec moins de points d'observation. En effet, les résultats obtenus à la calibration avec quatre points d'observation sont comparables à la calibration avec cinq points d'observation (points au centre des sections) et six points d'observation (points aux frontières des sections). À nombre égal de points d'observation, le cas contenant le plus d'information par points offre les meilleurs résultats.

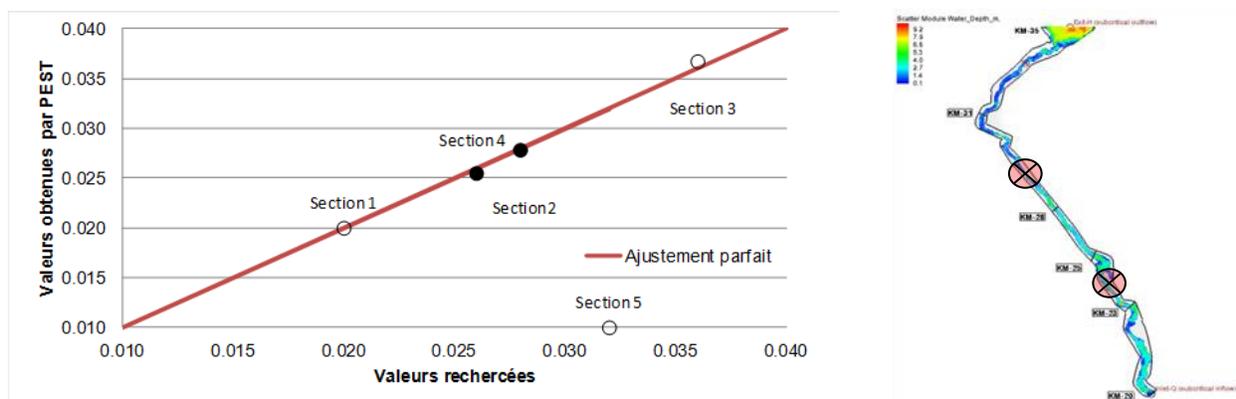
Avec l'ajout des vitesses dans le processus de calibration, PEST se voit obligé d'ajuster les paramètres en suivant un plus grand nombre de restrictions que lorsque la hauteur d'eau est utilisée. Dans le cas où seulement la hauteur est utilisée, seulement les paramètres des sections contenant un point d'observation sont ajustés afin de satisfaire à la recherche du minimum de la fonction objectif. À l'ajout des vitesses, les paramètres des sections amont et aval doivent être également ajustés afin de satisfaire à toutes les informations contenues dans les points d'observation. Au niveau du calcul de la fonction objectif, l'introduction des mesures de vitesse limite les valeurs des paramètres donnant la solution hydrodynamique recherchée.

Pour toutes les calibrations accomplies dans cette série, les valeurs de hauteur d'eau et de vitesse rapportées par les modèles montrent une différence relative avec leurs contreparties mesurée sous la barre des 1%. Ceci montre que PEST n'a pas de difficulté à retrouver les valeurs qu'on lui fournit dans les points d'observation.

La figure 4-21 montre la différence entre les niveaux d'eau simulés de la calibration utilisant tous les points d'observation et les niveaux d'eau observés avec les valeurs originales des paramètres. Les différences avec les valeurs simulées sont très similaires à celles obtenues avec la calibration utilisant la hauteur d'eau seulement. La section 2 fait exception en présentant un plus grand nombre de différences plus élevées dû à une certaine instabilité de la solution dans cette région particulière. Comparativement aux autres valeurs de coefficient de Manning obtenues, le coefficient de la section 2 est un peu surestimé (figure 4-20). Ailleurs, les différences entre les hauteurs d'eau simulées et mesurées sont de l'ordre de 0,005 m.

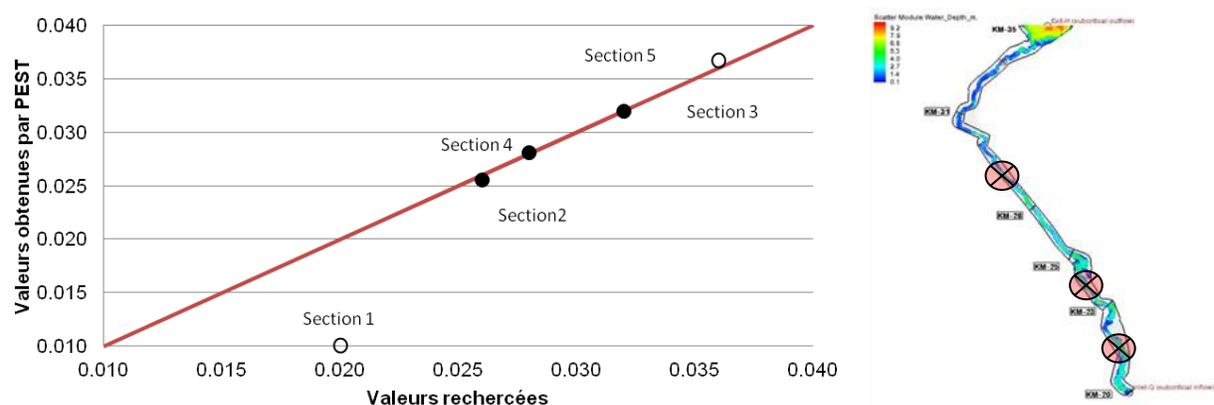
Une analyse des résultats donnés par le modèle montrent que plusieurs des points qui composent la section 2 présentent des solutions qui oscillent dans le temps. Contrairement aux autres points qui présentent des solutions fixes au bout de quelques heures de simulation, les valeurs calculées à ces points sont instables, causant une concentration des différences élevées montrées à la figure

4-21. Le point d'observation utilisé dans cette section a été soigneusement choisi en s'assurant que les variations de la solution étaient limitées au minimum. Il est possible de croire que les observations additionnelles soumises à la calibration (vitesses d'écoulement) aient une influence sur la solution de la calibration de la section 2 dû aux instabilités rencontrées dans cette région. Gonzalez (2016) a également relevé des instabilités lors de simulations avec SRH-2D.



Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S2	2.786	2.786	0.00	-1.23	-1.24	0.58	0.90	0.90	0.39	1.53	1.53	0.11
S4	3.463	3.463	0.00	-0.28	-0.28	0.11	0.54	0.54	0.26	0.61	0.61	0.33

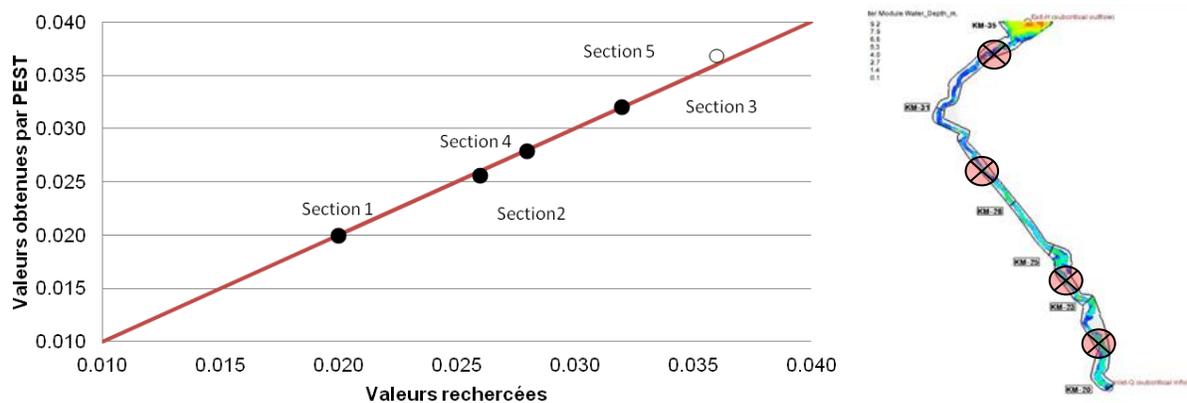
Figure 4-17 Résultats de la calibration utilisant 2 points d'observation



Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S2	2.786	2.786	0.00	-1.23	-1.24	0.38	0.90	0.90	0.51	1.53	1.53	0.05
S4	3.463	3.463	0.00	-0.28	-0.28	0.04	0.54	0.54	0.19	0.61	0.61	0.26

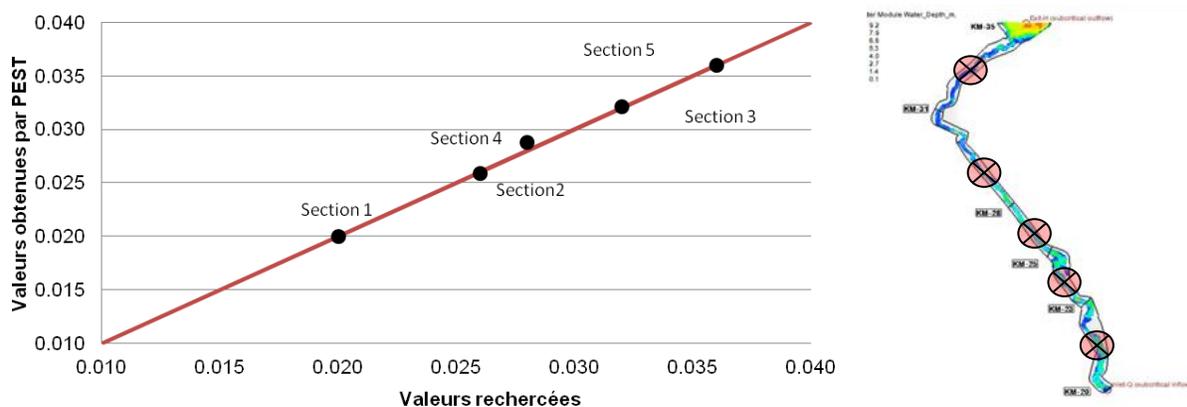
S5 | 3.222 3.2217 0.01 | -0.22 -0.21 0.05 | 0.37 0.37 0.00 | 0.43 0.43 0.07

Figure 4-18 Résultats de la calibration utilisant 3 points d'observation



Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.4151	0.06	1.15	1.14	0.10	0.94	0.94	0.12	1.48	1.48	0.03
S2	2.786	2.785	0.04	-1.23	-1.24	0.58	0.90	0.90	0.39	1.53	1.53	0.12
S4	3.463	3.4638	0.02	-0.28	-0.28	0.54	0.54	0.54	0.13	0.61	0.61	0.08
S5	3.222	3.2216	0.01	-0.22	-0.21	0.05	0.37	0.37	0.00	0.43	0.43	0.07

Figure 4-19 Résultats de la calibration utilisant 4 points d'observation



Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.415	0.07	1.15	1.142	0.37	0.94	0.94	0.26	1.48	1.48	0.01
S2	2.786	2.7911	0.18	-1.23	-1.23	0.08	0.90	0.90	0.85	1.53	1.52	0.47
S3	3.55	3.55	0.01	-0.56	-0.56	0.18	0.53	0.53	0.61	0.77	0.77	0.01

S4	3.463	3.4628	0.01	-0.28	-0.28	0.57	0.54	0.54	0.02	0.61	0.61	0.03
S5	3.222	3.225	0.09	-0.22	-0.21	0.28	0.37	0.37	0.16	0.43	0.43	0.12

Figure 4-20 Résultats de la calibration utilisant 5 points d'observation

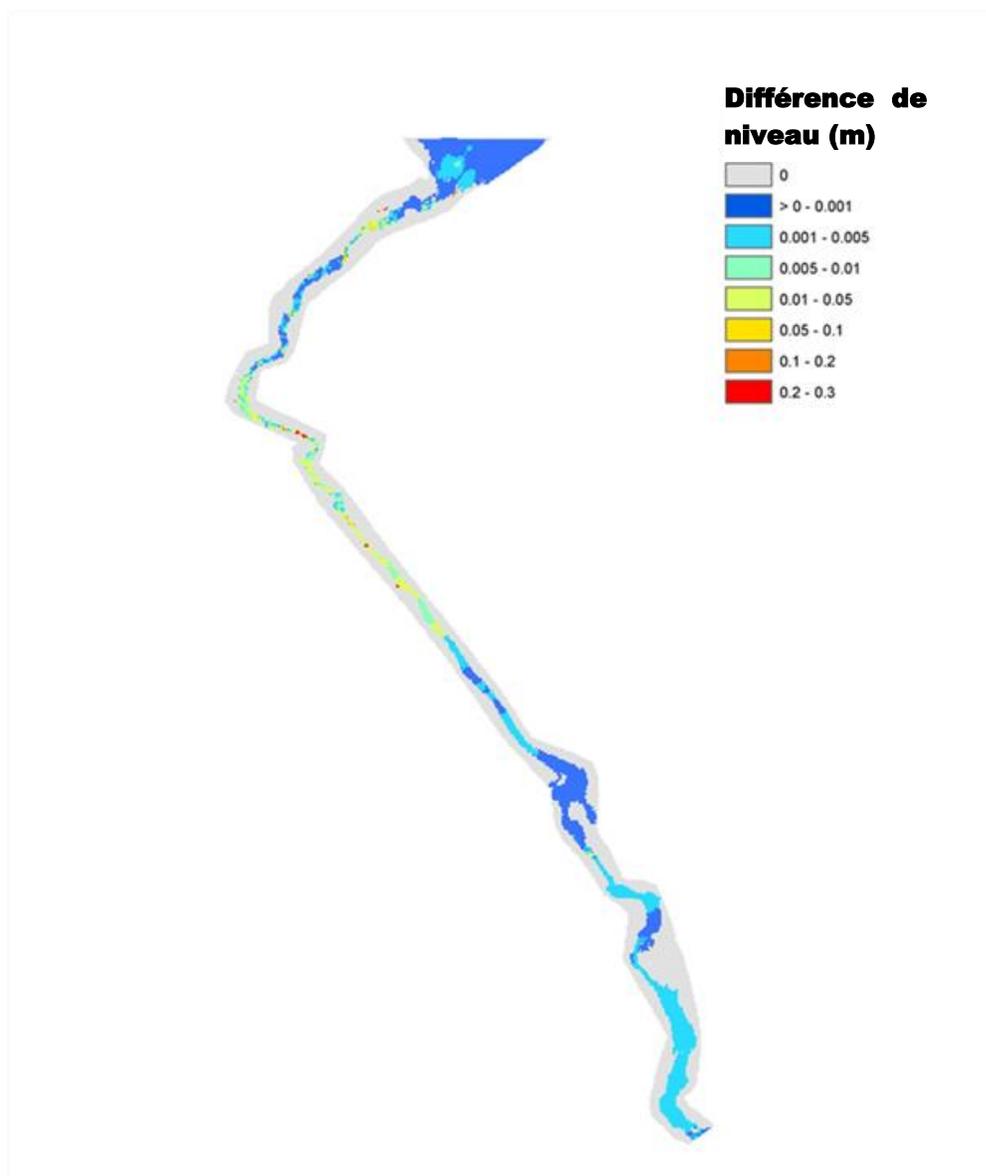


Figure 4-21 Différences de niveau entre les valeurs observées et les valeurs simulées – Hauteur d'eau et vitesse

4.3 Étude de sensibilité – mesures de hauteur d'eau

Dans cette section, on présente l'effet de la présence d'erreur dans les mesures de hauteur d'eau. Une première série de calibration est exécutée en introduisant successivement une erreur de plus ou moins 10 cm et de plus ou moins 5 cm sur l'ensemble des mesures de hauteur d'eau obtenues à la simulation originale. Chaque calibration se fait en incluant les cinq points d'observation. Cette série de calibration a pour objectif de mesurer l'impact de l'introduction de mesures de hauteurs d'eau erronées sur les résultats de la calibration.

Dans un cas, les points d'observation ne contiennent que la mesure de hauteur d'eau et dans le cas suivant, les points d'observation renferment également les mesures de vitesse d'écoulement. Ces deux cas ont pour objectif de considérer la possibilité que la présence d'information supplémentaire offre un avantage lors de la calibration face à la présence d'erreurs dans les mesures de hauteur d'eau. La présence d'une erreur dans les mesures de hauteur d'eau aura vraisemblablement un effet négatif sur la qualité du résultat de la calibration puisque les coefficients de Manning sont ajustés en fonction des valeurs de hauteur d'eau fournies. L'ajout d'information, comme dans ce cas-ci les mesures de vitesse, réduirait potentiellement l'écart entre les résultats recherchés et ceux obtenus dans le cas où seulement les hauteurs d'eau sont prises en compte.

4.3.1 Hauteur d'eau seulement

Dans les cas où la calibration est faite en réduisant les valeurs de hauteur d'eau de plus ou moins 10 cm, les coefficients de Manning ont des écarts considérables avec les valeurs recherchées. Les erreurs sont généralement plus élevées dans le cas des simulations avec des surestimations des hauteurs d'eau. Selon PEST, les coefficients de Manning issus de la calibration avec une surestimation de 10 cm des hauteurs d'eau s'éloignent plus de la réponse cherchée que dans le cas où les valeurs de hauteur d'eau sont sous-estimées. La géométrie des sections transversale de la rivière exigera évidemment une plus grande variation du coefficient de Manning afin d'augmenter le niveau de l'eau au-delà des plaines inondables et des berges à faible pente. En d'autres termes, il est plus « difficile », pour un même débit, d'augmenter le niveau de la rivière jusqu'à la valeur recherchée puisque la surface à couvrir est plus large.

La figure 4-22 présente les valeurs des coefficients de Manning obtenues pour chaque section en fonction de l'erreur introduite. La figure montre que les erreurs relatives sont un peu plus élevées

lorsque les hauteurs d'eau sont surestimées. Particulièrement pour les sections 1 et 2, les plus en aval de la rivière. Les sections 3 à 5 sont impactées de la même façon que l'erreur soit positive ou négative.

La section 3 et la section 5 contiennent toujours la plus faible erreur de calibration du coefficient de Manning due à la géométrie de la section transversale. La section 3 est très à l'étroit entre les vallées et ne présente pas de plaines inondables. La section 5 est aussi enclavée dans le relief. Les sections 1, 2 et 4 ont les plus grandes étendues inondables où l'on y retrouve des berges sablonneuses plutôt plates. La figure 4-22 montre aussi que la croissance de l'erreur relative suit une relation linéaire avec l'erreur introduite dans cette série où seulement les mesures de hauteur d'eau servent à aider à la calibration. Les figure 4-23 à 4-26 présentent en détail les résultats des calibrations en montrant la valeur recherchée des coefficients, la valeur obtenue par PEST et la différence relative entre ces deux valeurs.

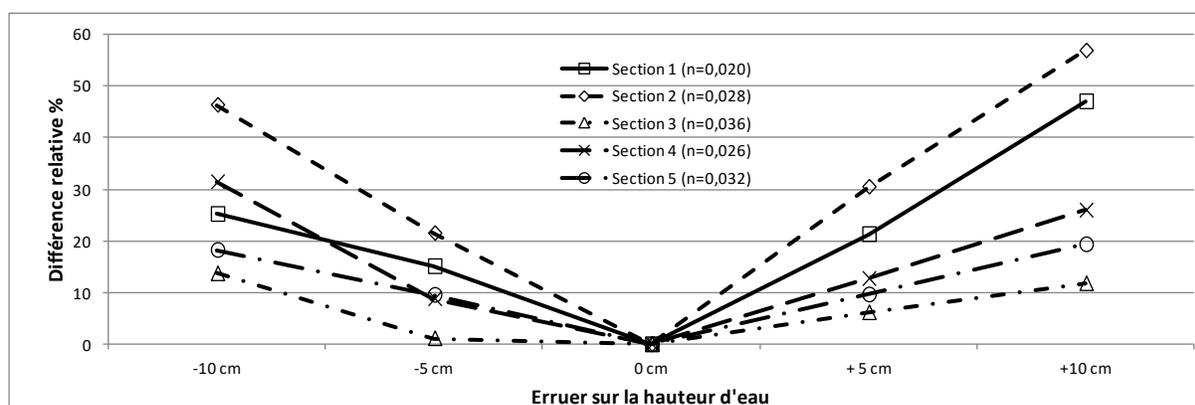


Figure 4-22 Études de sensibilité - résultats des calibrations en utilisant les hauteurs d'eau seulement – Hauteur d'eau seulement

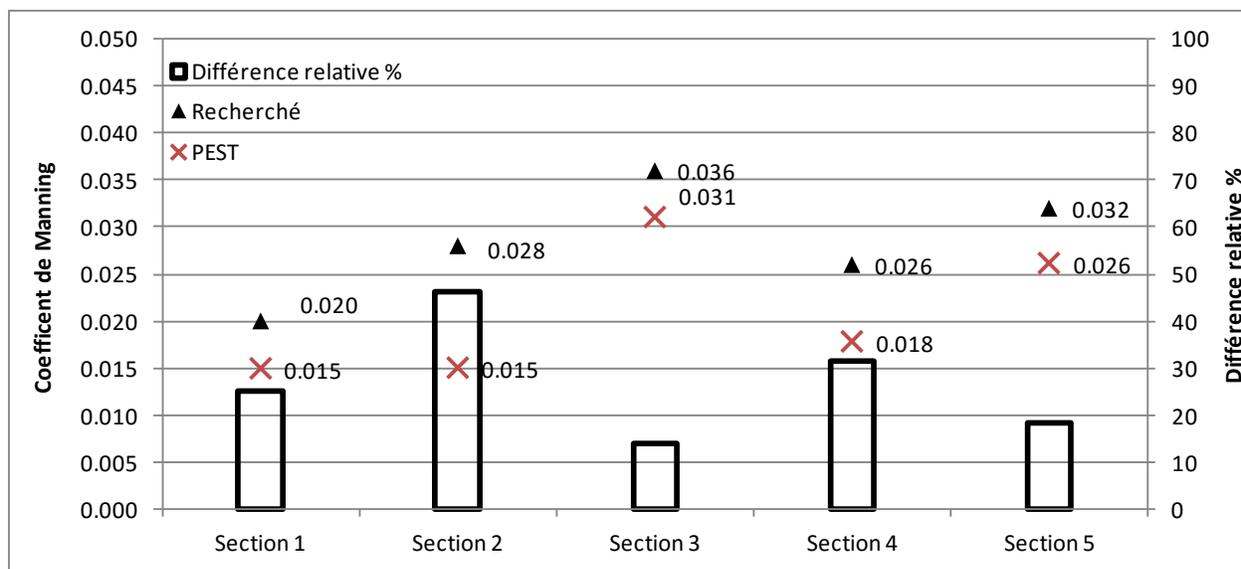


Figure 4-23 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 10 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau seulement

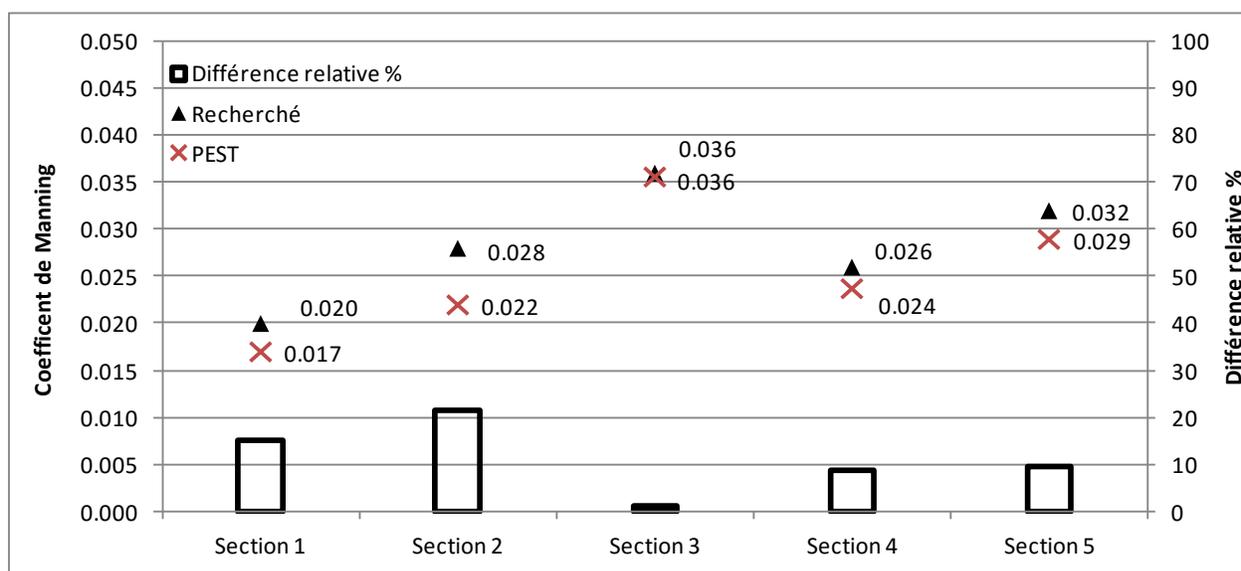


Figure 4-24 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 5 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau seulement

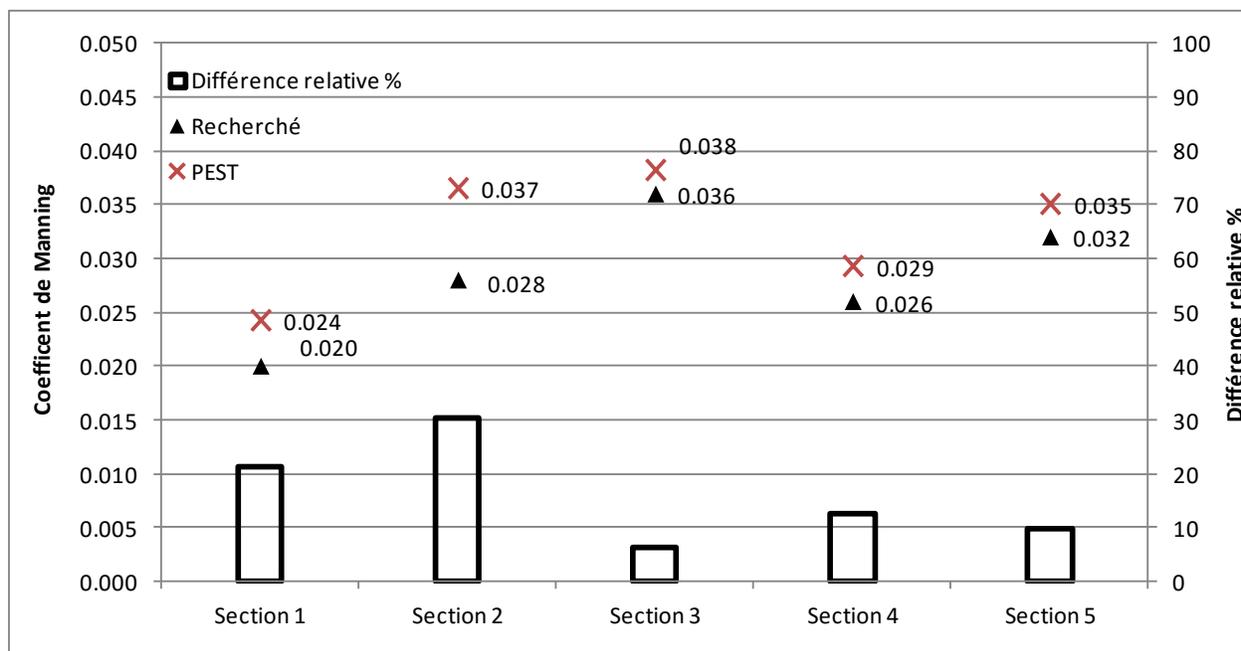


Figure 4-25 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 5 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau seulement

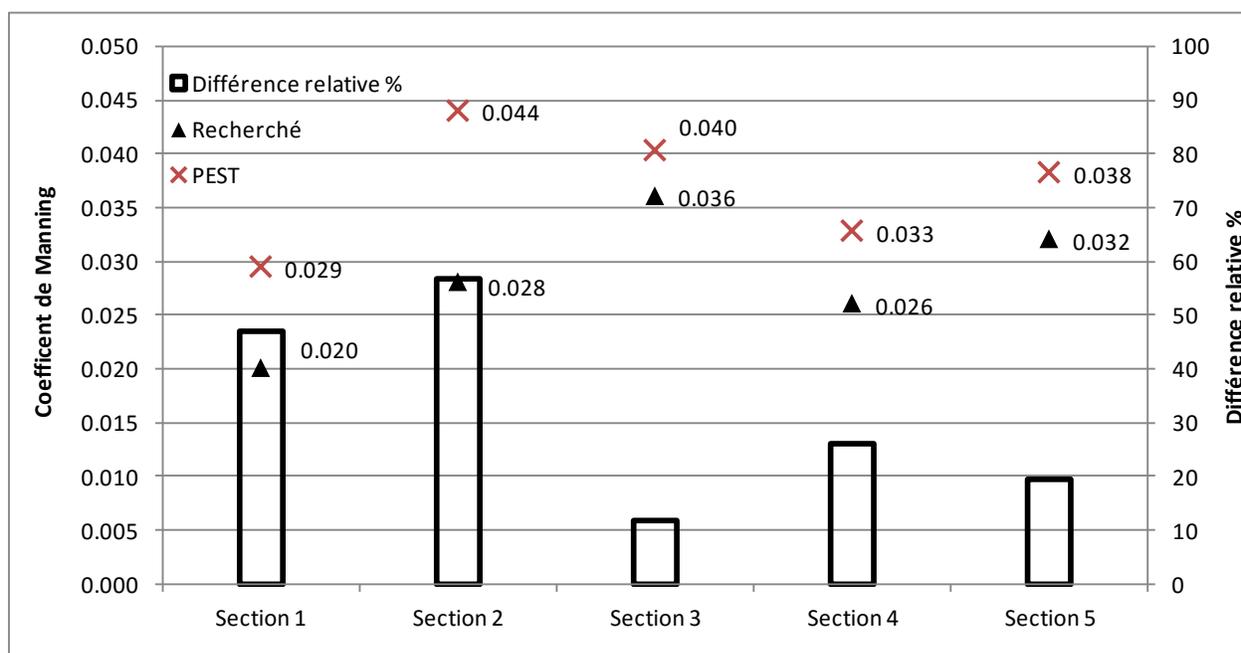


Figure 4-26 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 10 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau seulement

4.3.2 Hauteur d'eau et vitesse

La série de calibration suivante utilise les composantes de vitesse afin d'assister dans la calibration. On cherche à voir dans quelle mesure l'ajout d'information aide à redresser les résultats de la calibration avec des mesures erronées. Encore une fois ici, les hauteurs d'eau se voient introduire la même série d'erreurs que la série précédente soit -10 cm, -5cm, +5 cm et +10 cm. Il est à noter qu'aucune erreur n'est incorporée dans les mesures de vitesse.

L'ajout des composantes de la vitesse dans cette série de calibration amène des résultats qui donnent des erreurs plus faibles que dans le cas où seule la hauteur d'eau est utilisée pour la calibration. La figure 4-27 montre les résultats de la calibration des sections en fonction de l'erreur introduite. Dans ce cas-ci, l'erreur relative maximale est de 20% comparativement à 57% dans le cas où seulement la hauteur d'eau est utilisée.

Dans ce cas-ci, en plus d'être plus faibles, les erreurs relatives ont des valeurs d'un ordre de grandeur comparable entre elles; ou plutôt l'écart entre les coefficients de Manning calculés, pour une même section, est plus faible d'une calibration à l'autre. Cette réduction de l'écart entre la valeur recherchée et la valeur calculée donne une allure beaucoup plus estompée au graphique.

La section 1 subit une forte réduction de l'erreur relative et présente le meilleur ajustement de cette série avec des erreurs relatives aussi faibles que 2 % contrairement à la série précédente où la section présentait des différences relatives entre 15 % et 47 %.

Les coefficients de Manning qui présentent les erreurs relatives les plus faibles ont une meilleure correspondance entre les vitesses mesurées et simulées et une plus grande différence entre la hauteur d'eau mesurée et simulée. Lorsque PEST ajuste plus précisément les valeurs de vitesse avec les valeurs mesurées, l'ajustement du coefficient de Manning est plus près de la valeur recherchée malgré l'erreur introduite dans la hauteur d'eau. Cette même constatation est applicable pour l'ajustement des valeurs de la section 2 dans les cas où l'erreur introduite sous-estime les mesures de hauteur d'eau : les mesures de vitesse simulées sont plus près des valeurs mesurées au détriment des mesures de hauteur d'eau qui sont moins bien agencées.

La figure 4-28 montre la relation entre l'erreur de calibration sur les paramètres et l'erreur entre les valeurs calculées par le modèle et les valeurs mesurées. Une série rassemble les différences relatives des coefficients de Manning en fonction de la correspondance entre la mesure de hauteur

d'eau mesurée et modélisée pour toutes les calibrations de la série. L'autre série présente aussi cette relation en fonction de la somme des différences relative des mesures de vitesses mesurées et modélisées. On remarque qu'une meilleure correspondance entre les mesures de hauteur d'eau amène à des résultats de calibration beaucoup plus imprévisibles. De faibles différences entre les valeurs mesurées et modélisées mènent à une large gamme d'erreurs sur l'estimation des paramètres de calibration. Une meilleure correspondance entre les différentes valeurs de vitesses mène à de faibles différences entre les valeurs des paramètres recherchées et modélisées.

Les figure 4-29 à 4-32 présentent les résultats plus détaillés des calibrations. Les figures montrent la valeur recherchée des coefficients, la valeur obtenue par PEST lors de la calibration et la différence relative entre ces deux valeurs.

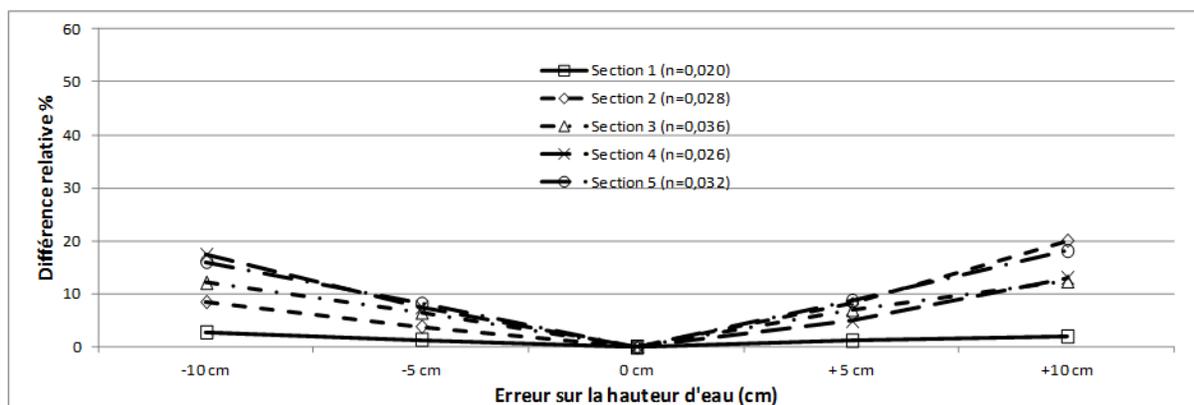


Figure 4-27 Études de sensibilité - résultats des calibrations en utilisant les hauteurs d'eau et les vitesses

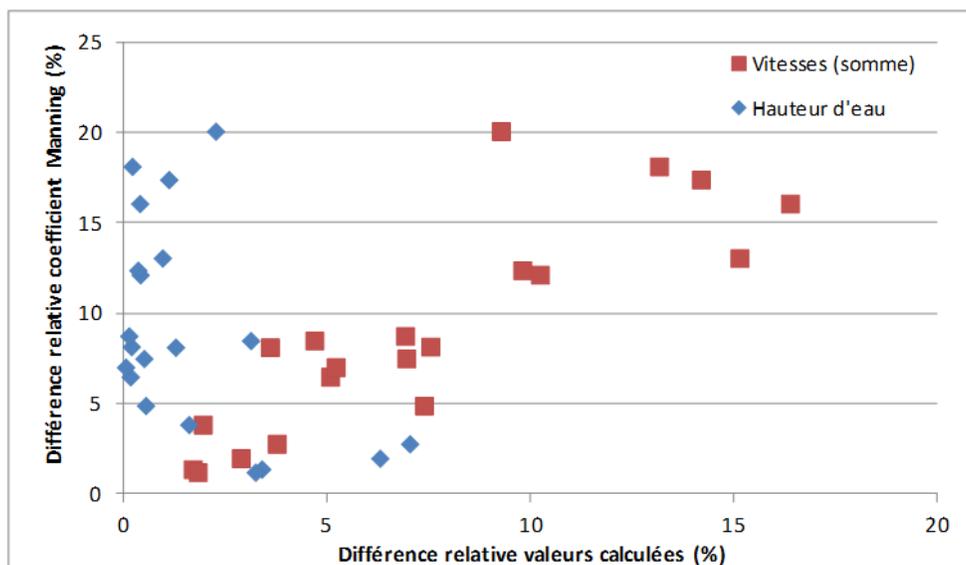


Figure 4-28 Distributions de l'erreur relative du paramètre de calibration en fonction de l'ajustement des mesures fournies

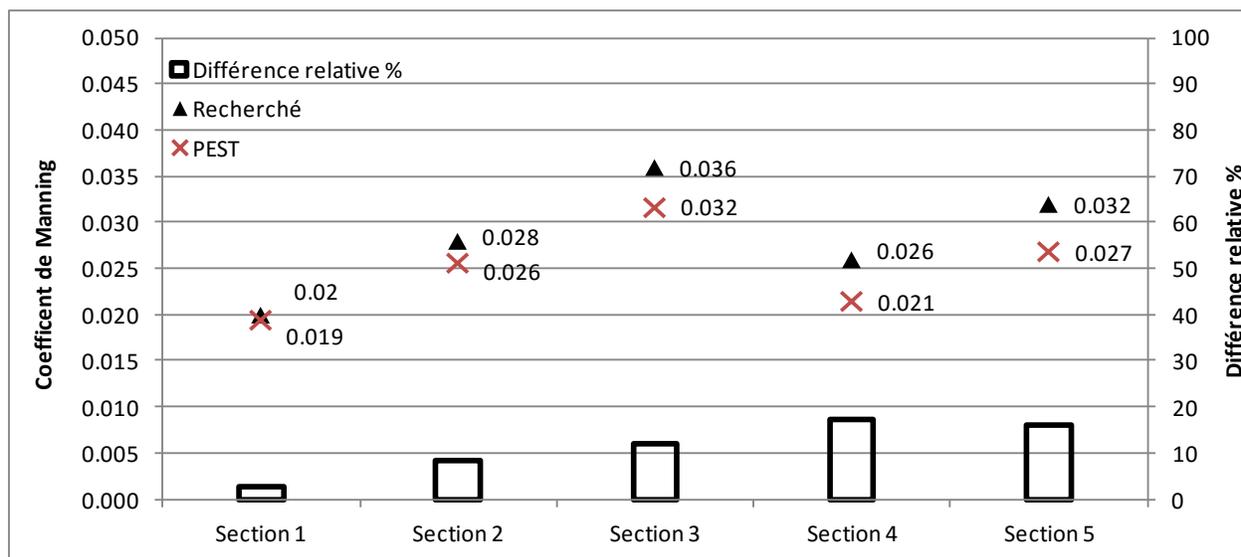


Figure 4-29 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 10 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau et vitesse

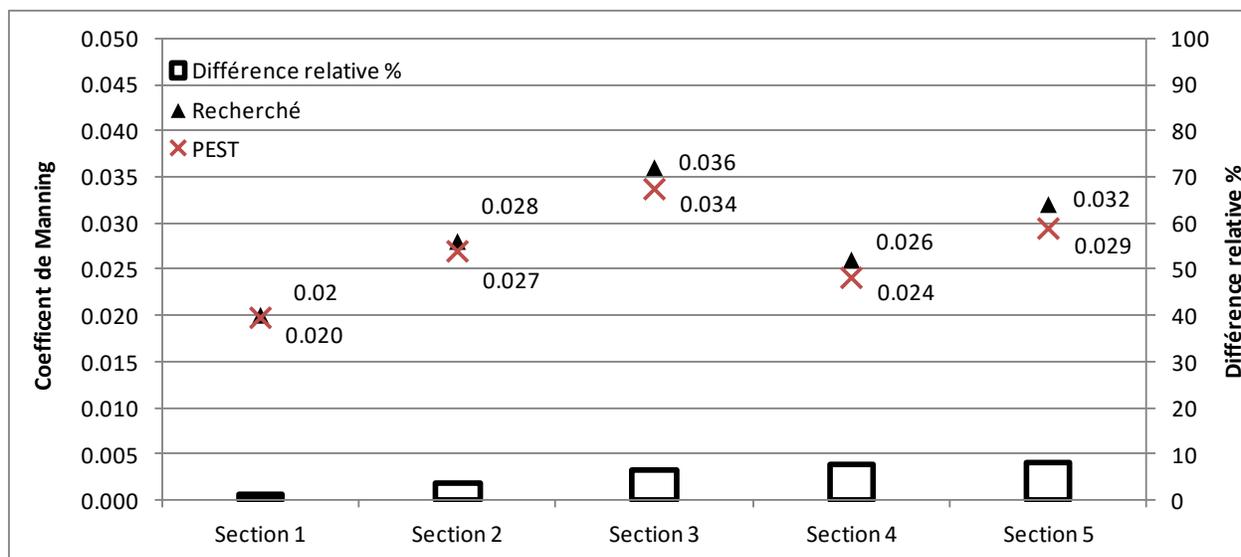


Figure 4-30 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 5 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau et vitesse

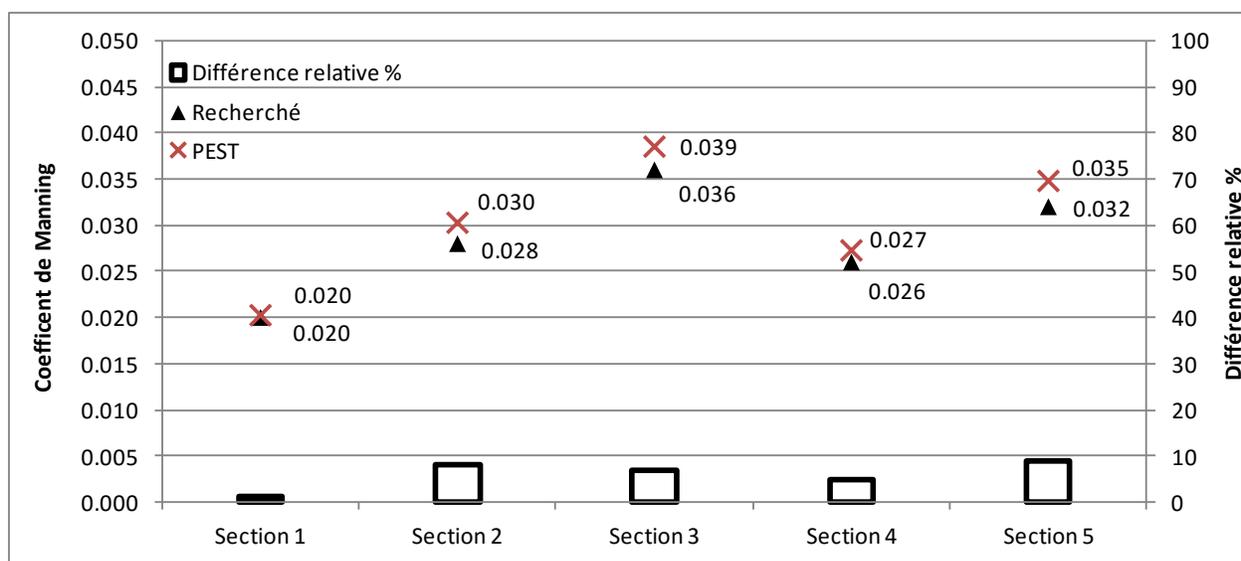


Figure 4-31 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 5 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau et vitesse

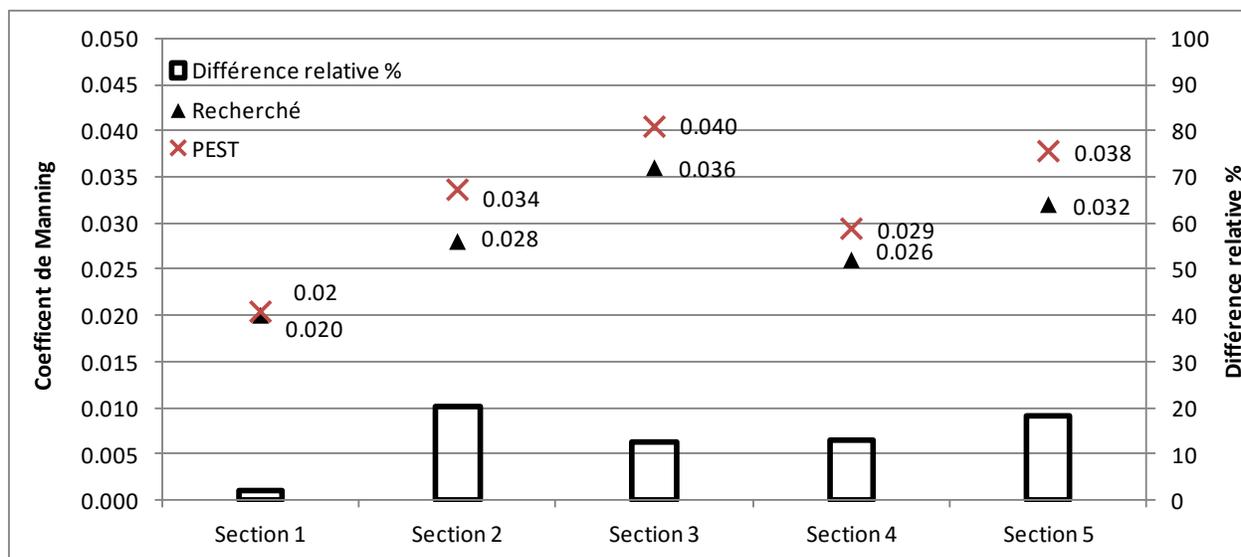


Figure 4-32 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 10 cm sur les hauteurs d'eau – Hauteur d'eau et vitesse

4.4 Étude de sensibilité – Mesure de débit

Dans cette série de calibration, une erreur est introduite dans le débit entrant du modèle en utilisant à la fois les mesures de hauteur d'eau et les mesures de vitesses dans le processus de calibration. Au total, huit calibrations ont eu lieu avec des débits augmentés et diminués de 5 %, 10%, 15 % et 20 %.

La figure 4-33 montre les résultats de cette série de calibration. La partie gauche du graphique, montrant les résultats de la calibration utilisant un débit réduit, montre une relation quasi linéaire entre l'erreur de calibration des paramètres et la réduction du débit. La partie de droite du graphique présente une relation beaucoup plus erratique. Bien que la tendance générale montre que l'erreur s'accroît avec l'augmentation du débit, certaines sections ont des résultats de calibration un peu plus imprévisibles.

La figure 4-34 montre la relation entre l'erreur de calibration des paramètres et l'erreur des valeurs de hauteur d'eau et de vitesses calculées par le modèle et les valeurs mesurées. Une série présente les différences relatives des coefficients de Manning en fonction de la correspondance entre la hauteur d'eau mesurée et modélisée. L'autre série présente la relation en fonction de la somme des différences relatives entre les mesures de vitesses mesurées et modélisées. Comme dans la série de calibration précédente, les paramètres qui ont eu les meilleurs résultats de calibration, c'est-à-dire la différence relative la moins élevée, sont ceux qui ont présenté une meilleure correspondance entre les vitesses mesurées et calculées par le modèle et les mesures de vitesses observées au détriment des mesures de hauteur d'eau modélisée et observée. Lorsque la calibration priorise l'ajustement des hauteurs d'eau, les erreurs de calibration des paramètres sont beaucoup plus imprévisibles.

Les figures 4-35 à 4-42 présentent les résultats plus détaillés des calibrations. Les figures montrent la valeur recherchée des coefficients, la valeur obtenue par PEST lors de la calibration et la différence relative entre ces deux valeurs.

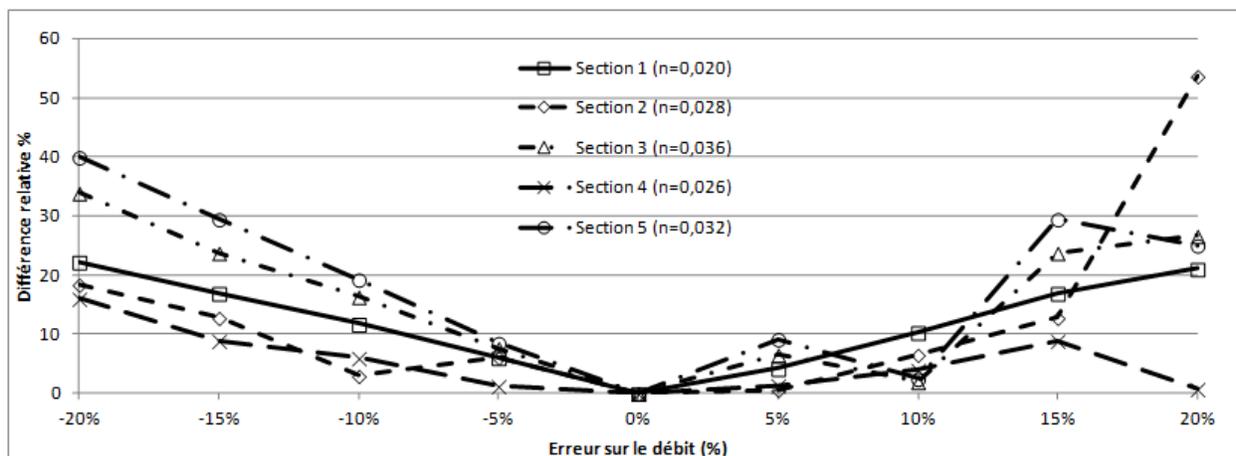


Figure 4-33 Résultats des calibrations - étude de sensibilités sur le débit

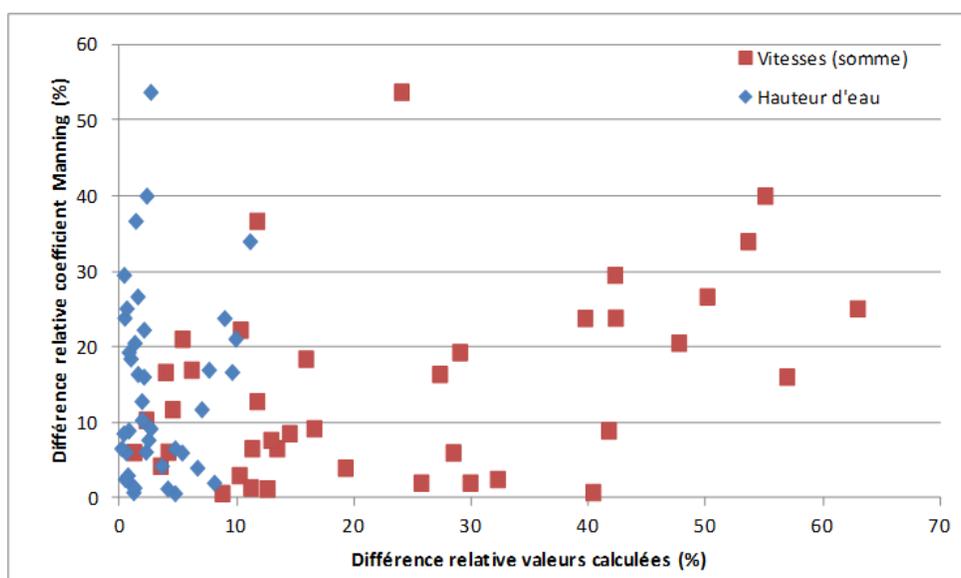


Figure 4-34 Distributions de l'erreur relative du paramètre de calibration en fonction de l'ajustement des mesures fournies

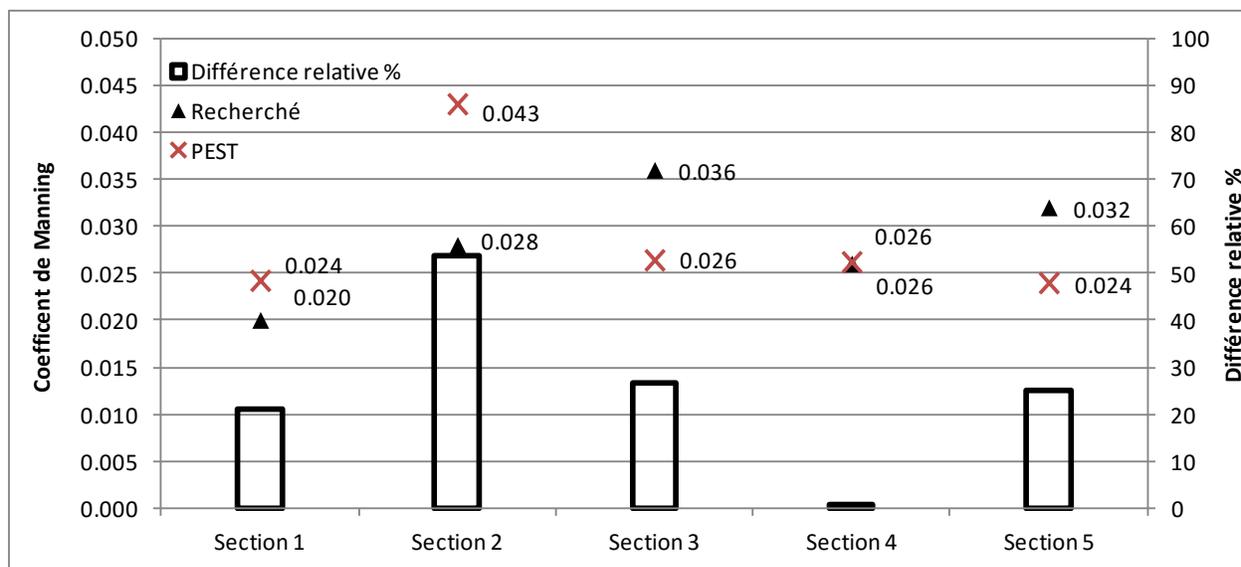


Figure 4-35 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 20 % sur le débit entrant

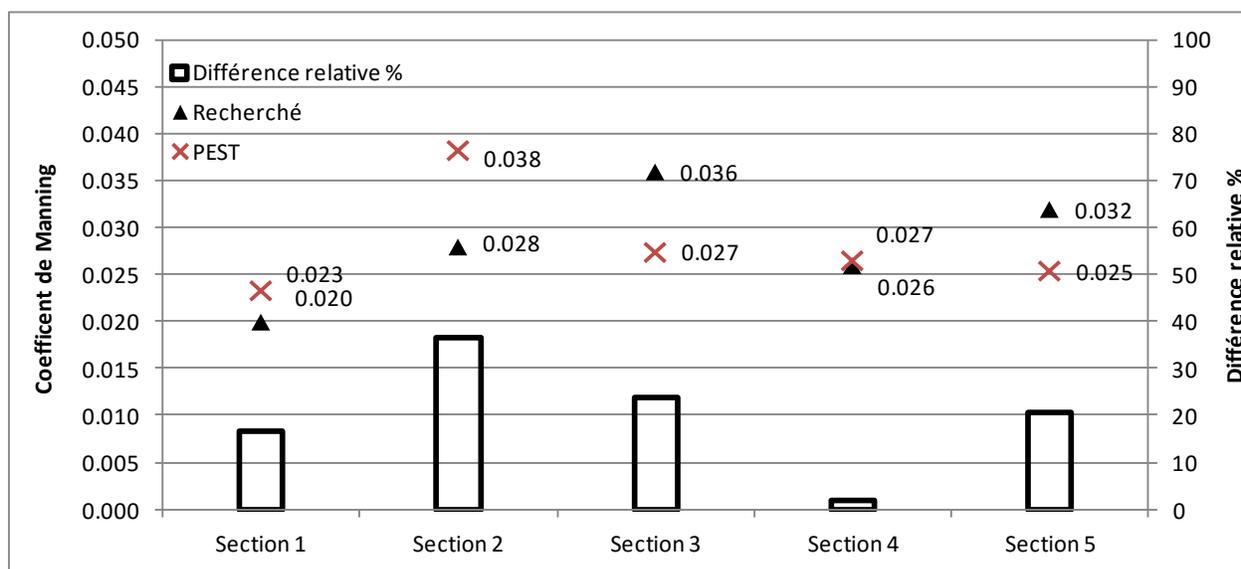


Figure 4-36 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 15 % sur le débit entrant

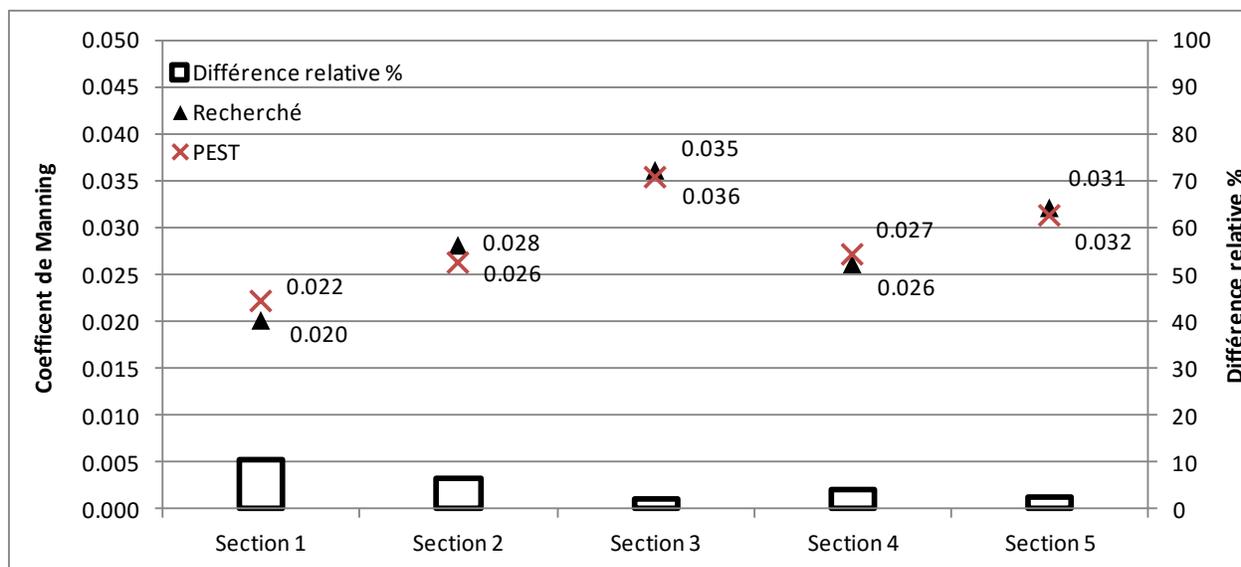


Figure 4-37 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 10 % sur le débit entrant

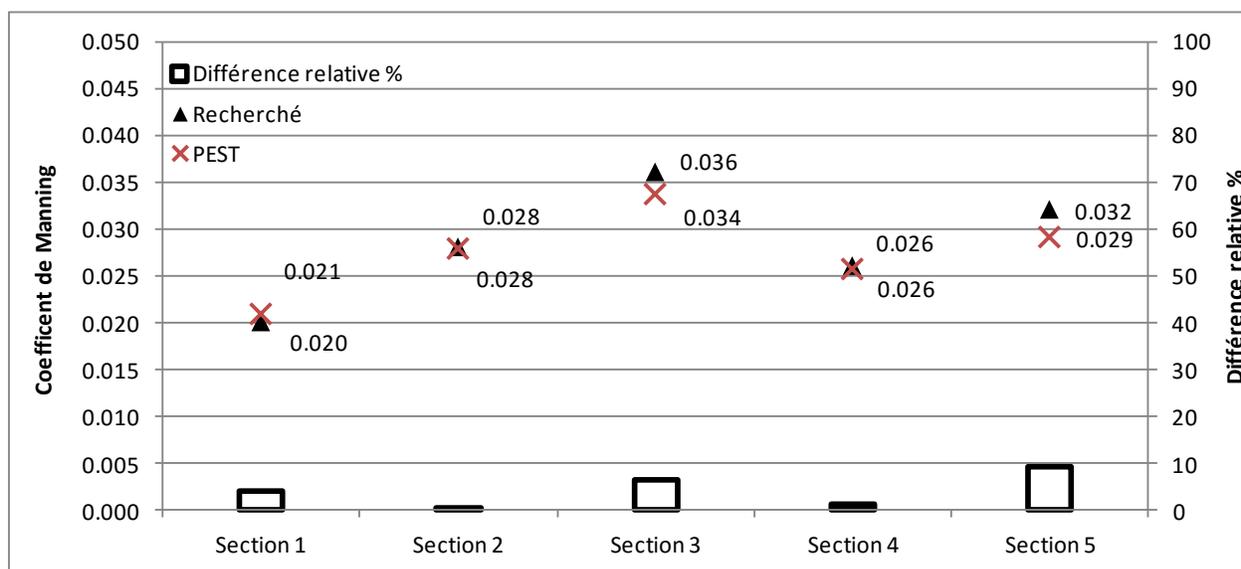


Figure 4-38 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de + 5 % sur le débit entrant

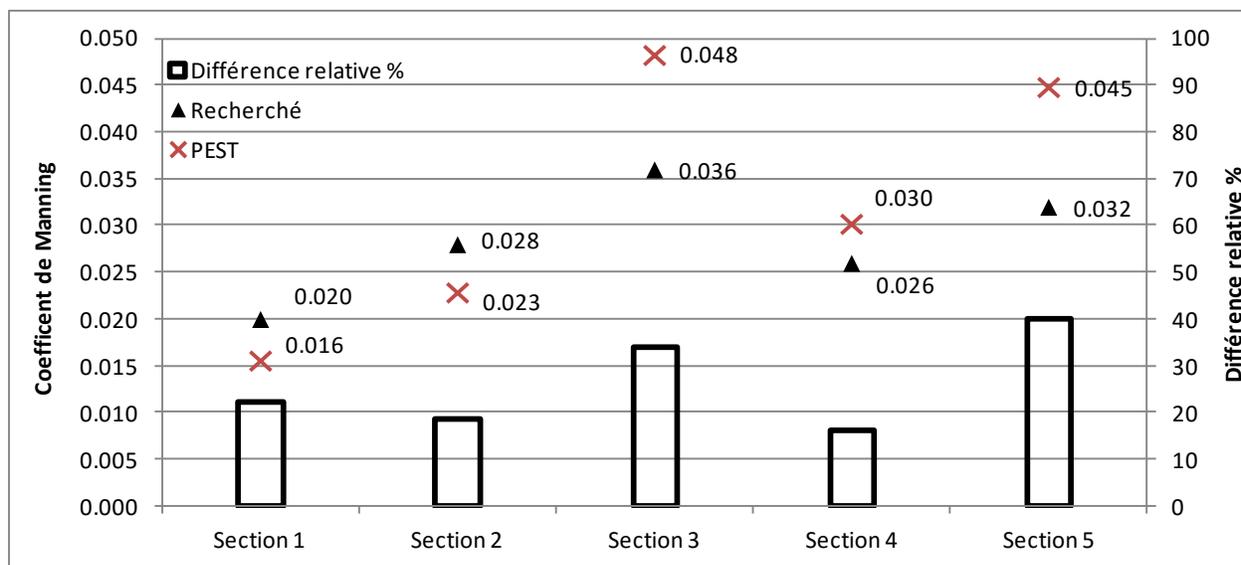


Figure 4-39 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 20 % sur le débit entrant

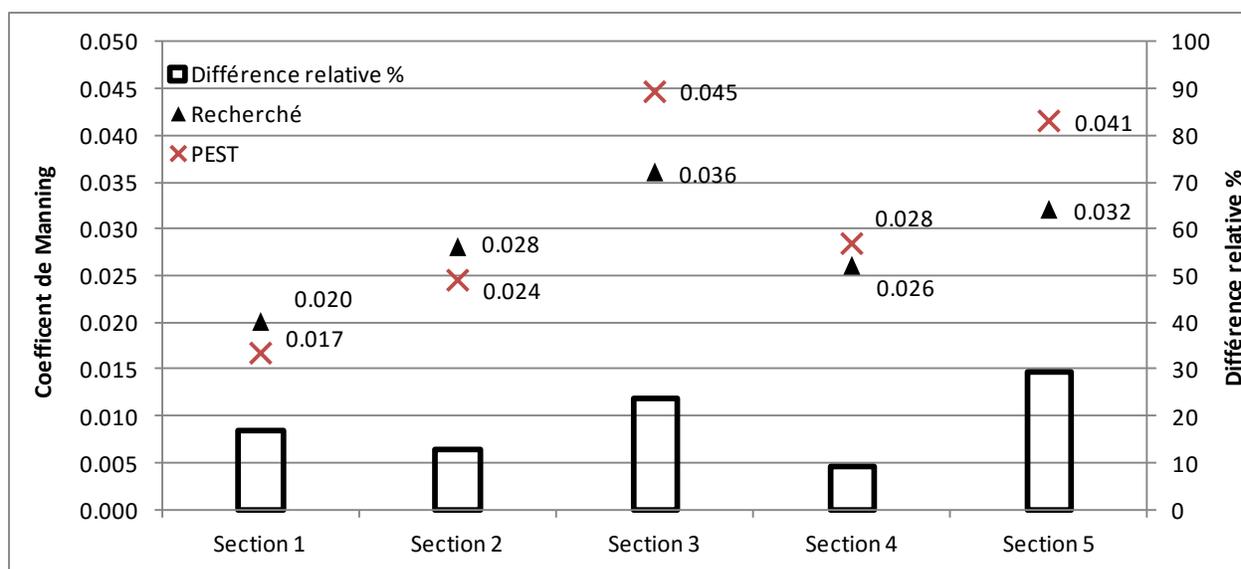


Figure 4-40 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 15 % sur le débit entrant

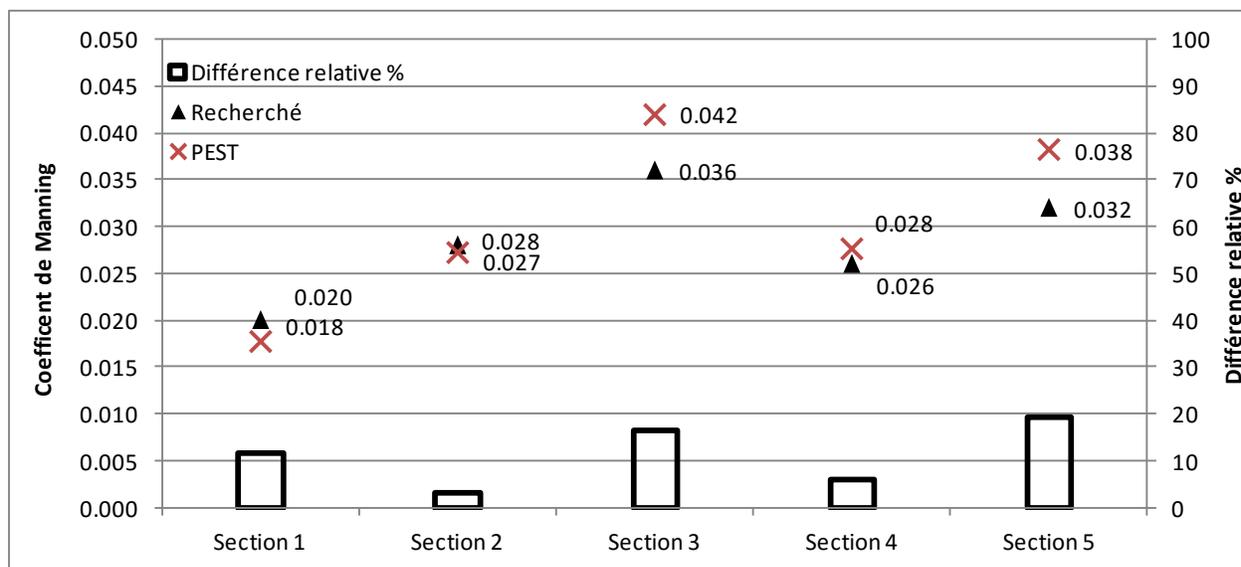


Figure 4-41 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 10 % sur le débit entrant

-5

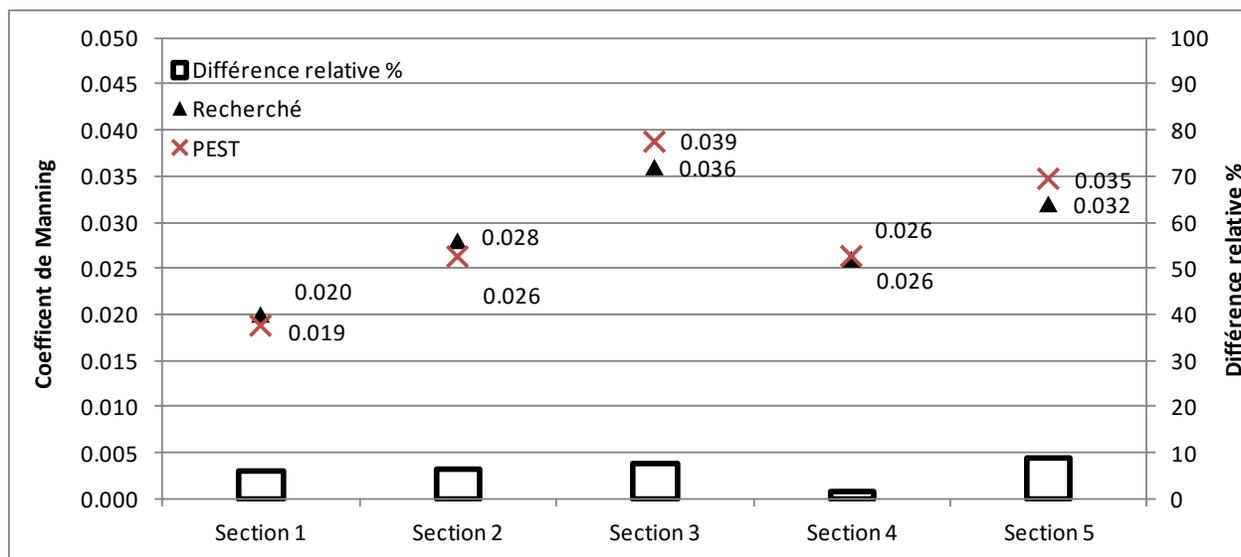


Figure 4-42 Études de sensibilité - résultats de la calibration avec un différentiel de - 5 % sur le débit entrant

CHAPITRE 5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans le processus de construction d'un modèle hydraulique de rivière, l'étape de la calibration est essentielle, mais requiert beaucoup de temps dans sa méthode manuelle traditionnelle. L'outil de calibration automatique O.P.P.S. a été mis au point afin d'aider dans la tâche de la calibration des modèles hydrauliques.

L'outil conçu sert de correspondance entre le logiciel de modélisation hydraulique SRH-2D et PEST, un outil de calibration automatique basé sur l'algorithme de Gauss-Marquardt-Levenberg. O.P.P.S permet une préparation rapide du processus de calibration en réduisant au minimum la complexité des étapes nécessaires à la mise en marche qui peut être exhaustive en temps normal.

L'utilisateur n'a qu'à fournir son projet SHR-2D et identifier les différentes valeurs mesurées ainsi que les paramètres qu'il souhaite calibrer et l'outil prépare et coordonne les fichiers nécessaires à la calibration. O.P.P.S assure le lancement et la gestion de la calibration en arrière-plan sans avoir besoin des interventions humaines requises par SRH-2D dans son utilisation normale. Les interactions normalement requises afin de lancer et de gérer SRH-2D sont automatisées, ce qui permet de rouler la calibration en continu sans déranger l'utilisateur.

L'outil mis au point a été utilisé pour des essais de calibration sur un modèle de rivière. Ce modèle a servi de base pour de multiples essais avec des configurations variables. Les essais de calibration ont eu lieu dans le but d'explorer différents scénarios de calibration dans lesquels le nombre de points d'observation, la position et le contenu de ceux-ci est variable. Les différents scénarios ont ensuite été analysés en observant la qualité de l'ajustement obtenue. Une étude de sensibilité suivant le comportement des calibrations face aux variations des mesures de hauteur d'eau et de débit a aussi été faite.

Le modèle a été construit en utilisant la topographie de la rivière Ha! Ha! suite au désastre de 1996 qui a modifié sa morphologie. La rivière a été divisée en cinq sections distinctes contenant chacune un coefficient de Manning différent. Le modèle compte plus de 15 km de rivière et il inclut les plaines inondables et les limites naturelles entourant la rivière.

Durant les essais de calibration, il est attendu que l'outil de calibration retrouve les valeurs recherchées des coefficients de Manning en utilisant les informations fournies dans les points d'observation qui sont disponibles pour la calibration.

En général, les essais de calibration montrent que PEST n'a aucune difficulté à retrouver les valeurs des mesures contenues dans les points d'observations en ajustant les paramètres du modèle, et ce, en quelques simulations. Pour les cas les plus complexes, l'outil de calibration a eu besoin de plus de lancements de simulations consécutives afin d'en arriver à la meilleure réponse possible. Le nombre de simulations requis dépendra de la complexité des scénarios et de la valeur des paramètres qui contrôlent la progression de l'algorithme de la simulation.

La série de calibration utilisant des points d'observation contenant uniquement des mesures de hauteur d'eau a montré qu'il est nécessaire d'avoir un moins un point d'observation par sections à calibrer afin d'avoir un ajustement parfait des paramètres. Les sections ne contenant pas de points d'observation ne sont pas calibrées convenablement ce qui a un effet négatif sur la section qui se retrouve directement en amont. Le coefficient de Manning de la section amont sera ajusté afin de compenser l'erreur introduite par la mauvaise calibration de la section en aval. Cette constatation a été faite alors que certaines valeurs de départ sont restées pratiquement inchangées, faute d'information aidant à la calibration de ces sections. Il serait donc possible de réduire cette erreur en prenant le soin d'estimer convenablement la valeur de départ des coefficients.

Lorsque les points sont utilisés aux frontières joignant deux sections, ils aident à calibrer les sections situées en aval et ont très peu d'influence sur les sections en amont. En utilisant ce positionnement, l'influence négative des sections mal calibrées n'a plus son influence négative sur le point d'observation en amont due à la plus grande distance qui les sépare.

Lorsque les vitesses mesurées sont ajoutées aux mesures de hauteur d'eau dans le processus de calibration, les résultats ont montré que les sections contenant un point d'observation peuvent aider à calibrer les sections adjacentes même si elles ne contiennent pas de points d'observation. Lors de l'ajout des mesures de vitesse, les calibrations obtiennent de meilleurs résultats pour le même nombre de points que les calibrations utilisant seulement les mesures de hauteur d'eau.

Lors de l'introduction d'une erreur aux mesures de hauteur d'eau, les essais de calibration utilisant les vitesses mesurées en plus des mesures de hauteur d'eau ont montré une réduction des erreurs de calibration. Les calibrations utilisant seulement les hauteurs d'eau ont des erreurs entre 15% et 60 % et ceux utilisant les mesures de vitesses ont des erreurs variant entre 2% et 15% seulement.

Lors de l'introduction de l'erreur sur les débits, il a été remarqué que les erreurs de calibration sont moindres dans le cas où la calibration des paramètres est basée sur un meilleur ajustement des

vitesses. En effet, une faible erreur relative entre les valeurs de hauteur d'eau calculée par le modèle calibré et celles mesurées est plus souvent associée avec une erreur de calibration élevée. À l'inverse, un ajustement des paramètres qui se base sur une correspondance entre les valeurs de vitesses offre de meilleurs résultats de calibration. Cette affirmation est aussi applicable pour les essais introduisant une erreur dans les mesures de hauteur d'eau.

En conclusion, il a été montré que l'outil O.P.P.S. permet de lancer la calibration des modèles de rivières basés sur le logiciel SRH-2D de façon rapide et efficace. Suivant les résultats positifs obtenus avec l'outil, une étape supplémentaire pourrait être franchie en permettant l'inclusion d'une autre série de paramètres à la calibration, soit les paramètres discontinus. Ces paramètres se présentent souvent sur la forme de nombres entiers représentant des équations ou des méthodes de résolution dans les fichiers d'entrée. Ceci permettrait notamment d'inclure les paramètres contrôlant le transport des sédiments et la résolution des équations du calcul de l'érosion et du transport solide.

Il est suggéré que l'aspect automatique de l'outil soit utilisé dans l'exploration de la question d'équifinalité et d'incertitude associée avec l'estimation des paramètres suivant une procédure de calibration automatique. Des scénarios supplémentaires devraient être mis à l'épreuve en explorant la continuité de la qualité de l'ajustement ou la continuité de l'estimation des paramètres lorsque les conditions de calibration sont changées (valeurs de départ, valeurs limites, paramètres de contrôle, positionnement et contenu des données d'observation, etc.). De plus, le processus de calibration pourrait être repris en utilisant un critère de performance différent pouvant influencer le résultat de la calibration (Pappenberger et al., 2007). Certaines précautions devraient être prises afin de déceler les possibles cas d'équifinalité dans le processus de calibration.

BIBLIOGRAPHIE

- Aquaveo. (2013). *SMS User Manual, Surface-water Modeling System (v11.1)*.
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., . . . Van Liew, M. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Aronica, G., Bates, P. D., & Horritt, M. S. (2002). Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, 16(10), 2001-2016. doi:10.1002/hyp.398
- Bahreman, A., & De Smedt, F. (2010). Predictive Analysis and Simulation Uncertainty of a Distributed Hydrological Model. *Water Resources Management*, 24(12), 2869-2880. doi:10.1007/s11269-010-9584-1
- Beven, K., & Binley, A. (1992). The futur of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6, 279-298.
- Beven, K., & Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249(1), 11-29.
- Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674.
- Capart, H., Spinewine, B., Yougn, D. L., Zech, Y., Brooks, G. R., Leclerc, M., & Secretan, Y. (2007). The 1996 Lake Ha! Ha! breakout flood, Quebec: Test data for geomorphic flood routing methods. *JOURNAL OF HYDRAULIC RESEARCH*, 45, 97-109.
- Cunge, J. (2003). Of data and models. *Journal of Hydroinformatics*, 5, 75-98.
- Dalrymple, T., & Benson, M. A. (1967). *Measurement of peak discharge by the slope-area method*: US Government Printing Office.
- Diaz-Ramirez, J. N., McAnally, W. H., & Martin, J. L. (2012). Sensitivity of Simulating Hydrologic Processes to Gauge and Radar Rainfall Data in Subtropical Coastal Catchments. *Water Resources Management*, 26(12), 3515-3538. doi:10.1007/s11269-012-0088-z
- Doherty, J. (2010). *PEST, Model-Independant Parameter Estimation User Manual : 5th Edition*: Watermark Numerical Computing.
- Duan, Q. (1991). *A global optimization strategy for efficient and effective calibration of hydrologic models*. The University of Arizona.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res*, 28(4), 1015-1031.
- Ellis, R. J., Doherty, J., Searle, R. D., & Moodie, K. (2009). *Applying PEST (Parameter ESTimation) to improve parameter estimation and uncertainty analysis in WaterCAST models*. Paper presented at the 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with

Mathematical and Computational Sciences, Cairns, Australia.
<http://mssanz.org.au/modsim09>

- Fabio, P., Aronica, G. T., & Apel, H. (2010). Towards automatic calibration of 2-D flood propagation models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), 911-924. doi:10.5194/hess-14-911-2010
- Gallagher, M., & Doherty, J. (2007). Parameter estimation and uncertainty analysis for a watershed model. *Environmental Modelling & Software*, 22(7), 1000-1020. doi:10.1016/j.envsoft.2006.06.007
- Gonzalez, P. (2016). *Modélisation de la propagation des inondations en zone urbaine*. (Master), Université de Montréal, École Polytechnique de Montréal.
- Hall, J. W., Tarantola, S., Bates, P. D., & Horritt, M. (2005). Distributed Sensitivity Analysis of Flood Inundation Model Calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 117-126. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(117)
- Kavetski, D., Kuczera, G., & Franks, S. W. (2006). Calibration of conceptual hydrological models revisited: 1. Overcoming numerical artefacts. *Journal of Hydrology*, 320(1-2), 173-186. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.07.012
- Kim, S. M., Benham, B. L., Brannan, K. M., Zeckoski, R. W., & Doherty, J. (2007). Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods. *Water Resources Research*, 43(1), n/a-n/a. doi:10.1029/2006wr004883
- Lai, Y. G. (2008). *SRH-2D version 2: Theory and User's Manual*: U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Denver, Colorado.
- Lai, Y. G. (2009). Two-dimensional depth-averaged flow modeling with an unstructured hybrid mesh. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(1), 12-23.
- Li, X., Qi, Z., Shao, M., & Li, Y. (2012). A comparison of parameter estimation for distributed hydrological modelling using automatic and manual methods. *Advanced Material Research*, 356-360, 2372-2375. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.356-360.2372
- Madsen, H. (2000). Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235(3-4), 276-288. doi:10.1016/S0022-1694(00)00279-1
- Mahdi, T.-F. (2009). Semi-two-dimensional numerical model for river morphological change prediction: theory and concepts. *Natural Hazards*, 49(3), 565-603. doi:10.1007/s11069-008-9304-9
- Mahdi, T., & Marche, C. (2003). Prévision par modélisation numérique de la zone de risque bordant un tronçon de rivière subissant une crue exceptionnelle. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30(3), 568-579. doi:10.1139/103-018
- McCloskey, G., Ellis, R., Waters, D., & Stewart, J. (2011). *PEST hydrology calibration process for source catchments—applied to the Great Barrier Reef, Queensland*. Paper presented at the 19th International Congress on Modeling and Simulation, Perth, Australia.
- McKibbin, J., & Mahdi, T. F. (2010). Automatic calibration tool for river models based on the MHYSER software. *Natural Hazards*, 54(3), 879-899. doi:10.1007/s11069-010-9512-y

- Pappenberger, F., Beven, K., Frodsham, K., Romanowicz, R., & Matgen, P. (2007). Grasping the unavoidable subjectivity in calibration of flood inundation models: A vulnerability weighted approach. *Journal of Hydrology*, 333(2), 275-287.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., & Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, 302(1-4), 46-69. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.036
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., & Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, 302(1), 46-69.
- Rode, M., Suhr, U., & Wriedt, G. (2007). Multi-objective calibration of a river water quality model—Information content of calibration data. *Ecological Modelling*, 204(1), 129-142.
- Vidal, J. P., Moisan, S., Faure, J. B., & Dartus, D. (2007). River model calibration, from guidelines to operational support tools. *Environmental Modelling & Software*, 22(11), 1628-1640. doi:10.1016/j.envost.2006.12.003
- Warmick, J. J., Klis, H. v. d., & Hulscher, M. J. B. S. J. M. H. (2010). *Quantification of uncertainties in a 2 D hydraulic model for the Dutch river Rhine using expert opinions*. Paper presented at the Environmental Hydraulics.
- Werner, M., Blazkova, S., & Petr, J. (2005). Spatially distributed observations in constraining inundation modelling uncertainties. *Hydrological Processes*, 19(16), 3081-3096. doi:10.1002/hyp.5833

ANNEXE A

ARTICLE 1: AUTOMATIC CALIBRATION OF RIVER REACH 2D SIMULATIONS BASED ON SRH-2D

Simon Deslauriers¹, Tew-Fik Mahdi²

¹Département des génies Civil, Géologique et des Mines (CGM), École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada. Email: simon.deslauriers@polymtl.ca

² Professor, Département des génies Civil, Géologique et des Mines (CGM), École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, QC H3C 3A7, Canada (Corresponding author). Email: tewfik.mahdi@polymtl.ca

Natural Hazards, Springer Journals (submitted)

ABSTRACT

River model calibration is essential for reliable model prediction. The manual calibration method is laborious and time consuming and requires expert knowledge. River engineering software is now equipped with more complex tools that require a high number of parameters as input, rendering the task of model calibration even more difficult. This paper presents the calibration tool O.P.P.S. (Optimisation Program for PEST and SRH-2D), then uses it in multiple calibration scenarios. O.P.P.S. combines PEST, a calibration software, and SRH-2D, a bi-dimensional hydraulic and sediment model for river systems, into an easy-to-use set of forms. O.P.P.S is designed to minimize the user's interaction with the involved program to carry out rapid and functional calibration processes. PEST uses the Gauss-Marquardt-Lavenberg algorithm to adjust the model's parameters by minimizing an objective function containing the differences between field observation and model-generated values. The tool is used to conduct multiple calibration series of the modelled Ha! Ha! river in Québec, with varying information content in the observation fields. A sensitivity study is also conducted to assess the behaviour of the calibration process in the presence of erroneous or imprecise measurements.

Keywords: river modelling; automatic calibration; parameter estimation; SRH-2D; PEST

1. INTRODUCTION

River models are used in various ways by engineers in many fields. These models are relied upon to assess problems that cannot be studied directly or that are too complex to be addressed via simplified approaches. River models are generally oriented towards predictions in many environmentally oriented fields of study, such as water quality, flood prediction and sediment transport.

In most study cases, the process of building a functional model comprises four main steps (Vidal et al., 2007): model set-up, model calibration, model validation and exploitation. Model calibration, being an essential and crucial step, consists of the adjustment of the model's parameters until a satisfactory agreement between simulated values and measured values is obtained. Hydraulic models include a certain variety of parameters that cannot be measured or assessed via field measurements or observations. Reliable model predictions will therefore be obtained through a thorough calibration process (Bahremand & De Smedt, 2010).

The calibration tasks are commonly performed manually in a trial and error process where the user progressively adjusts the parameters until a satisfactory result is obtained. This method is limited since the task is time consuming and the subjectivity of the quality of the adjustment highly depends on the user's experience (Boyle et al., 2000). Moreover, the number of variable parameters is often reduced as much as possible by the users to reduce the model's complexity. With the ever-growing computational capabilities of the models and the increasing demand for model precision, the traditional calibration method sometimes becomes inadequate.

Dedicated studies have aimed to develop efficient and automatic calibration methods where the parameters are adjusted until an objective function is brought to a minimum. Calibration methods come in two forms: the global methods based on an evolution algorithm, such as the Shuffled-Complex Evolution method (Duan et al., 1992), and the gradient-based methods, such as the Gauss-Marquardt-Levenberg algorithm. Global methods are robust in finding the minimum of the objective function in the entire parameter space but require a great amount of model runs to achieve this result. Gradient-based methods on the other hand are computationally efficient, but the result can sometimes be dependent on the initial parameters as the calibration progresses from an initial set of parameters towards the steepest descent of the objective function.

Though the hydraulics models have evolved into complex tools with diverse functionalities to visualise and present results, calibration-oriented tools have not progressed in the same manner. Additional features have been implemented in the models to yield more capabilities in data presentation, but little has been done regarding the improvement of the calibration tools: “evolution of calibration support mechanisms has yet to undergo the same level of development as the models themselves” (McKibbon & Mahdi, 2010). Vidal (2007) depicted the same problem: “even modelling packages promoting good modelling practices do not provide significant features to assist users during manual calibration”.

To facilitate the calibration process, an automatic calibration tool is created that combines PEST (Parameter ESTimation) and SRH-2D (Sedimentation and River Hydraulics). The user simply specifies the parameters he wishes to submit to the calibration process and the observation values to be compared with the simulated results. The program then assures the entire configuration and execution of the calibration process.

The tool created is then used to explore different calibration scenarios where the effect of progressively increasing the available information used by the calibration process is considered. Another set of calibrations is undertaken with the introduction of an error in the measurement values to explore the effect of erroneous data.

2. METHODS

This section introduces the hydrodynamic model used for the river reach flow simulation, SRH-2D, and the optimisation program PEST. The tool developed is also presented, along with the description of the conducted calibration series on the model.

2.1.SRH-2D

SRH-2D (Lai, 2008) is a depth-averaged flow and sediment transport model for river systems that was developed at the U.S. Bureau of Reclamation. The software is capable of simulating flow through multiple reaches, floodplains, vegetation lands and hydraulics structures. SRH-2D is well suited for rivers that require a better representation of 2D effects, such as multiple flow paths or in-stream structures. It computes the local water elevation, local flow velocity, eddy pattern and shear stress on riverbeds and banks. The software is built to easily divide rivers into

different reaches depending on vegetation, topography or morphology. The hybrid meshing strategy is well suited to zonal modelling as it allows for both a quadrilateral and triangular shape with the desired density.

An implicit scheme is used to solve the finite-volume numerical method based on the 2D depth average dynamic wave equation of St. Venant. Steady and unsteady state can both be simulated by the software, and all flow regimes may be simulated. For a better understanding of the model, additional details can be found in Lai (2009), where a complete description of the governing equation and discretisation methods is displayed. Although SRH-2D is capable of computing sediment transport, this model is considered static and therefore does not include aggradations or degradation of the riverbed.

Pre-processing and post-processing of the model is executed in SMS (Aquaveo, 2013), a modelling software presented as a graphical user interface and analysis tool that holds all of the SRH-2D functionalities.

2.2. PEST

To verify the reproduction of the physical phenomena by the model, the data calculated by the model needs to be compared with measured values to determine the model's performance regarding the reproduction of the said phenomena. Based upon the assumption that the model responds to an excitation or an impulsion, it is possible to imagine that there is at least a combination of parameters that can make the model reproduce the same reactions that occur in the modelled environment (Doherty, 2010).

PEST is a model-independent software designed to assume the task of calibration in a completely automatic manner by applying the Gauss-Marquart-Levenberg algorithm (Doherty, 2010). The calibration is undertaken by reducing to a minimum the objective function, which holds the discrepancies between the measured values and the results given by the model. PEST will gradually adjust the model parameters following the steepest descent towards the minimum of the objective function until it reaches the user-supplied termination criteria. The parameters obtained would hence give the best match between the supplied measured values and the simulated values.

The parameter estimation is based on a linearisation of the relationship between the model parameters and the calculated output values. At every iteration, PEST executes as many model

runs as there are calibration parameters to generate their partial derivatives using a user-guided finite difference. Following every model run, PEST examines the output information and, based on the instruction supplied in the control files, will refine the input parameters of the model towards the predicted steepest descent of the objective function based on the calculation of the Jacobian matrix of the model parameters. PEST will stop this process once the objective function is reduced to a minimum.

To conduct this task, PEST takes control of the model by executing it as many times as needed while modifying the parameters until the objective function is lowered to a user-supplied satisfactory level. PEST requires a specific set of instructions in the form of three files. The first file indicates the way in which the output information generated by the model should be interrogated. The second is a mirror image of the input file, which is used to locate the calibration parameters. The third file is the centre of command of the whole operation and contains all the instructions regarding the calibration process (Doherty, 2010). The content of these files will vary from one model to another.

In this unique approach, PEST is linkable to almost any type of model as long as the input and output information can be accessed in any way. The sequential execution of the model by PEST is accomplished via a batch file, which can be a succession of multiple operations such as the translation of the output file to a readable format or the combination of multiple information coming from the model resolution. PEST has already been proven to be an effective calibration procedure for hydrological models and hydrodynamic models (Diaz-Ramirez et al., 2012; Ellis et al., 2009; Fabio et al., 2010; Kim et al., 2007; McCloskey et al., 2011; McKibbin & Mahdi, 2010; Rode et al., 2007)

2.3. O.P.P.S.

The Optimisation Program by PEST for SRH-2D (O.P.P.S.) is the resulting tool for the automatic calibration of SRH-2D by PEST. O.P.P.S. eases the task of preparing the calibration process by correctly building the required files with the user's desired PEST regularisation parameters. O.P.P.S. comes in the form of an easy-to-use graphical interface based on Excel® Visual Basic, where the user can quickly specify the current project's parameters to be calibrated and the measured values that are to be matched in the model.

O.P.P.S can easily prepare and execute an operational PEST calibration process with minimum user interaction. The model is sequentially launched by a command line in the form of an AutoHotKey® file capable of conducting single model runs without any user intervention. Indeed, the execution of the command lines supplied with O.P.P.S. allow for carrying out the calibration process in the background without the user interventions normally required by SRH-2D. A single non-calibration run would normally require multiple human-directed operations that would interfere with the automatic aspect of the calibration process. Therefore, the automatic execution of SRH-2D is made completely free of user interventions.

When O.P.P.S. is launched, the interaction with the user is made through a series of forms in which the information regarding the calibration process can be entered. The first form (figure A-1) gives an overview of the steps to follow and a few rules to respect. Observation values to be compared to the simulated values are entered into the main form. A name for each observation must be supplied, along with the measured depth, water velocity along the X- and Y-axis, and the velocity magnitude. It is not required to supply data to each of the different measured values, but at least one should be entered. The measured values supplied are individually used in the calibration process: there will be as many single observation points as there are measured values in the calibration process. Observation points are referred to by their SRH-2D identification numbers. If no points are present in the model where the observation was made, a single point can simply be added to the model at the correct coordinates.

Instructions

1. Add the observation values in the "Observation point values" section. Observation points must be in ascending order. Leave cells empty when no information is available but at least one cell should be filled.
2. Add or delete observation lines with the provided actions buttons only. Do not leave an empty line.
3. "Prepare Optimisation" compiles the supplied information into the required files for the calibration process. Press only when all of the information is filled.
4. Once the optimisation is ready, launch the calibration process with the "Launch PEST" action button.
5. In case of an error during the process, it is always possible to restart the calibration process at the last engaged iteration with the "Restart last simulation" action button.
6. At the end of an optimisation process, "View Results" shows the details of the last launched calibration process.
7. To fully benefit from this program, Administrator's rights are required. Without this, the transition between model runs could be problematic as certain commands would not work. Use "Restart last simulation" as an accidental interruption of the process.

SRH-2D conditional setup

SRH-2D executables must be placed in the same folder as the project subjected by the optimisation. The project must be complete and fully operational before the calibration. Units must be in SI, time in hours and a constant flow rate. Simulated time must be sufficient to enable the stabilisation of the water level. The output file format must be set to SRHN (output value at the nodes) and the output frequency to -1 (only one output file).

Observation point values

Observation point number	Point ID	Observed water depth (m) - hobs#		Observed water velocity X (m/s) - VXobs#		Observed water velocity Y (m/s) - VYobs#		Water velocity (m/s) - VMhobs#	
		Observation	Weight	Observation	Weight	Observation	Weight	Observation	Weight
1	7359	1.416	1	1.146	1	0.941	1	1.483	1
2	13535	2.786	1	-1.231	1	0.902	1	1.526	1
3	17532	3.551	1	-0.559	1	0.526	1	0.768	1
4	22171	3.464	1	-0.280	1	0.537	1	0.605	1
5	28448	3.222	1	-0.215	1	0.367	1	0.425	1

End of observations

Add observation line

Delete observation line

Prepare optimisation

Control Panel

The "instruction", "template" and "control" files must be created before launching the optimisation process.

Optimisation files	File name	Status	Date
Project file	RuHa-test_20h	Absent	-
"Instruction" file	-	-	-
"Template" file	-	-	-
"Control" file	-	-	-

Launch PEST

Restart last simulation

Show results

Figure A-1 O.P.P.S. first form

The second form (figure A-2) asks the user to specify the path to PEST and to the project's input file. Once the project file is specified, O.P.P.S extracts the names and details of the parameters contained in the specified project. A secondary form holding these parameters allows for the selection of the desired parameters to be included in the calibration, along with their respective starting values at the beginning of the calibration process and their upper and lower limits. As will be discussed in the results section, it is crucial that the starting value of each parameter be chosen to the best knowledge of the user, especially in regions where no observation data are present.

The next form (figure A-3) displays the control parameters that regulate PEST's optimisation process. These control parameters manage the evolution of the process. There, the user can adjust the Marquardt-Lambda parameter, which guides the progression vector towards the optimal reduction of the objective function. The progression vector is gradually reduced as PEST progresses closer to the minimum of the objective function. PEST is presented with multiple

decision criteria that can be adjusted by the user, depending on the project at hand. These criteria handle the conditions required to progress towards a new iteration or to terminate the calibration process at the most appropriate moment. In both cases, these regularisation parameters can be based on the evolution of the calibration parameters or on the progression of the objective function. Additional parameters are available for finer tuning of the calibration process. These parameters should be adjusted according to each project, as one configuration might not satisfy every calibration operation.

A summary of the procedures followed during the preparation and execution of the calibration process is presented in figure A-4. The preparation steps are carried out by O.P.P.S. and the calibration process is guided by PEST. Once the parameters and the observation points have been identified, O.P.P.S can create the required files for PEST's execution. A series of verifications are performed to avoid errors or performance issues that can arise when PEST is not efficiently programmed. If it does not exist already, O.P.P.S. will automatically create a backup file of the project. When PEST is executed, permanent changes will be applied to the selected parameters.

The figure shows two windows from the O.P.P.S. software. The left window, titled 'PEST / SRH2-D', is the 'Model optimisation' form. It contains fields for 'Path to .2dm project file' and 'Path to PEST', both with 'Browse' buttons. Below these is a 'Choose materials to be optimised' section with a 'Select' button and a list of 'Selected materials' including 'Channel_Zone1=man1', 'forest=man2', and various Manning coefficients. At the bottom are 'Prepare Optimisation' and 'Cancel' buttons.

The right window, titled 'Select materials to be optimised', is a secondary form showing a table of materials. The table has columns for 'Materials contained in current project', 'Starting values', 'Lower limit', and 'Upper limit'. The 'Starting values' column contains checkboxes for selection. The materials listed are 'Channel_Zone1', 'forest', 'material 03', 'material 04', 'material 05', 'Manning 0.020', 'Manning 0.022', 'Manning 0.024', 'Manning 0.026', 'Manning 0.028', 'Manning 0.030', 'Manning 0.032', 'Manning 0.034', 'Manning 0.036', 'Manning 0.038', and 'Manning 0.040'. 'OK' and 'Cancel' buttons are at the bottom.

Figure A-2 O.P.P.S. second form (left) and secondary form where the project material can be selected for optimisation (right)

The figure shows two windows for 'PEST control parameters'. The left window has tabs for 'General' and 'Optimisation parameter'. It contains several input fields for parameters: 'Initial lambda value (RLAMDBA1): 10.0', 'Lambda adjustment factor (RLAMFAC): -3.0', 'Objective function ratio before moving to the next iteration (PHIRATSUF): 0.3', 'Maximum relative reduction of objective function before moving to next iteration (PHIREDLAM): 0.01', 'Number of lambda per iteration (NUMLAM): 10', 'Maximum variation of parameters between iterations' (with sub-fields for 'Maximum relative variation (RELPARMAX): 1.0' and 'Maximum factor variation (FACPARMAX): 2.0'), 'Objective function ratio allowing for central derivatives (PHIREDSWH): 0.1', and 'Maximum number of iterations (NOPTMAX): 30'. At the bottom, it says 'Stop the calibration after NPHISTP consecutive iterations with an objective function ratio below PHIRE DSTP ratio' with 'NPHISTP: 4' and 'PHIRE DSTP: 0.01'. 'OK', 'Cancel', and 'Default parameters' buttons are at the bottom.

The right window also has tabs for 'General' and 'Optimisation parameter'. It contains fields for 'Increment type (INCTYP) used for partial derivative calculation and the increment size (DERINC): INCTYP is set to 'absolute' and DERINC is '0.002'. Below that is 'Increment lower limit, ignored if INCTYP is "absolute" (DERINCLB): 0.002'. 'Finite difference method (FORCEN): switch'. 'Multiplying factor to DERINC in case of central finite differences (DERINCMUL): 1.0'. 'Adjustment method for central finite difference (DERMTHD): best_fit'. 'Variable adjustment with RELPARMAX or FACPARMAX (PARCHGLIM): factor'. 'OK', 'Cancel', and 'Default parameters' buttons are at the bottom.

Figure A-3 Advanced parameter forms for the adjustment of the variables controlling the optimisation process

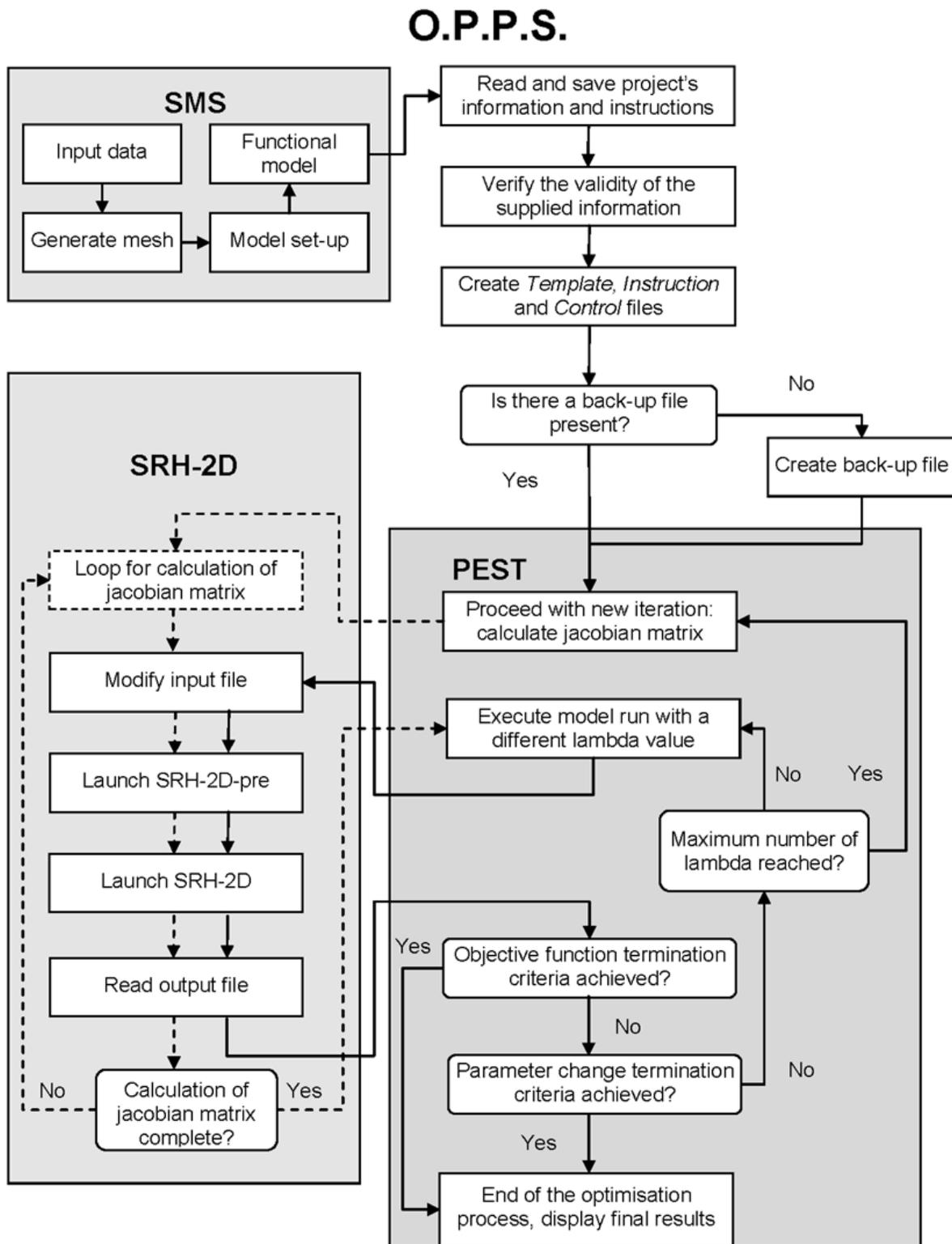


Figure A-4 O.P.P.S. flow chart

2.4. Study case

In this study, the Ha!-Ha! River is partially modelled using the topographical data collected after the 1996 failure of a dam of the Ha! Ha! Lake. The dam failed as water rose rapidly during the high-yield rains that lasted for three days in the Saguenay region in Québec, Canada. The sudden flush caused an excessive increase in the river flow (more than 1000 m³/s), drastically changing the river morphology by eroding the sediment deposit around the rocky bases of the riverbed. Capart *et al.* (2007) give the cross-sections data for every 100 m of the river.

The Ha! Ha! River basin covers a total of 572 km² in the Saguenay-Lac-St-Jean region, and its river stretches forth a total of 35 km from the Ha!-Ha! dyke to the river mouth, where it flows into the Saguenay river. The model comprises five different reaches of approximately 3 km each represented by different roughness coefficients. A plan of the modelled reaches is presented in figure A-5. The Manning roughness coefficient is the only adjustable parameter in the study case as PEST only allows for the calibration of continuous parameters. Although the calibration is limited to only one parameter, the roughness coefficient has been identified as the most influential source of uncertainty in river models (Hall et al., 2005; Warmick et al., 2010).

2.5. Calibration scenarios

In summary, O.P.P.S. can quickly and efficiently assemble the required information to perform an operational automatic calibration process. This tool is used to perform a series of calibrations of the river model. The calibration data used in the calibration process is generated by running the model in a steady state with a set of original parameters. Using the data recorded during the initial run with the original parameters as the observation values, PEST is expected to progress towards the initial set of parameters. The original values of Manning coefficients, along with the observation values used in the series of calibrations, are presented in table 1. The series of calibrations is carried out using different settings, with the number of observation points, their positions and their content varying in each series.

Table A-1 Original values of Manning coefficient and observation values

Reach number	Manning's coefficient original values	Observation point values			
		Water depth (m)	Velocity X (m/s)	Velocity Y (m/s)	Velocity magnitude (m/s)
Reach 1	0.02	1.416	1.146	0.941	1.481
Reach 2	0.028	2.786	-1.231	0.902	1.528
Reach 3	0.036	3.551	-0.559	0.526	0.769
Reach 4	0.026	3.463	-0.28	0.537	0.605
Reach 5	0.032	3.222	-0.215	0.367	0.425

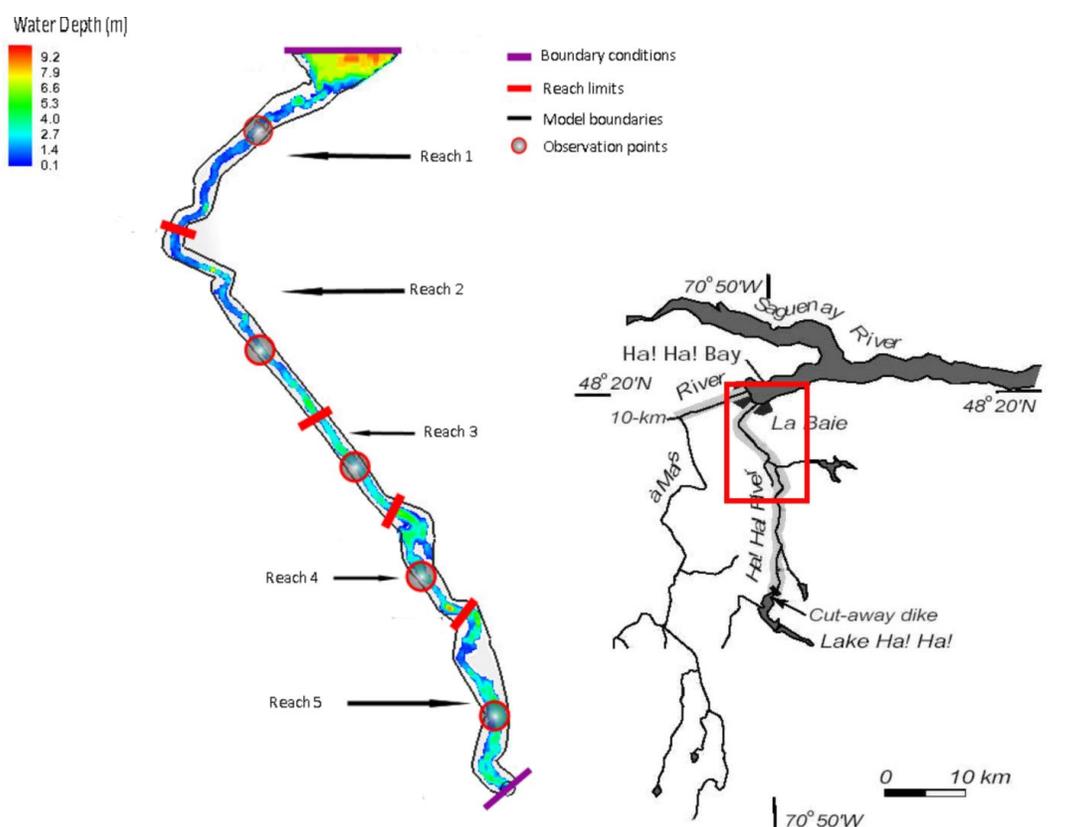


Figure A-5 Ha!-Ha! river map and model overview

2.5.1. Water depths

The first series of calibrations used an increasing number of observation points, only one per reach, containing only the observed water depths. In the first case, the calibration points were located close to the middle of the reach; in the second case, the points were located near the

junctions of reaches or close to the boundary conditions. The first calibration used two observation points, while the subsequent calibration used one additional point, with a maximum of five (one per reach) in the first scenario and six in the second scenario.

2.5.2. Water depths and velocities

The next series of calibrations also used an increasing amount of observation points between each trial. In addition to water depths, observation points contained water velocity measurements: water velocity in the X- and Y- directions and the magnitude of this velocity. PEST now has access to an increased quantity of information to proceed with the calibration to explore the extent of adding information to the observation points. In all cases, the observation points are located near the centre of each reach. Each calibration process is carried out with identical instructions sets and regulation parameters and has the same starting values for the initial model run.

2.5.3. Sensitivity analysis

The next parts of the calibration series were used for a sensitivity study to observe the effects of introducing an error in the measured data used in the calibration procedure. Different scenarios were carried out using two different sets of observation data to aid in the calibration process, with a variable magnitude of the introduced error.

In the first case, the error was applied to the measured depth in a scenario where only the measured depth was available for the calibration procedure. In the second case, the same scenario as in the previous case was carried out by adding measured velocity data to the observation points to verify the advantages of additional information in the advent of an error in the data. Only the measured depth was subjected to the introduced error. The third case introduced an error in the model's input flow using all the available measured data of the observation points (measured depths and velocities). This scenario reveals the effect of flow overestimation and underestimation on the calibration. The first series of this case only included the measured depths at the observation points; the second scenario included all the measured data, i.e., measured depth and velocities. Again, partial use of the data in the first case was done to evaluate the benefits of adding additional data to the calibration process to better handle the possible introduction of error in the data.

3. Results and discussion

The results obtained in the different calibration scenarios are presented in this section, and the difference between the observed and simulated water depths of the entire model for the final calibration scenarios is shown. The results obtained from the calibration series and sensitivity calibration series are also discussed.

3.1. Water depths

The first series of calibrations only used a growing number of observation points containing the water depth as a means of correspondence between the model output values and the measured values. At first, only two observation points were supplied; for each subsequent calibration run, an observation point was added until each reach was supplied with a measured water depth. Figures 6 to 9 present the calibration results from the first series of calibrations.

Results show that PEST cannot correctly calibrate reaches without having at least one observation value in the reach, which in this case is the measured water depth. In each calibration process, the Manning coefficients in the reaches that are not supplied with an observation point have little or no variation compared to their starting values. From the observations made in the results, PEST needs to be supplied with at least one measured depth in a reach to correctly estimate the parameter value. However, PEST has no difficulty matching measured water depths, when supplied, in only a few model runs.

If, during the calibration process, PEST cannot find a correlation between the variation of a parameter and the reduction of the objective function, it will abandon further modification of the said parameter during the present iteration. This results in parameters that are left at their original values during the calibration process. Reaches that are left with an unvaried Manning coefficient have an influence on the upstream portion; thus, PEST, in its quest to match the featured values, must compensate for the unvaried coefficients with an overestimation of the Manning coefficient to reach the supplied measured value upstream. This is shown in the calibration results, where PEST could not correctly calibrate the reach 4 parameter when no information was supplied downstream in reach 3. When an observation point is added to reach 3, PEST can correctly adjust the Manning coefficients of both this reach and of reach 4.

Figure A-10 shows the differences between the water depths recorded at the end of the calibration process using all the observation points and the water depths recorded with the original parameter values. The differences between the simulated values are very low considering that almost all the model's water depths are reproduced within a 0.005 m precision. The majority of the higher differences are located in reach 2, which is an area characterised by small instabilities in the results.

Since the low starting values of the Manning coefficient had a negative influence on the calibration results, the entire calibration series is reinvestigated by reinitialising the starting values in a range that would be much closer to a suitable estimation done by any user. This way, the calibration process could begin with starting values that could resemble a user's estimation.

The results obtained show the same result pattern with a much better performance in the calibration result since the starting values are closer to the original values. Like in the previous series, the reaches that are not provided with calibration points remain closer to their original values, but results show a positive movement towards the desired values as more points are added. In reach 3, the relative difference between the desired value and the calibration value is gradually diminished as additional points are added to the surrounding reaches. The same improvement is observed at reach 4, where overestimation caused by reach 3 is gradually reduced and much less exaggerated, similar to the previous calibration series.

Another calibration series was processed by using observation points located on the frontier of two reaches in the model to explore the "calibration value" of a different positioning of the observation points. The results showed that points placed on the frontier of two reaches facilitate only the calibration of the downstream reach; thus, one point per frontier is needed to obtain a proper calibration of the model. However, the uncalibrated reaches in this series did not have the overestimation effect upstream observed in the previous series.

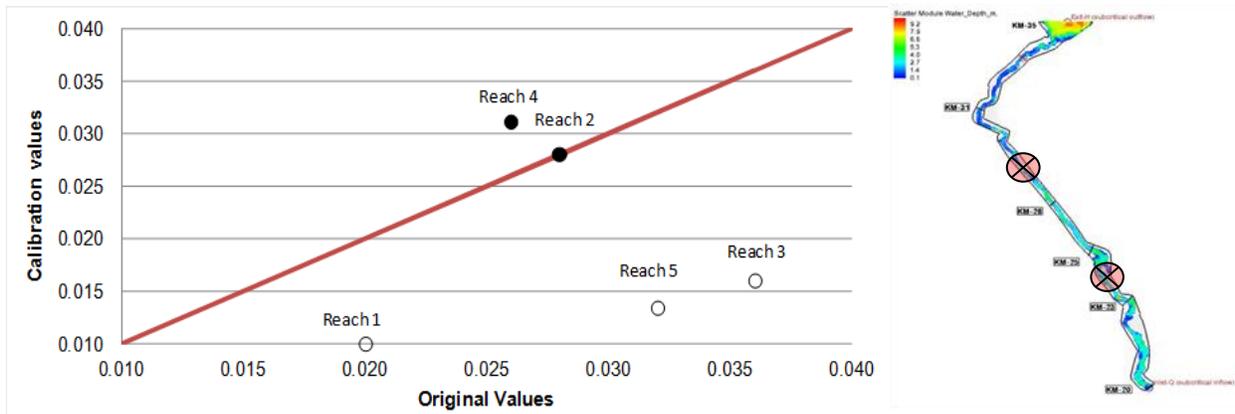


Figure A-6 Calibration results using water depths - 2 observation points

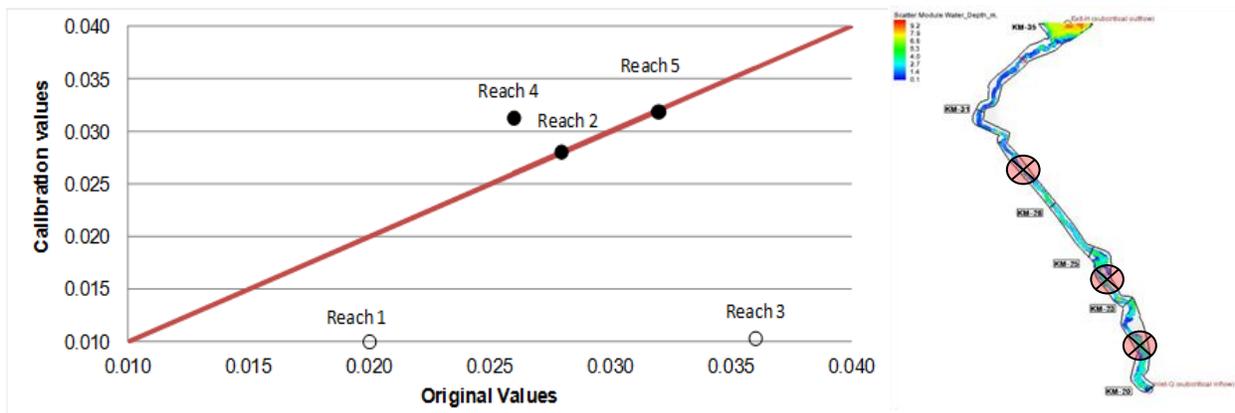


Figure A-7 Calibration results using water depths - 3 observation points

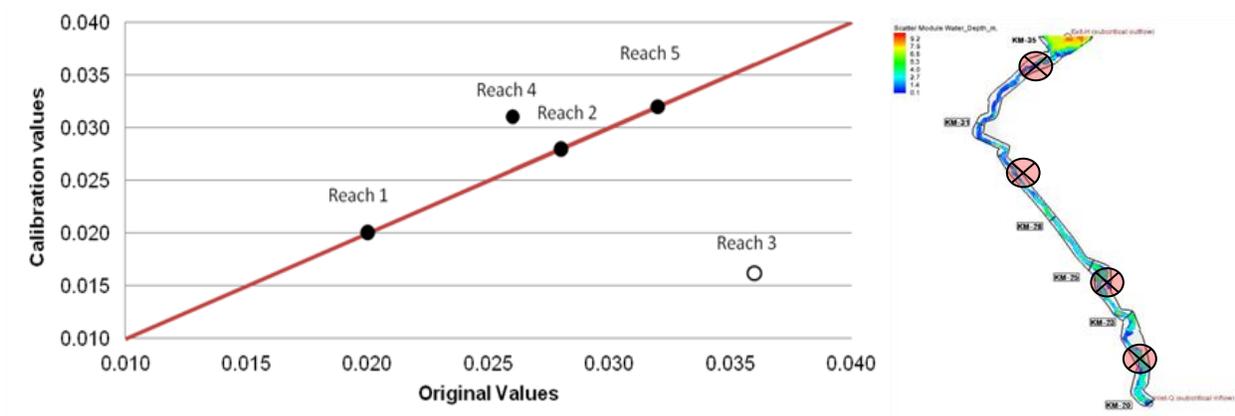


Figure A-8 Calibration results using water depths - 4 observation points

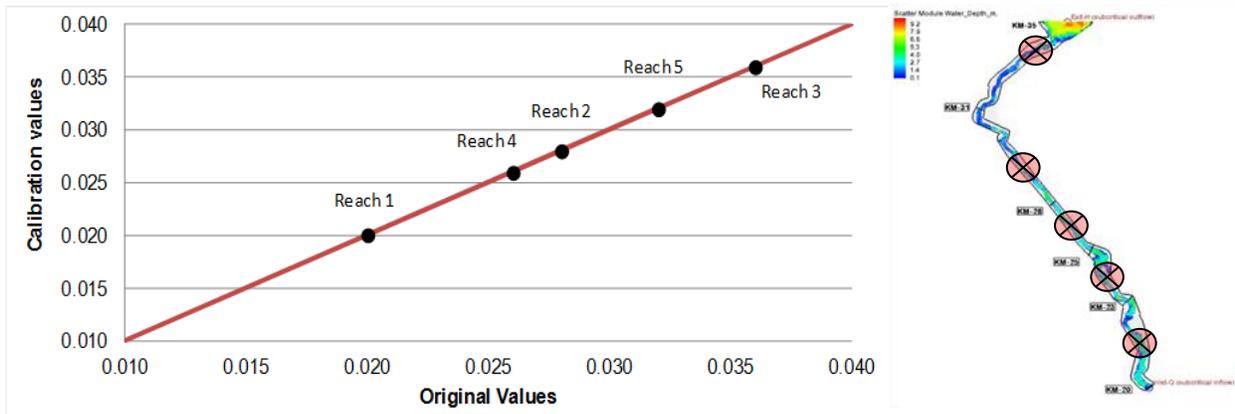


Figure A-9 Calibration results using water depths - 5 observation points

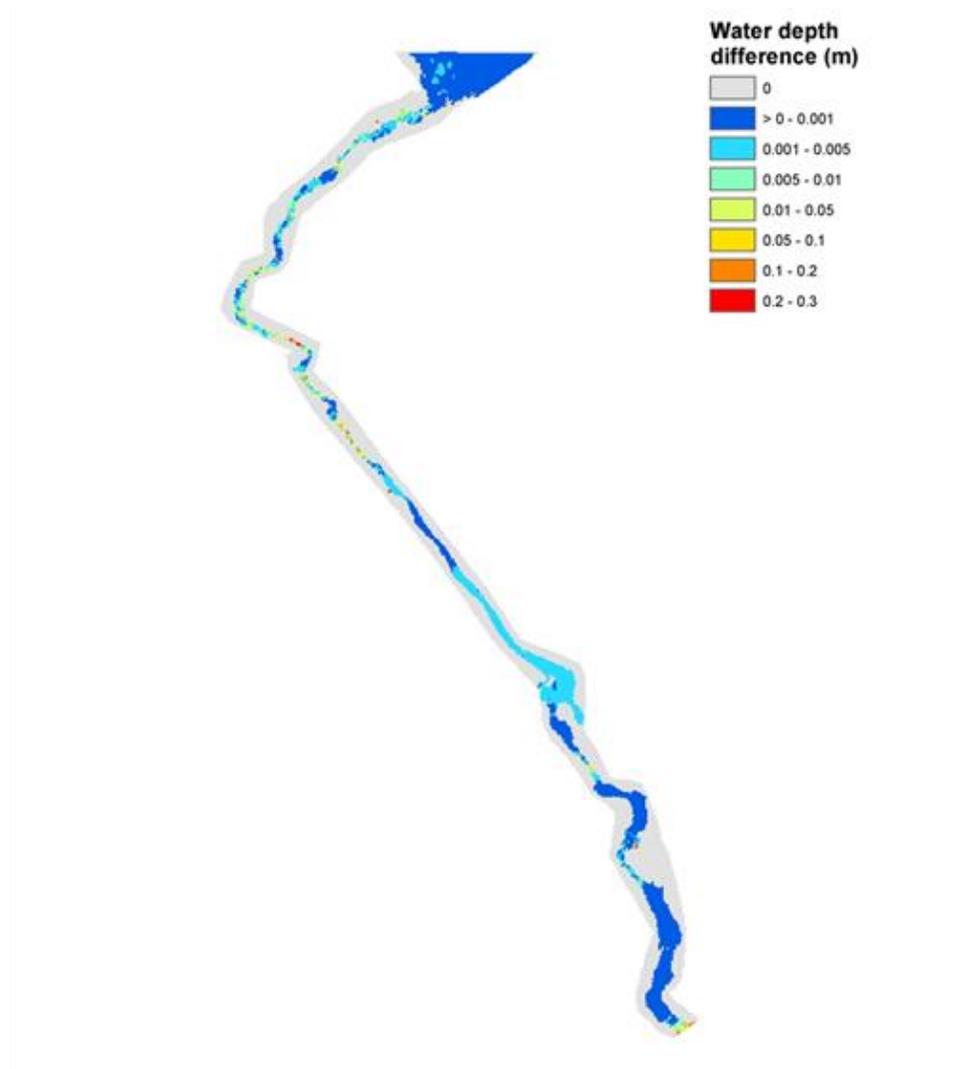


Figure A-10 Overall water depths differences between original values and calibrated results using 5 observation points

3.2. Water depths and velocities

This series of calibrations also used an increasing number of calibration points, centred in their respective reaches, with additional measurements: each observation point featured the measured depths, the velocity along the X- and Y-axis, and the velocity magnitude. Figures 11 to 14 present the calibration results from the series of calibrations using water depths and water velocities of the observation points. With only two observation points (figure A-11), PEST can find the desired values of 4 out of 5 reaches. The calibration parameter of reach 5 remained at the starting value, meaning that PEST could not establish a relation between the parameter variation and the reduction of the objective function.

As additional points are included in the calibration, the relative difference between PEST's suggested values and the desired values is gradually reduced. In fact, the quality of the adjustment increases faster with the addition of observation points and the model is calibrated to a satisfying status with less observation points. Additionally, reaches that do not have measured values to facilitate their parameter calibration can be estimated to a good level when upstream and downstream reaches contain calibration information. This is shown in the third calibration (figure A-14), where the middle reach is correctly calibrated even without having any observation values attached to it. This series shows that less observation points are required to obtain satisfactory calibration results when the featured points contain more information.

Figure A-15 shows the differences between the water depths resulting from the calibration process using all the observation points (water depths and water velocities) and the water depths recorded with the original parameter values. The differences are very similar to those of the calibration using only the water depths, with the exception of reach 2, which contains the majority of the higher differences from the original values. Compared to the calibrated Manning coefficient obtained in the other reaches, the value from reach 2 is overestimated, thus resulting in higher but still acceptable differences between the observed and simulated water depths. In the other reaches, the differences from the simulated water depth values are still within a 0.005 m precision.

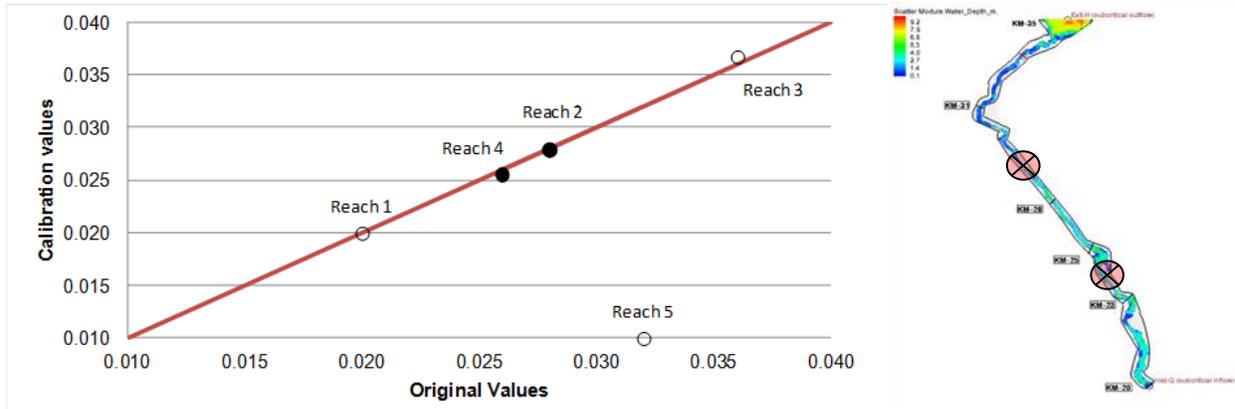


Figure A-11 Calibration results using water depths and water velocities - 2 observation points

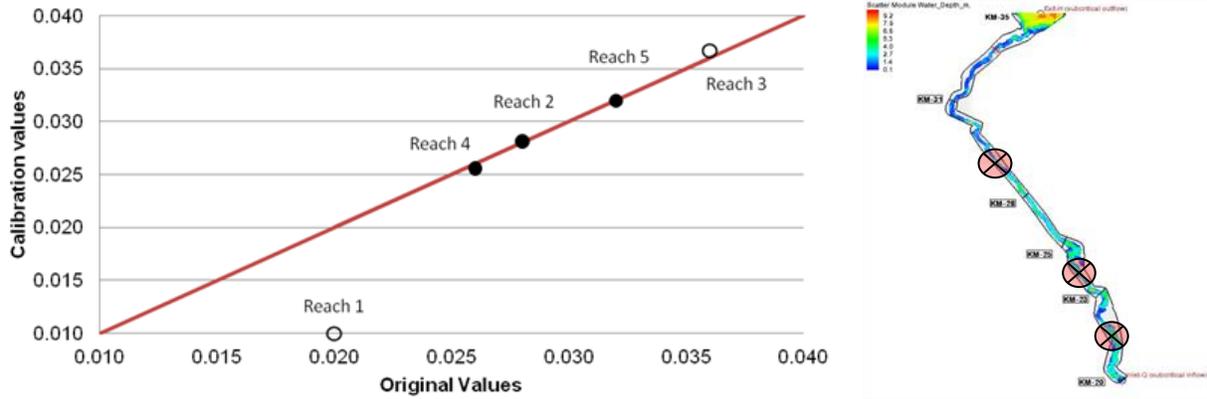


Figure A-12 Calibration results using water depths - 3 observation points

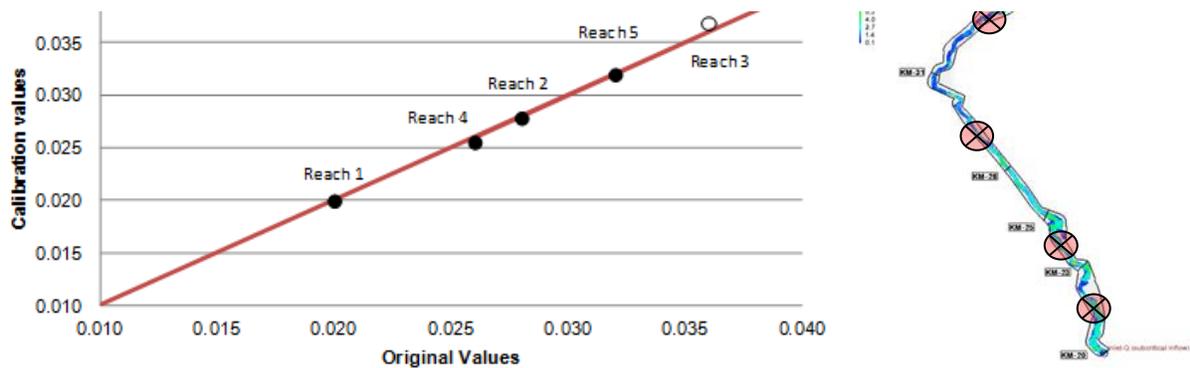


Figure A-13 Calibration results using water depths - 4 observation points

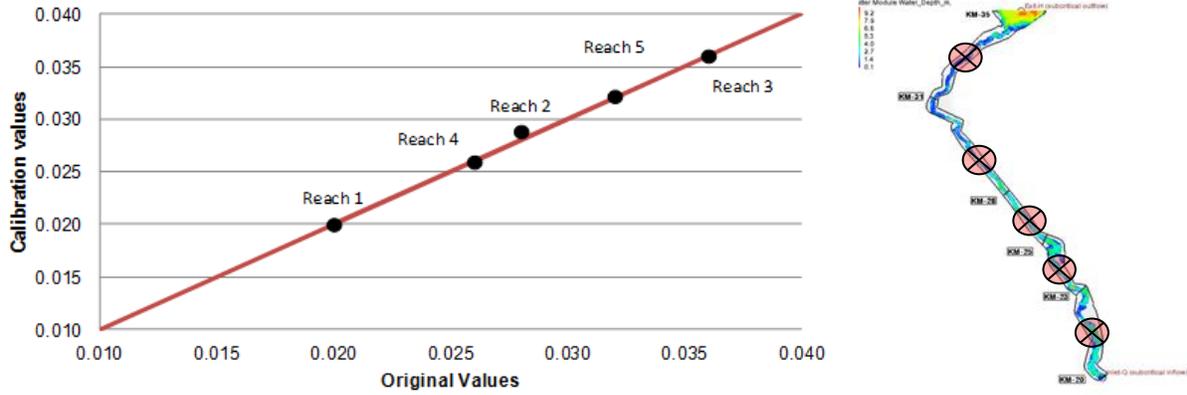


Figure A-14 Calibration results using water depths - 5 observation points

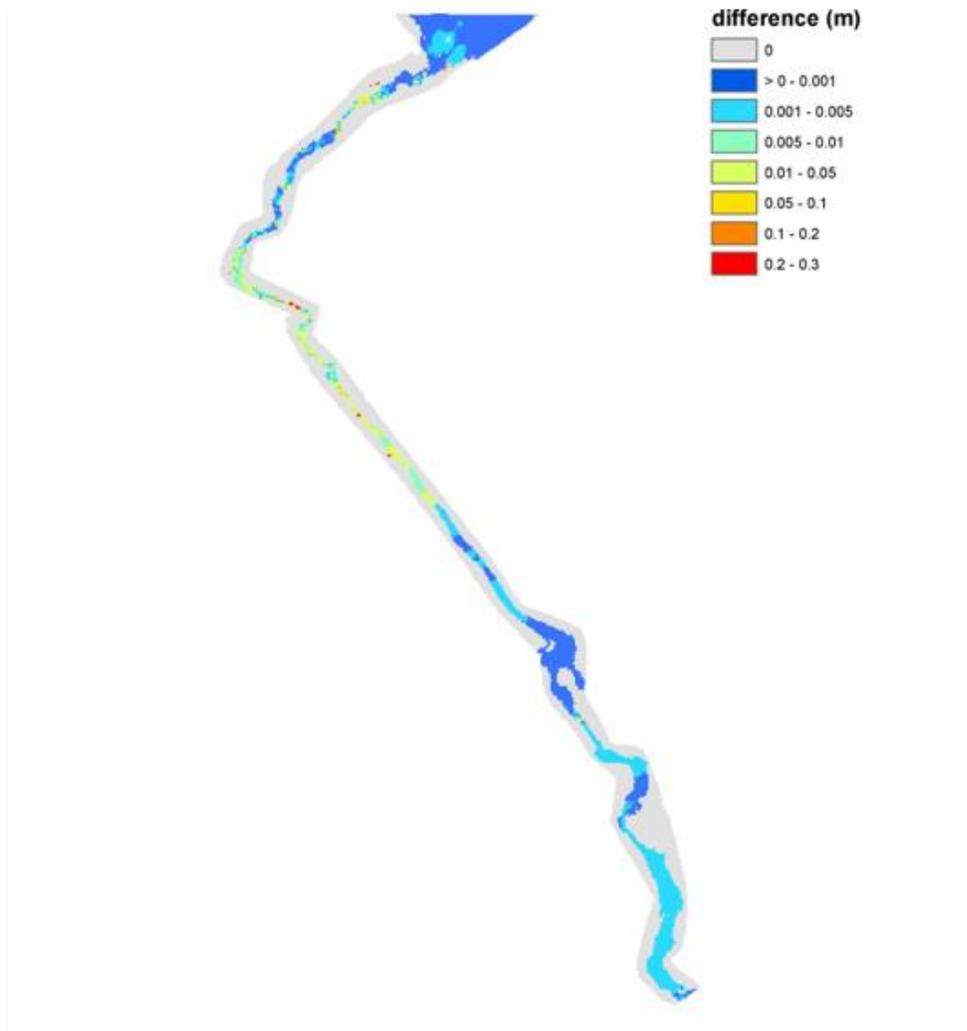


Figure A-15 Overall water depths differences between original values and calibrated results using 5 observation points containing water depths and velocities

The analysis of the results given by the hydrodynamic model shows that multiple points in the reach 2 area have oscillating results over time, meaning that the final solution might slightly differ from one simulation to another. The observation point used in this reach was carefully selected, ensuring that the instabilities in the point's solution were limited to minor variations. It is suggested that the additional observation values supplied in reach 2 were still affected by the instabilities met in the area, causing the parameter overestimation. Gonzalez (2016) also denoted some numerical instabilities in the modelled results.

Next, a sensitivity study is conducted by introducing an error in the measured values to explore the effects of using erroneous measurements during the calibration process. In the first calibration series, the error is embedded in the measured water depth of each observation point, and the calibration process is solely based on these values to approximate the parameter values. In the second calibration series, the measured water velocities are added to the observation points, without any errors. In the third series, the input model flow is varied and no error is introduced in the measured water depths or velocities.

3.3.Sensitivity analysis: water depth only

In the case where the error is introduced in the measured water depths and the calibration process relies on these values, the repercussions of the calibration error, presented in figure A-16, are distributed in a linear fashion. From the previous calibration, we know that when five observation points containing measured water depths are supplied, the calibration results are almost perfect. The introduction of errors in the measured values raises the relative differences by a magnitude that depends on the surrounding topography of the reach. Portions of the river with floodplains or larger sections will suffer from more error, especially when the error overestimates the measured water depth, as it will require a higher friction coefficient to match the said value. Reach 1 and 2 suffer the most from the error introduction since they are the portions of the river with the steepest riverbed slopes and have more floodplains. Reach 3 is less affected since the channel is located in a much narrower area surrounded by steep hills.

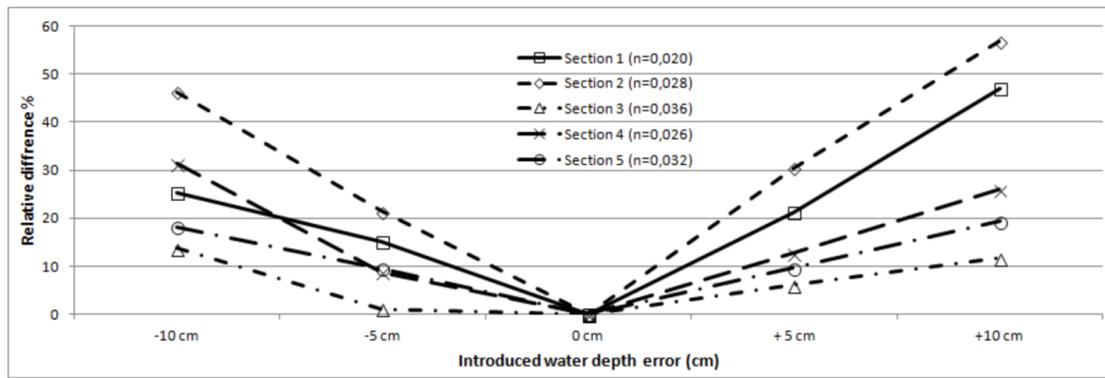


Figure A-16 Calibration sensitivity against measured water depths only

This calibration series is executed in the same manner as that of the previous one, with the additions of measured water velocities to the observation points. No error is introduced in these additional values. As figure A-17 demonstrates, the relative differences of the calibrated values are lower than those obtained in the previous series. In this case, the maximum difference obtained is 20%, compared to 57% in the previous situation. The differences between each parameter in the individual runs of this series are less scattered, resulting in a flatter graphical display.

The most significant drop in relative difference between this series and the previous is recorded in reach 1, where the maximum recorded value drops down from a range of 15% to 47% to an average of 2%. The considerable reduction in relative error in this reach, which was previously highly sensitive to water depth variations, is the result of PEST adjusting the calibration parameter by prioritising the measured water velocities rather than the erroneous water depths. The results show that reaches that are more oriented toward fitting the measured water velocities rather than the water depths have the lowest relative error for the resulting calibrated parameter. This is shown in figure A-18, where calibrated parameters with a better fit towards measured water depths (low relative difference between measured and calculated water depths) are more likely to be miscalibrated.

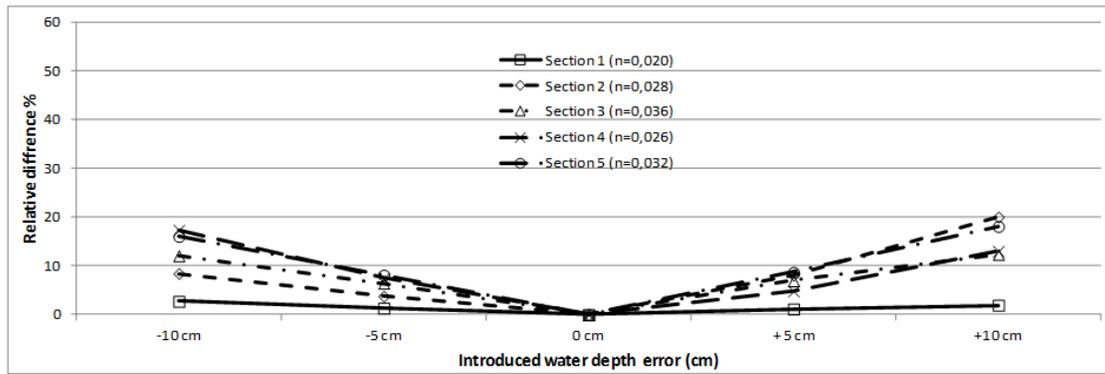


Figure A-17 Calibration sensibility against measured water depths with additional information in the observation points

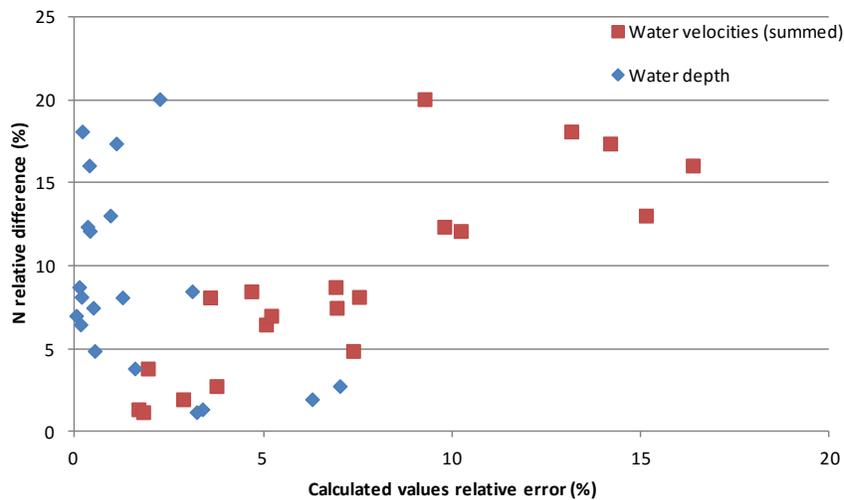


Figure A-18 Calibration error distribution of calculated water depth error and the summed error of calculated water velocities

3.5.Sensitivity analysis: discharge

The next series of calibrations was carried out by introducing an error in the model's input flow. Both the measured water depths and velocities were used in the calibration process. Figure A-19 shows the results of this series. The left side of the graph shows a linear relation between error induced in the model's input flow and error in the calibration parameter. The right portion of the graph presents a much more erratic relation with the flow augmentation.

Again, individual calibration runs that resulted in an accurate match between measured and calculated water velocities at the expense of matching the measured water depths are more likely to have more accurate results with the calibration of the Manning coefficient. Figure A-20 shows the distribution of the relative error between the calibration parameters and the relative error between the observed and simulated water depth values and water velocity values – the relative errors of water velocities are summed. The Manning-water depth relation is much more concentrated on the left side of the graph, with a large variation in the relative errors of the Manning coefficient. This shows that when the calibration process adjusts the Manning coefficients, with a tendency to match the measured water depth rather than the water velocities, the calibration results are somehow more unpredictable.

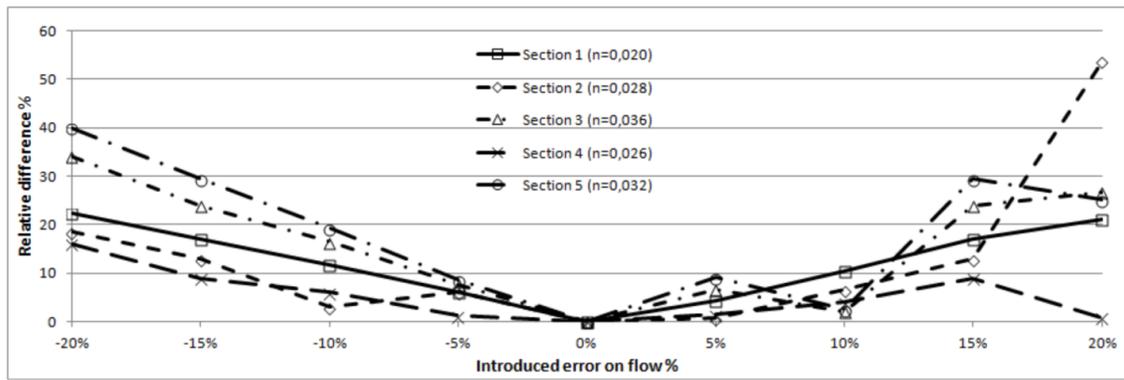


Figure A-19 Calibration sensitivity against model input flow using measured water depth and velocities

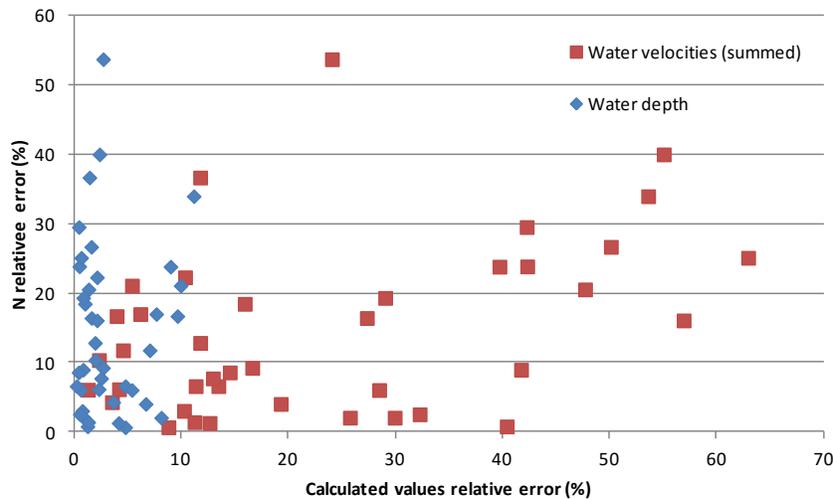


Figure A-20 Calibration error distribution of calculated water depth error and the summed error of calculated water velocities

4. CONCLUSIONS

This study presents the development of a tool combining PEST, an automatic calibration program, with the hydraulic model SRH-2D. The tool serves as an easy-to-use set of forms that can provide a rapid and functional linkage of a model with the automatic calibration tool. The amount of information required by the user and the user's interaction with the tool are minimized to provide a rapid preparation of the calibration process for the project at hand.

The tool was applied to the Ha! Ha! river model based on the post-flooding event of 1996, which drastically changed its morphology. The model comprised five reaches, each represented by a Manning roughness coefficient. An original set of parameters was used to generate observation values that were then used for multiple calibration series conducted to assess the effect of different scenarios on the calibration results. The positions, number and content of the observation points varied in the scenarios to establish the minimal calibration conditions and common guidelines for the usage of the tool.

The first series of calibrations used a growing number of observation points containing the measured water depth until each reach was supplied with one observation point. The calibration results were optimal when one observation point was present for every reach of the model. Reaches without observation points led to miscalibrated parameters that negatively influenced the calibration of the upstream parameter. This negative effect on the upstream reach could be corrected by using observation points that are as far away as possible from the miscalibrated reach.

The results from another calibration series, where the measured water velocities were added to the observation points, showed that fewer observation points are required to yield satisfactory calibration results. The use of water velocities in the calibration process, combined with the water depths, indeed proved to be much more effective when estimating parameter values. Moreover, the additional information significantly reduced the calibration error when slight errors were introduced in the measure water depths.

A sensitivity analysis also showed that parameters that were calibrated by providing a better fit between measured and modelled water velocities presented better results. Indeed, parameters accentuating the concordance of water depths displayed a wide range of errors compared to

velocities based on parameters that had a more predictable outcome regarding the calibration error.

It is suggested that the automatic aspect of the tool should be used to address the question of uncertainty and equifinality associated with the parameter estimation obtained through the calibration process. Additional scenarios should be tested to explore the continuity of the model performance or the continuity of the parameter estimation when the following calibration conditions are changed: parameter starting values, parameter range, observation values disposition, etc. Additionally, the calibration process should be revisited using different performance criteria based on a global evaluation of the modelled results or a subdomain measurement of performance. Pappenberger et al. (2007) showed that the way of evaluating the model performance in the calibration process (i.e., objective function) has an impact on the results at different scales (local or global). Precaution must also be taken when assessing the calibration process as equifinality can be encountered when multiple sets of parameters may satisfy the fitting of the observation data (Beven & Freer, 2001; Pappenberger et al., 2005).

Considering the positive results obtained using the current build of O.P.P.S, further work should be done to include the sediment transport module of SRH-2D in the automatic calibration process. As of now, PEST does not include the calibration of discontinuous parameters, which could possibly cause problems considering that sediment transport parameters include integer-like input values. In this case, the calibration could be executed in two consecutive motions: the first would calibrate the continuous parameters; the second, using the calibration results of the continuous parameters, could iterate through a user-selected range of discontinuous parameters, selecting the set of parameters giving the best fit.

Acknowledgments

This research was supported in part by a National Science and Engineering Research Council (NSERC) Discovery Grant, application No: RGPIN-2016-06413.

REFERENCES

- Aquaveo. (2013). *SMS User Manual, Surface-water Modeling System (v11.1)*.
- Bahreman, A., & De Smedt, F. (2010). Predictive Analysis and Simulation Uncertainty of a Distributed Hydrological Model. *Water Resources Management*, 24(12), 2869-2880. doi:10.1007/s11269-010-9584-1
- Beven, K., & Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. *Journal of Hydrology*, 249(1), 11-29.
- Boyle, D. P., Gupta, H. V., & Sorooshian, S. (2000). Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663-3674.
- Capart, H., Spinewine, B., Yougn, D. L., Zech, Y., Brooks, G. R., Leclerc, M., & Secretan, Y. (2007). The 1996 Lake Ha! Ha! breakout flood, Quebec: Test data for geomorphic flood routing methods. *JOURNAL OF HYDRAULIC RESEARCH*, 45, 97-109.
- Diaz-Ramirez, J. N., McAnally, W. H., & Martin, J. L. (2012). Sensitivity of Simulating Hydrologic Processes to Gauge and Radar Rainfall Data in Subtropical Coastal Catchments. *Water Resources Management*, 26(12), 3515-3538. doi:10.1007/s11269-012-0088-z
- Doherty, J. (2010). *PEST, Model-Independent Parameter Estimation User Manual : 5th Edition: Watermark Numerical Computing*.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resour. Res*, 28(4), 1015-1031.
- Ellis, R. J., Doherty, J., Searle, R. D., & Moodie, K. (2009). *Applying PEST (Parameter ESTimation) to improve parameter estimation and uncertainty analysis in WaterCAST models*. Paper presented at the 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation: Interfacing Modelling and Simulation with Mathematical and Computational Sciences, Cairns, Australia. <http://mssanz.org.au/modsim09>
- Fabio, P., Aronica, G. T., & Apel, H. (2010). Towards automatic calibration of 2-D flood propagation models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(6), 911-924. doi:10.5194/hess-14-911-2010
- Gonzalez, P. (2016). *Modélisation de la propagation des inondations en zone urbaine*. (Master), Université de Montréal, École Polytechnique de Montréal.
- Hall, J. W., Tarantola, S., Bates, P. D., & Horritt, M. (2005). Distributed Sensitivity Analysis of Flood Inundation Model Calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 117-126. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(117)
- Kim, S. M., Benham, B. L., Brannan, K. M., Zeckoski, R. W., & Doherty, J. (2007). Comparison of hydrologic calibration of HSPF using automatic and manual methods. *Water Resources Research*, 43(1), n/a-n/a. doi:10.1029/2006wr004883

- Lai, Y. G. (2008). *SRH-2D version 2: Theory and User's Manual*: U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Technical Service Center Denver, Colorado.
- Lai, Y. G. (2009). Two-dimensional depth-averaged flow modeling with an unstructured hybrid mesh. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(1), 12-23.
- McCloskey, G., Ellis, R., Waters, D., & Stewart, J. (2011). *PEST hydrology calibration process for source catchments—applied to the Great Barrier Reef, Queensland*. Paper presented at the 19th International Congress on Modeling and Simulation, Perth, Australia.
- McKibbin, J., & Mahdi, T. F. (2010). Automatic calibration tool for river models based on the MHYSER software. *Natural Hazards*, 54(3), 879-899. doi:10.1007/s11069-010-9512-y
- Pappenberger, F., Beven, K., Frodsham, K., Romanowicz, R., & Matgen, P. (2007). Grasping the unavoidable subjectivity in calibration of flood inundation models: A vulnerability weighted approach. *Journal of Hydrology*, 333(2), 275-287.
- Pappenberger, F., Beven, K., Horritt, M., & Blazkova, S. (2005). Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, 302(1-4), 46-69. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.06.036
- Rode, M., Suhr, U., & Wriedt, G. (2007). Multi-objective calibration of a river water quality model—Information content of calibration data. *Ecological Modelling*, 204(1), 129-142.
- Vidal, J. P., Moisan, S., Faure, J. B., & Dartus, D. (2007). River model calibration, from guidelines to operational support tools. *Environmental Modelling & Software*, 22(11), 1628-1640. doi:10.1016/j.envsoft.2006.12.003
- Warmick, J. J., Klis, H. v. d., & Hulscher, M. J. B. S. J. M. H. (2010). *Quantification of uncertainties in a 2 D hydraulic model for the Dutch river Rhine using expert opinions*. Paper presented at the Environmental Hydraulics.

ANNEXE B – RÉSULTATS DÉTAILLÉS DES ESSAIS DE CALIBRATION

Calibration avec la hauteur d'eau

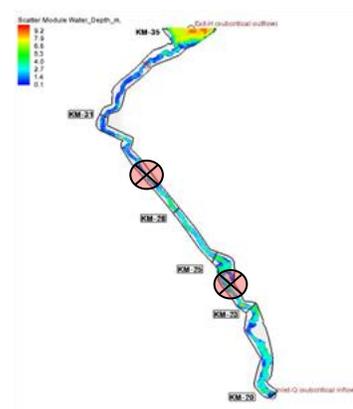
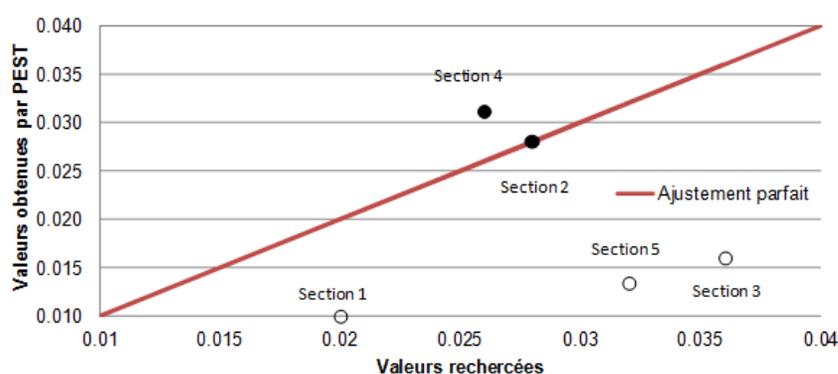
Points d'observation au centre des sections, valeurs de départ à 0,01

2 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 5

Nombre d'appels du modèle : 37

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.020	0.010	50.00
Section 2	0.028	0.028	0.01
Section 3	0.036	0.016	55.47
Section 4	0.026	0.031	19.48
Section 5	0.032	0.013	58.05

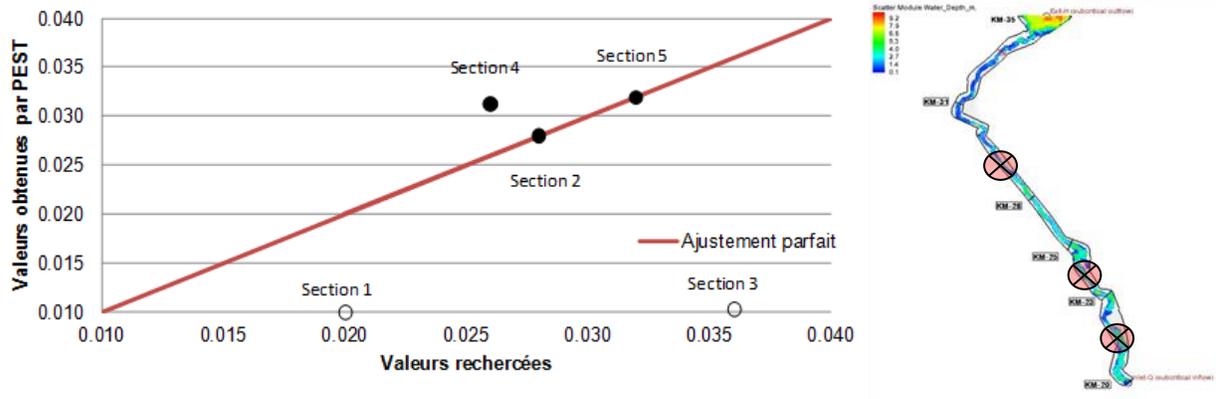
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00

3 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 6

Nombre d'appels du modèle : 48

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.020	0.010	50.00
Section 2	0.028	0.028	0.01
Section 3	0.036	0.010	71.35
Section 4	0.026	0.031	20.22
Section 5	0.032	0.032	0.33

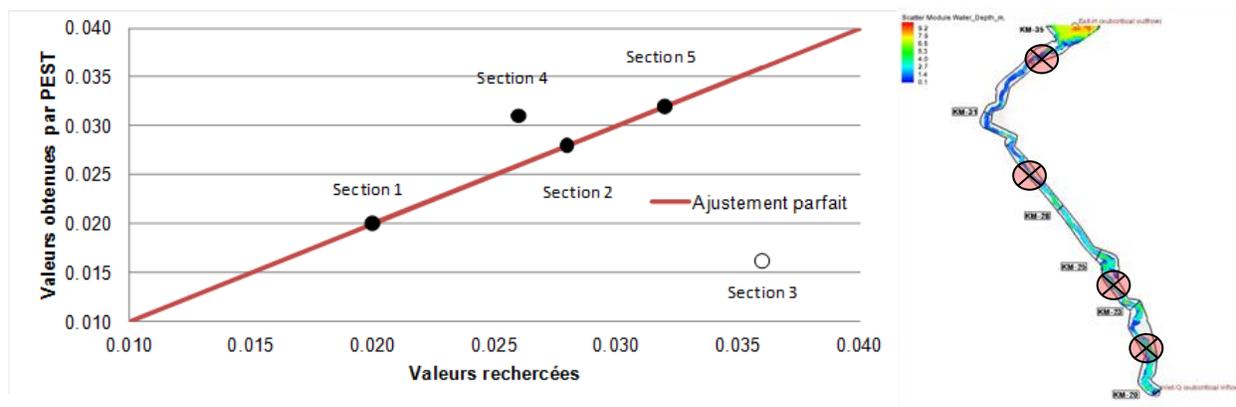
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

4 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 10

Nombre d'appels du modèle : 88

Valeur de ϕ (résiduel) : 1,0000E-08



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.020	0.020	0.24
Section 2	0.028	0.028	0.01
Section 3	0.036	0.016	54.96
Section 4	0.026	0.031	19.45
Section 5	0.032	0.032	0.04

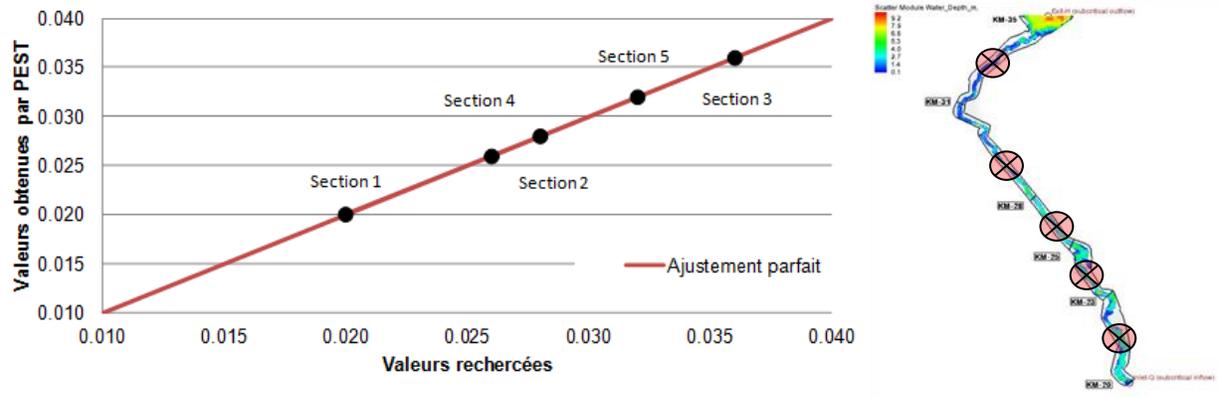
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.416	1.416	0.00
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

5 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 11

Nombre d'appels du modèle : 91

Valeur de ϕ (résiduel) : 1,0000E-08



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.020	0.020	0.23
Section 2	0.028	0.028	0.02
Section 3	0.036	0.036	0.05
Section 4	0.026	0.026	0.15
Section 5	0.032	0.032	0.03

Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.416	1.416	0.00
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 3	3.551	3.551	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

Calibration avec la hauteur d'eau

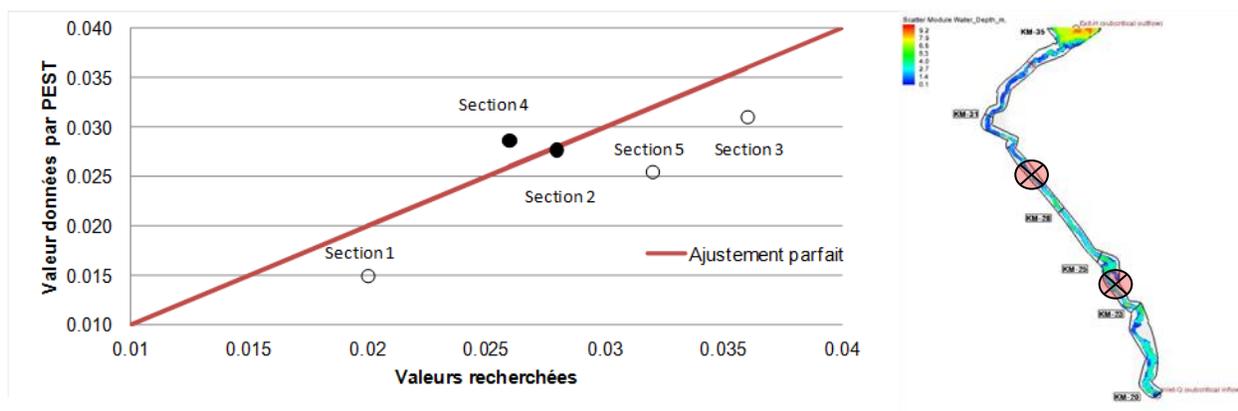
Points d'observation au centre des sections, valeurs de départ ajustées

2 points d'observation, valeurs de départ ajustées

Nombre d'itérations : 4

Nombre d'appels du modèle : 35

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.015	25.0
Section 2	0.028	0.028	1.1
Section 3	0.036	0.031	13.6
Section 4	0.026	0.029	10.2
Section 5	0.032	0.026	20.2

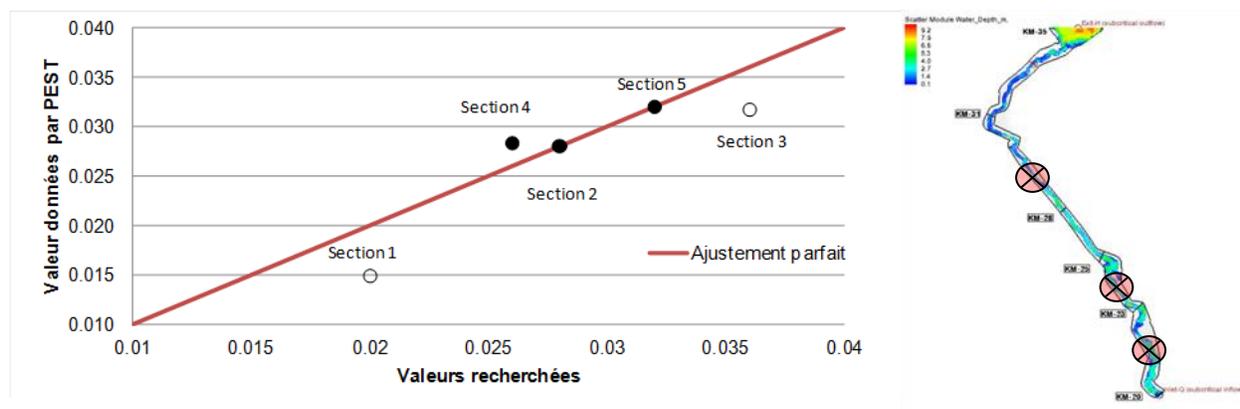
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00

3 points d'observation, valeurs de départ ajustées

Nombre d'itérations : 7

Nombre d'appels du modèle : 43

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.015	25.0
Section 2	0.028	0.028	0.1
Section 3	0.036	0.032	11.6
Section 4	0.026	0.028	8.0
Section 5	0.032	0.032	0.1

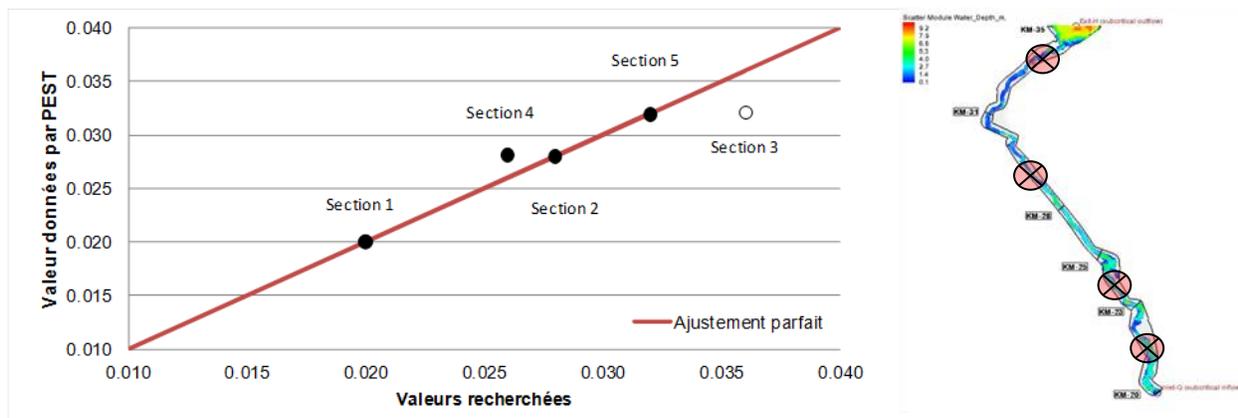
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

4 points d'observation, valeurs de départ ajustées

Nombre d'itérations : 6

Nombre d'appels du modèle : 37

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	0.2
Section 2	0.028	0.028	0.1
Section 3	0.036	0.032	10.7
Section 4	0.026	0.028	8.2
Section 5	0.032	0.032	0.3

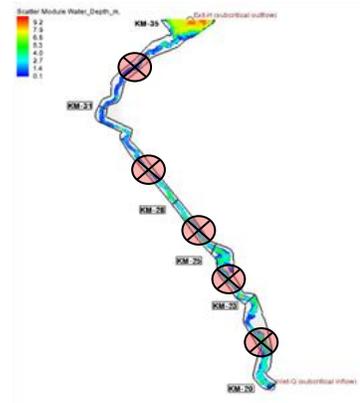
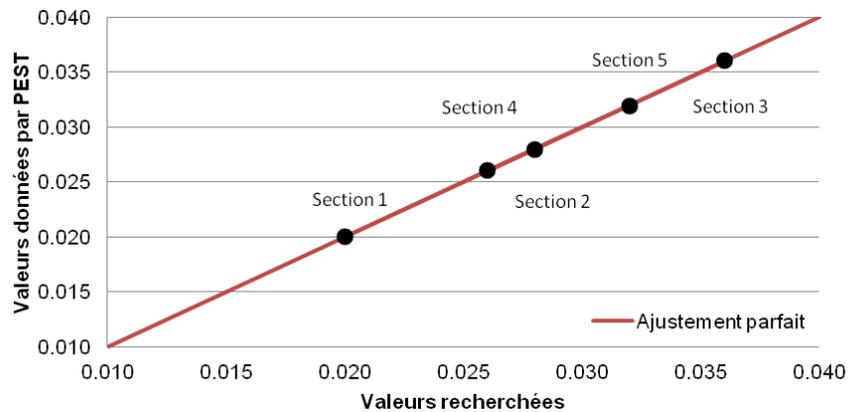
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.416	1.416	0.00
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

5 points d'observation, valeurs de départ ajustées

Nombre d'itérations : 10

Nombre d'appels du modèle : 80

Valeur de ϕ (résiduel) : 1,0E-08



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	0.2
Section 2	0.028	0.028	0.0
Section 3	0.036	0.036	0.1
Section 4	0.026	0.026	0.1
Section 5	0.032	0.032	0.3

Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.416	1.416	0.00
Section 2	2.786	2.786	0.00
Section 3	3.551	3.551	0.00
Section 4	3.463	3.463	0.00
Section 5	3.222	3.222	0.00

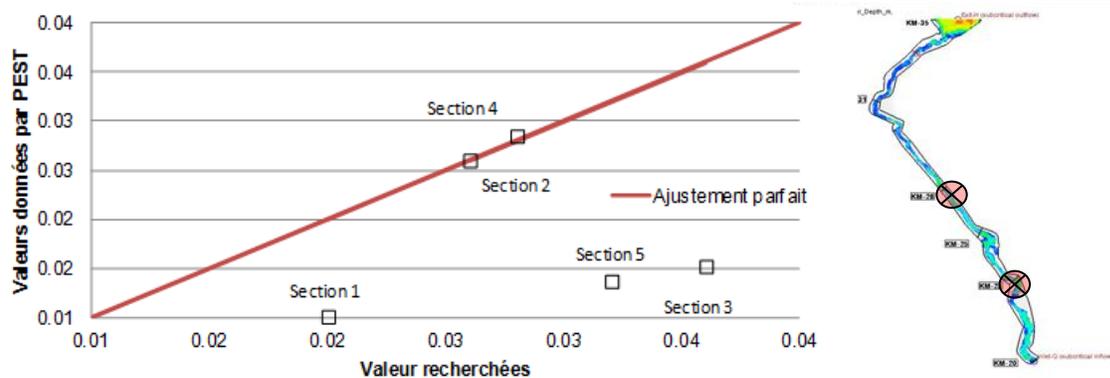
Points d'observation aux frontières des sections, valeurs de départ à 0,01

2 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 4

Nombre d'appels du modèle : 25

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.010	49.65
Section 2	0.028	0.028	1.73
Section 3	0.036	0.015	57.82
Section 4	0.026	0.026	0.020
Section 5	0.032	0.014	57.26

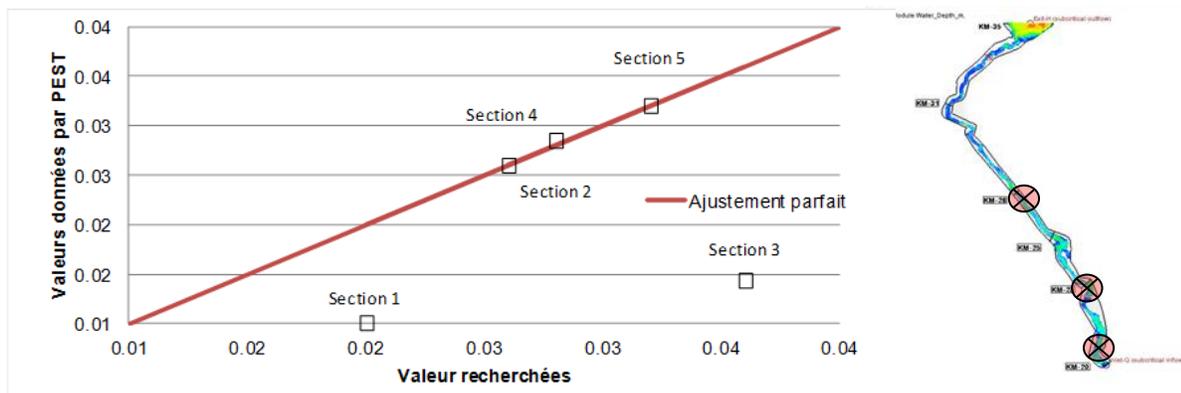
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
S2 / S3	3.537	3.537	0.00
S4 / S5	4.305	4.305	0.00

3 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 5

Nombre d'appels du modèle : 36

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.010	49.76
Section 2	0.028	0.028	1.72
Section 3	0.036	0.014	60.20
Section 4	0.026	0.026	0.13
Section 5	0.032	0.032	0.032

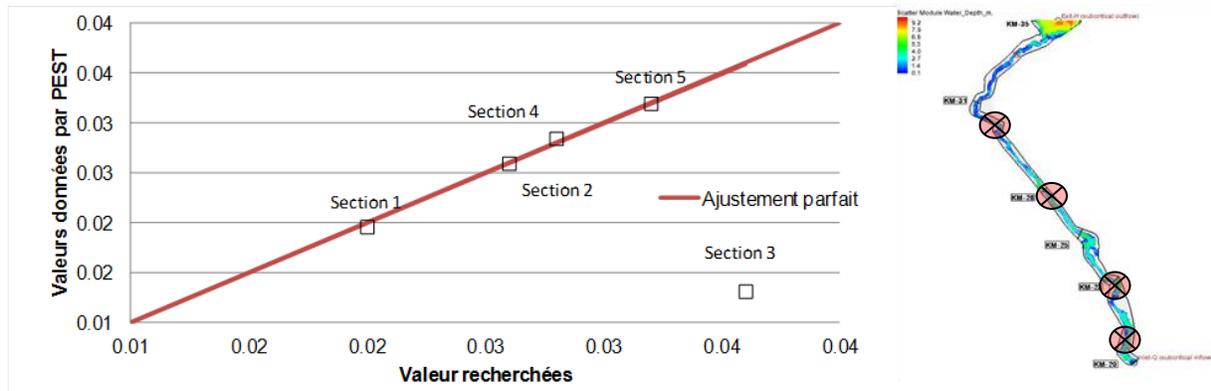
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
S2 / S3	3.537	3.537	0.00
S4 / S5	4.305	4.305	0.00
Amont	2.533	2.533	0.00

4 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 7

Nombre d'appels du modèle : 54

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	1.94
Section 2	0.028	0.028	1.71
Section 3	0.036	0.013	63.51
Section 4	0.026	0.026	0.12
Section 5	0.032	0.032	0.01

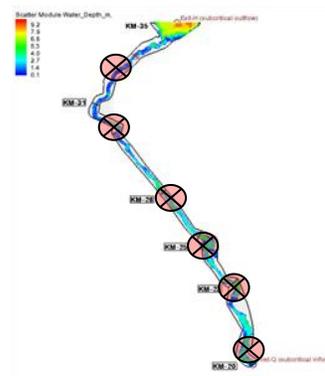
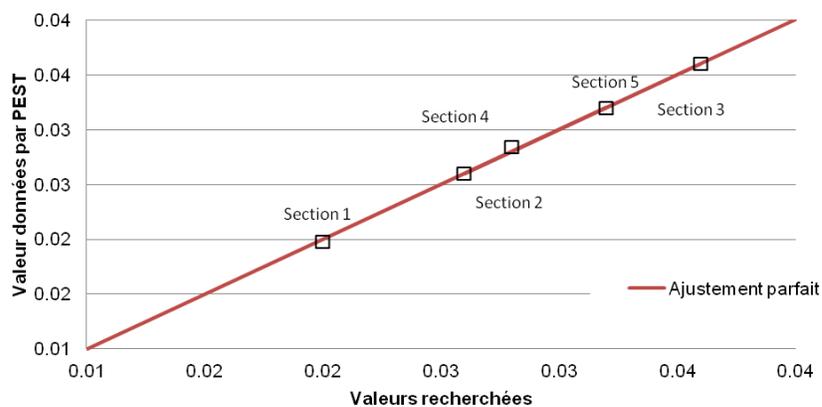
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
S1 / S2	1.277	1.277	0.00
S2 / S3	3.537	3.537	0.00
S4 / S5	4.305	4.305	0.00
Amont	2.533	2.533	0.00

5 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 10

Nombre d'appels du modèle : 83

Valeur de ϕ (résiduel) : 3,0E-06



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	0.10
Section 2	0.028	0.028	1.57
Section 3	0.036	0.011	70.76
Section 4	0.026	0.026	0.08
Section 5	0.032	0.032	0.01

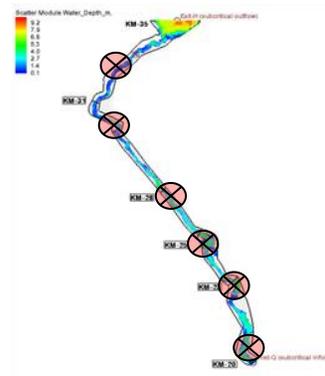
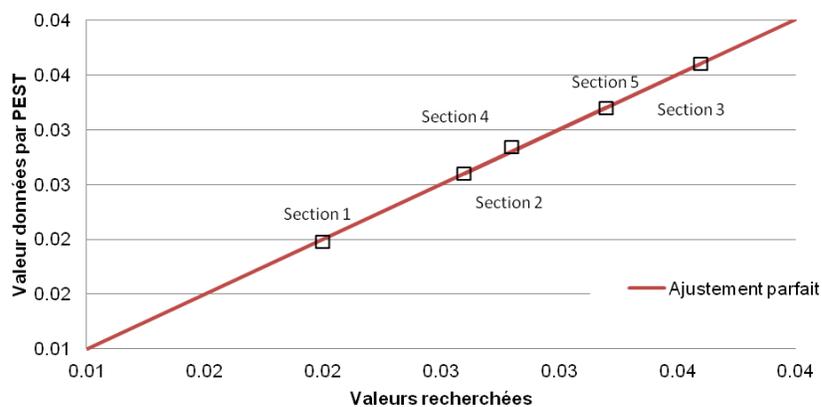
Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Aval	1.800	1.800	0.01
S1 / S2	1.277	1.279	0.13
S2 / S3	3.537	3.536	0.02
S4 / S5	4.305	4.3052	0.00
Amont	2.533	2.533	0.00

6 points d'observation, valeurs de départ à 0,01

Nombre d'itérations : 11

Nombre d'appels du modèle : 83

Valeur de ϕ (résiduel) : 1,0E-06



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	0.23
Section 2	0.028	0.028	1.59
Section 3	0.036	0.036	0.03
Section 4	0.026	0.026	0.12
Section 5	0.032	0.032	0.15

Points d'observations	H observé (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Aval	1.800	1.800	0.02
S1 / S2	1.277	1.2777	0.05
S2 / S3	3.537	3.5364	0.02
S3 / S4	3.539	3.539	0.00
S4 / S5	4.305	4.305	0.00
Amont	2.533	2.533	0.00

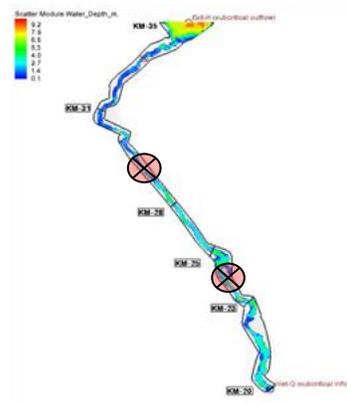
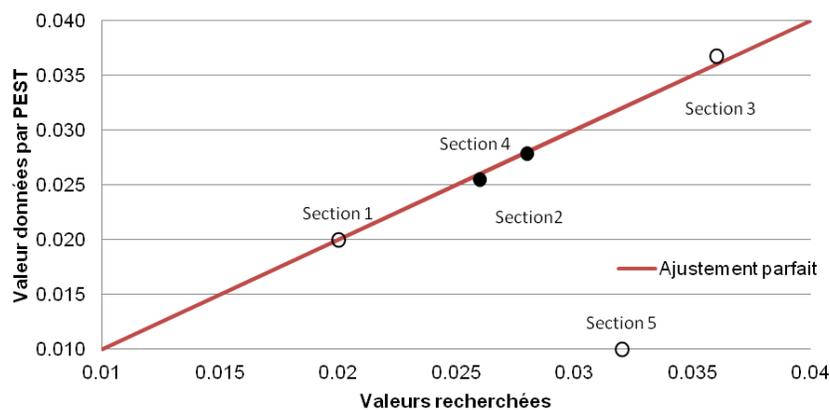
Calibration avec hauteur d'eau et vitesse

2 points d'observation

Nombre d'itérations : 16

Nombre d'appels du modèle : 186

Valeur de ϕ (résiduel) : 7,3E-05



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	0.0
Section 2	0.028	0.028	0.6
Section 3	0.036	0.037	2.1
Section 4	0.026	0.025	2.0
Section 5	0.032	0.010	68.8

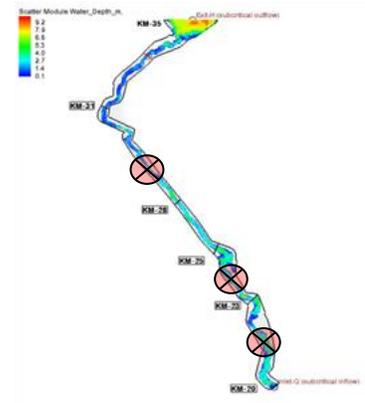
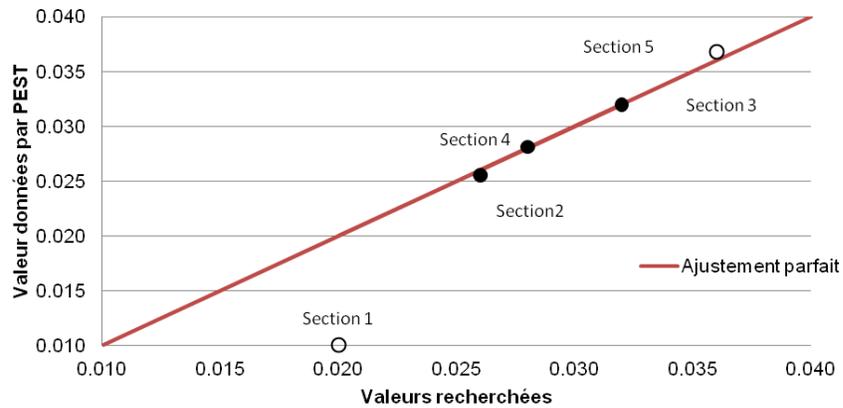
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S2	2.786	2.786	0.00	-1.23	-1.24	0.58	0.90	0.90	0.39	1.53	1.53	0.11
S4	3.463	3.463	0.00	-0.28	-0.28	0.11	0.54	0.54	0.26	0.61	0.61	0.33

3 points d'observation

Nombre d'itérations : 21

Nombre d'appels du modèle : 257

Valeur de ϕ (résiduel) : 4,8E-05



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.010	50.0
Section 2	0.028	0.028	0.4
Section 3	0.036	0.037	2.0
Section 4	0.026	0.026	1.8
Section 5	0.032	0.032	0.1

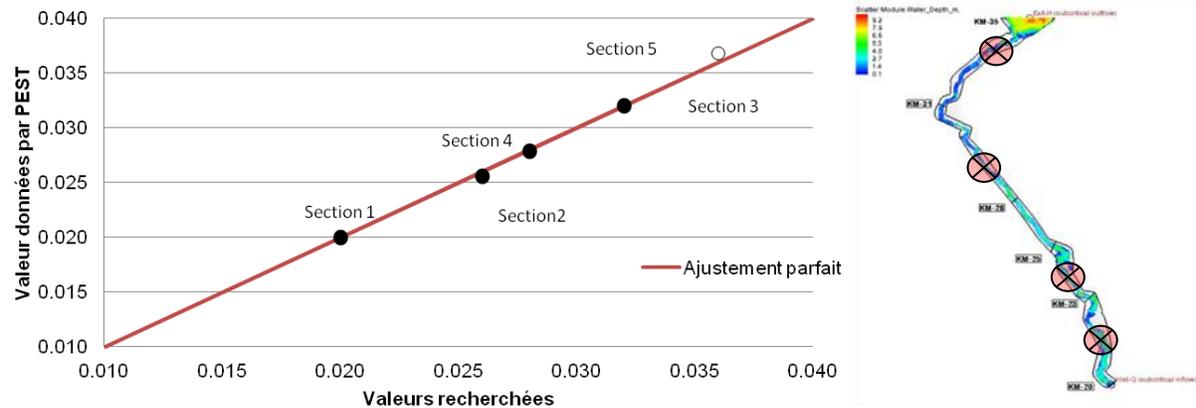
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S2	2.786	2.786	0.00	-1.23	-1.24	0.38	0.90	0.90	0.51	1.53	1.53	0.05
S4	3.463	3.463	0.00	-0.28	-0.28	0.04	0.54	0.54	0.19	0.61	0.61	0.26
S5	3.222	3.222	0.01	-0.22	-0.21	0.05	0.37	0.37	0.00	0.43	0.43	0.07

4 points d'observation

Nombre d'itérations : 15

Nombre d'appels du modèle : 165

Valeur de ϕ (résiduel) : 7,4E-05



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	0.3
Section 2	0.028	0.028	0.6
Section 3	0.036	0.037	2.2
Section 4	0.026	0.026	1.8
Section 5	0.032	0.032	0.1

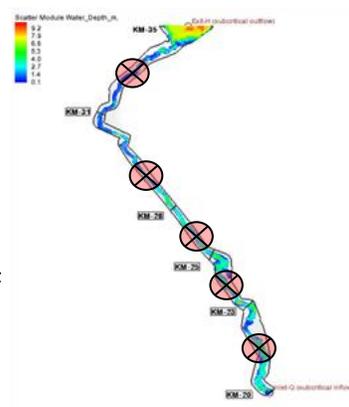
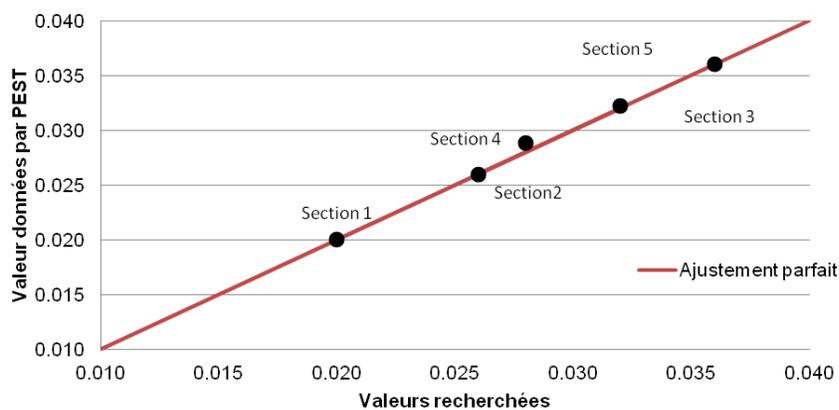
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.4151	0.06	1.15	1.14	0.10	0.94	0.94	0.12	1.48	1.48	0.03
S2	2.786	2.785	0.04	-1.23	-1.24	0.58	0.90	0.90	0.39	1.53	1.53	0.12
S4	3.463	3.4638	0.02	-0.28	-0.28	0.54	0.54	0.54	0.13	0.61	0.61	0.08
S5	3.222	3.2216	0.01	-0.22	-0.21	0.05	0.37	0.37	0.00	0.43	0.43	0.07

5 points d'observation

Nombre d'itérations : 9

Nombre d'appels du modèle : 71

Valeur de ϕ (résiduel) : 1,9E-04



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	0.2
Section 2	0.028	0.029	2.9
Section 3	0.036	0.036	0.0
Section 4	0.026	0.026	0.3
Section 5	0.032	0.032	0.5

Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.415	0.07	1.15	1.142	0.37	0.94	0.94	0.26	1.48	1.48	0.01
S2	2.786	2.791	0.18	-1.23	-1.23	0.08	0.90	0.90	0.85	1.53	1.52	0.47
S3	3.55	3.55	0.01	-0.56	-0.56	0.18	0.53	0.53	0.61	0.77	0.77	0.01
S4	3.463	3.462	0.01	-0.28	-0.28	0.57	0.54	0.54	0.02	0.61	0.61	0.03
S5	3.222	3.225	0.09	-0.22	-0.21	0.28	0.37	0.37	0.16	0.43	0.43	0.12

Étude de sensibilité – mesures de hauteur d'eau

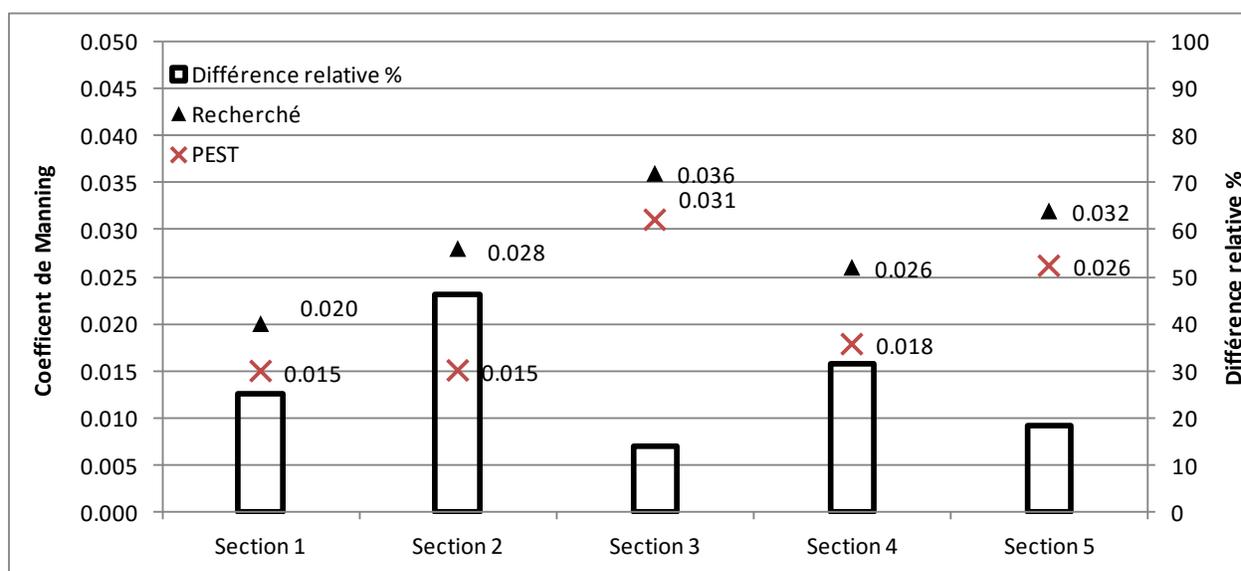
Calibration utilisant la hauteur d'eau seulement

-10 cm aux mesures de hauteur d'eau

Nombre d'itérations : 9

Nombre d'appels du modèle : 74

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.020	0.015	25.2
Section 2	0.028	0.015	46.3
Section 3	0.036	0.031	13.7
Section 4	0.026	0.018	31.5
Section 5	0.032	0.026	18.3

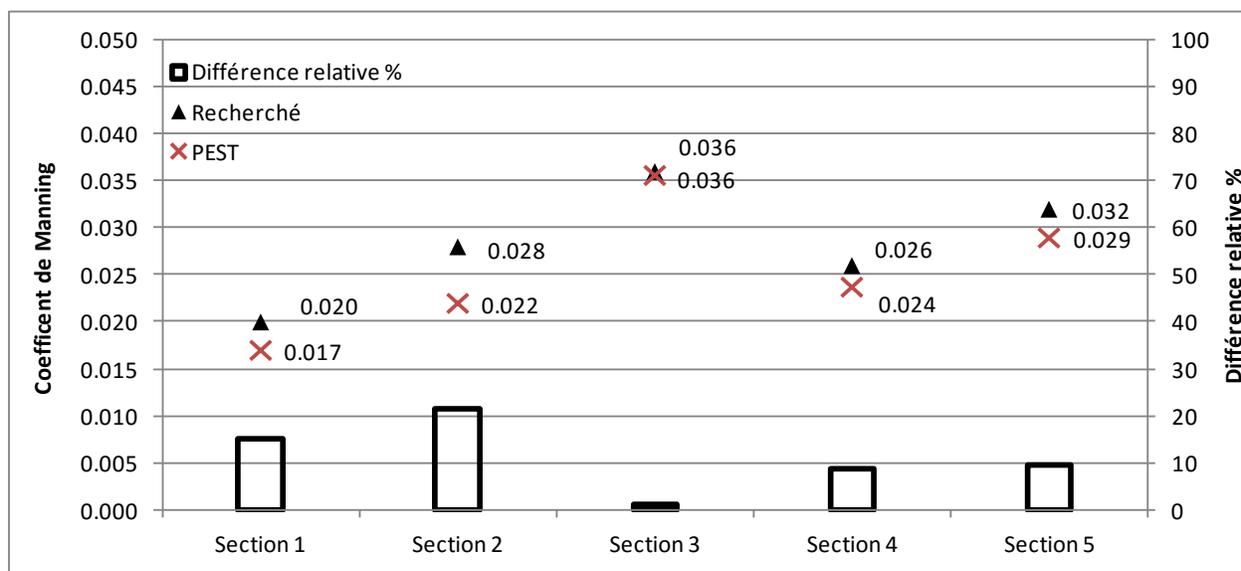
Points d'observations	H erreur (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.316	1.316	0.00
Section 2	2.686	2.686	0.00
Section 3	3.451	3.450	0.03
Section 4	3.363	3.363	0.00
Section 5	3.122	3.122	0.00

-5 cm aux mesures de hauteur d'eau

Nombre d'itérations : 10

Nombre d'appels du modèle : 74

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.017	15.1
Section 2	0.028	0.022	21.5
Section 3	0.036	0.036	1.2
Section 4	0.026	0.024	8.8
Section 5	0.032	0.029	9.6

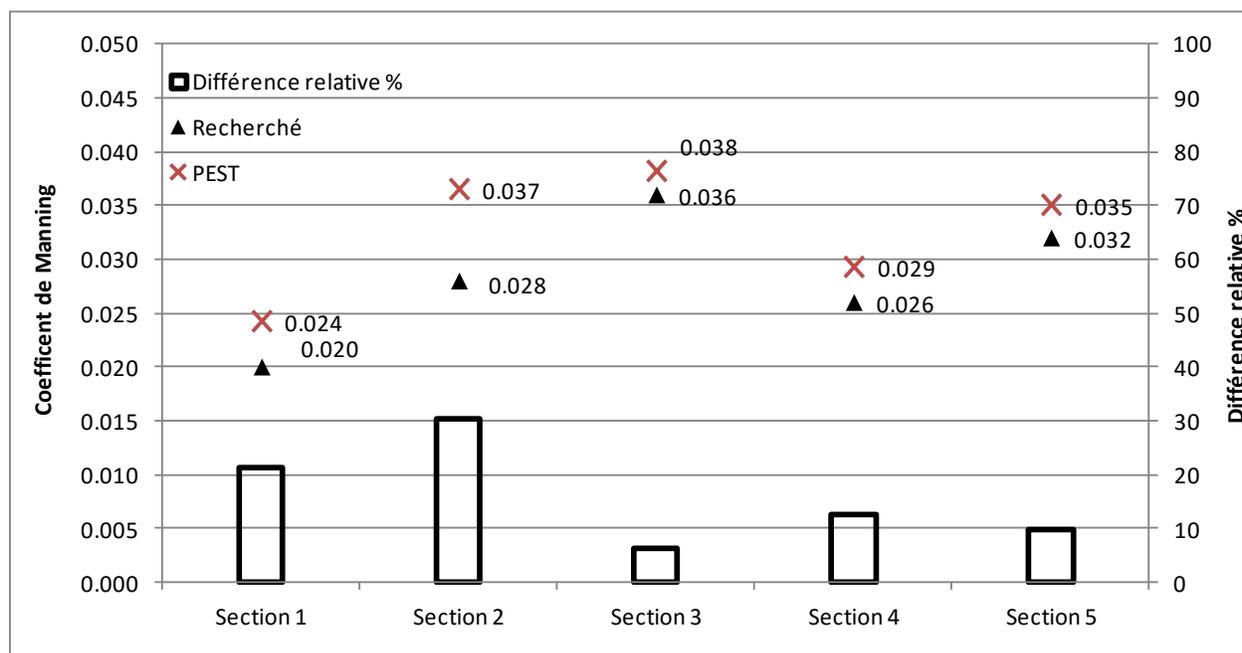
Points d'observations	H erreur (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.366	1.366	0.01
Section 2	2.736	2.736	0.00
Section 3	3.501	3.500	0.03
Section 4	3.413	3.413	0.00
Section 5	3.172	3.172	0.00

+5 cm aux mesures de hauteur d'eau

Nombre d'itérations : 9

Nombre d'appels du modèle : 58

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.024	21.3
Section 2	0.028	0.037	30.5
Section 3	0.036	0.038	6.2
Section 4	0.026	0.029	12.7
Section 5	0.032	0.035	9.6

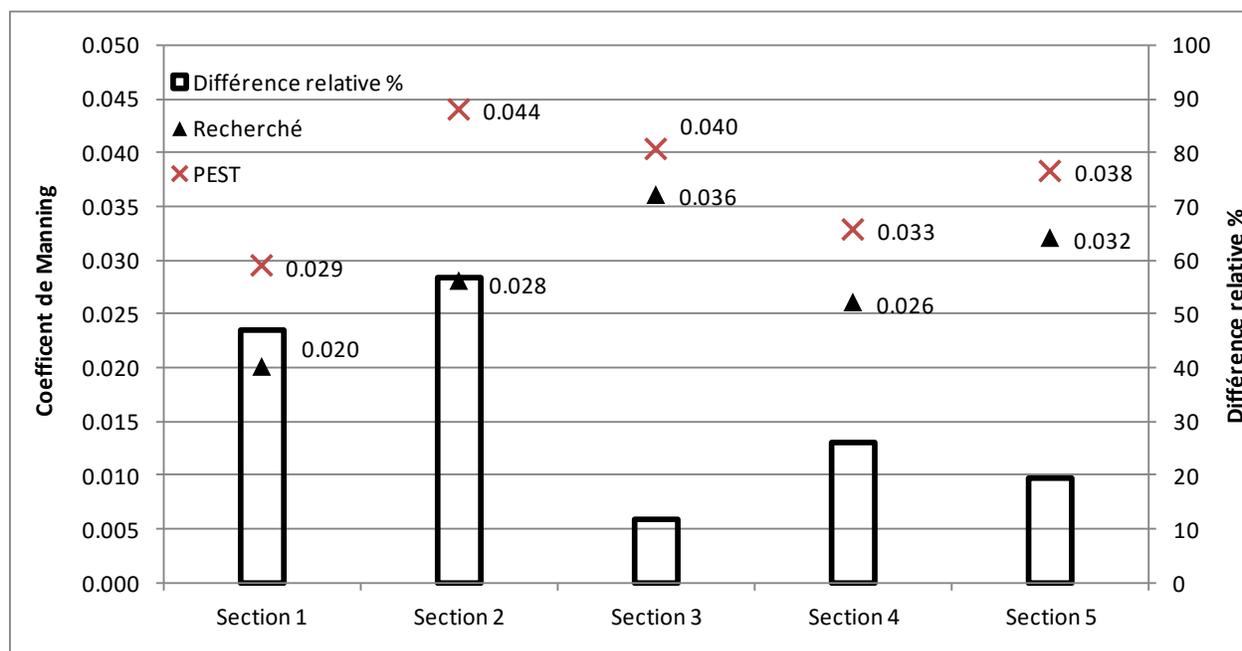
Points d'observations	H erreur (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.366	1.366	0.01
Section 2	2.736	2.736	0.00
Section 3	3.501	3.500	0.03
Section 4	3.413	3.413	0.00
Section 5	3.172	3.172	0.00

+10 cm aux mesures de hauteur d'eau

Nombre d'itérations : 9

Nombre d'appels du modèle : 70

Valeur de ϕ (résiduel) : 0



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.029	47.0
Section 2	0.028	0.044	56.9
Section 3	0.036	0.040	11.8
Section 4	0.026	0.033	26.0
Section 5	0.032	0.038	19.4

Points d'observations	H erreur (m)	H simulé (m)	Différence relative %
Section 1	1.366	1.366	0.01
Section 2	2.736	2.736	0.00
Section 3	3.501	3.500	0.03
Section 4	3.413	3.413	0.00
Section 5	3.172	3.172	0.00

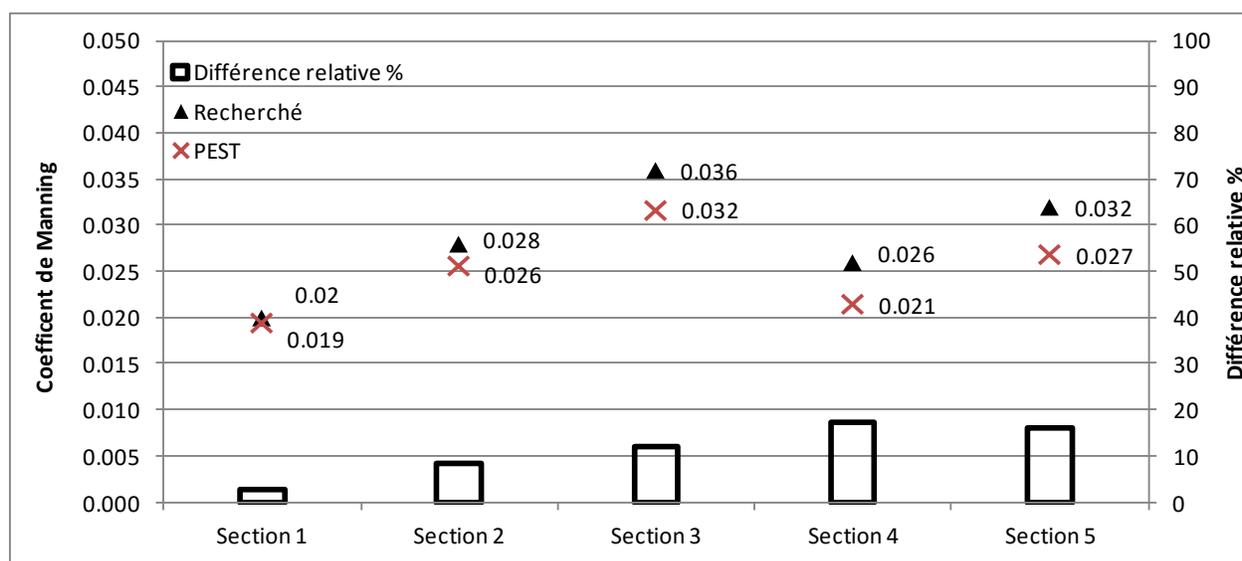
Calibration utilisant les mesures de hauteur d'eau et de vitesses

-10 cm aux mesures de hauteur d'eau

Nombre d'itérations : 10

Nombre d'appels du modèle : 117

Valeur de ϕ (résiduel) : 2,4E-02



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.019	2.8
Section 2	0.028	0.026	8.5
Section 3	0.036	0.032	12.1
Section 4	0.026	0.021	17.4
Section 5	0.032	0.027	16.0

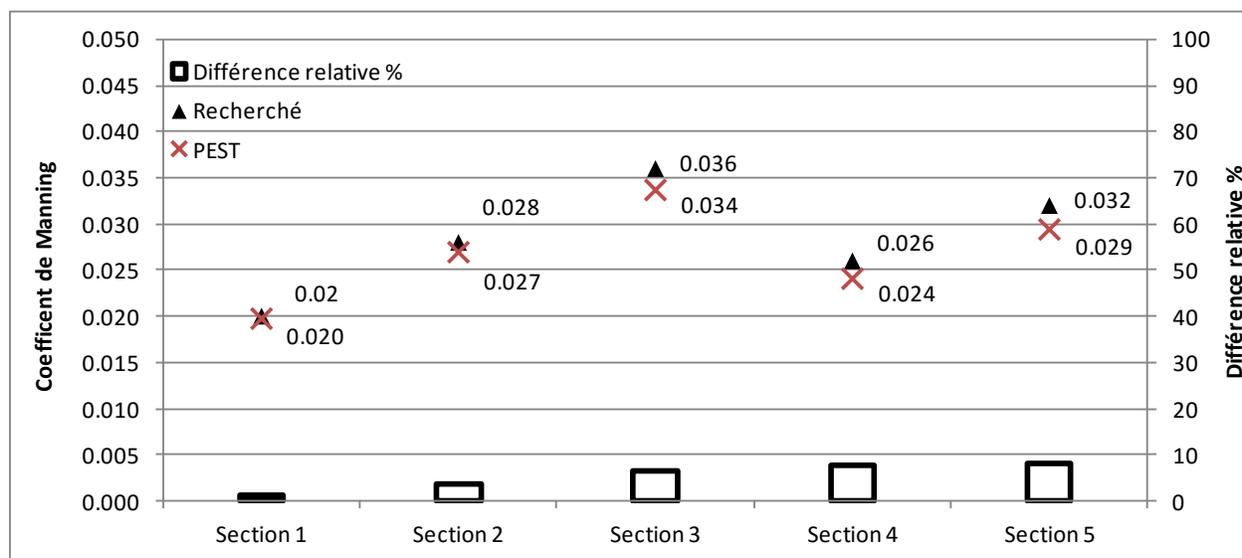
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.316	1.41	7.02	1.15	1.16	0.99	0.94	0.95	1.46	1.48	1.50	1.30
S2	2.686	2.77	3.11	-1.23	-1.26	2.47	0.90	0.91	0.53	1.53	1.55	1.68
S3	3.451	3.46	0.40	-0.56	-0.58	3.92	0.53	0.54	3.00	0.77	0.79	3.30
S4	3.363	3.40	1.10	-0.28	-0.29	4.00	0.54	0.56	5.16	0.61	0.64	5.02
S5	3.122	3.13	0.38	-0.22	-0.23	6.70	0.37	0.38	4.52	0.43	0.45	5.15

-5 cm aux mesures de hauteur d'eau

Nombre d'itérations : 6

Nombre d'appels du modèle : 59

Valeur de ϕ (résiduel) : 5,9E-03



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	1.4
Section 2	0.028	0.027	3.8
Section 3	0.036	0.034	6.5
Section 4	0.026	0.024	7.5
Section 5	0.032	0.029	8.1

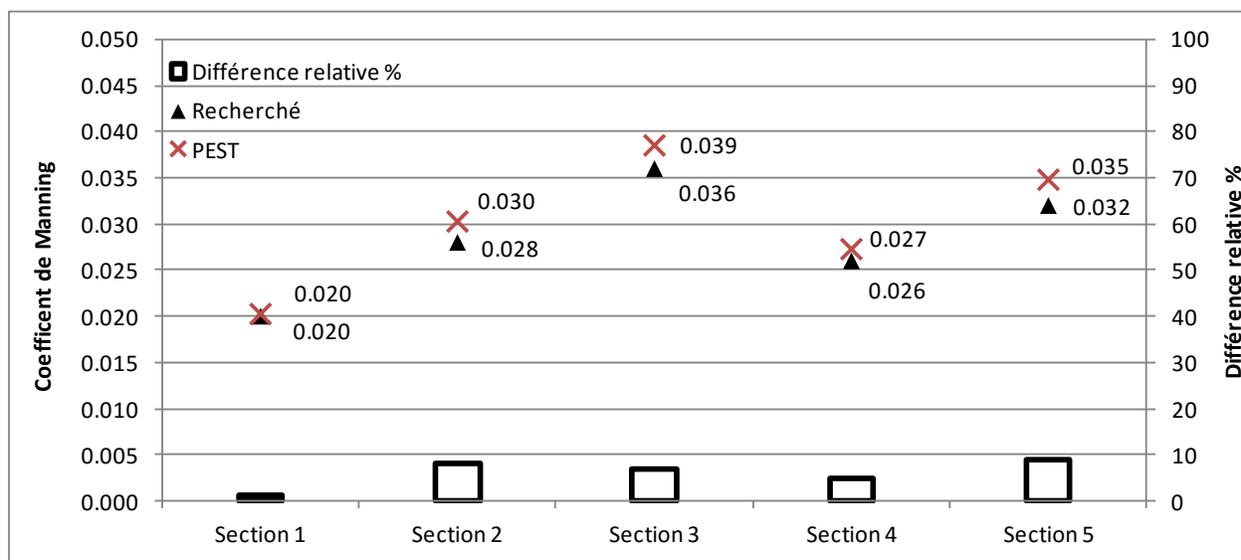
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.366	1.41	3.38	1.15	1.15	0.36	0.94	0.95	0.70	1.48	1.49	0.63
S2	2.736	2.78	1.59	-1.23	-1.25	1.24	0.90	0.90	0.01	1.53	1.54	0.68
S3	3.500	3.51	0.15	-0.56	-0.57	1.93	0.53	0.53	1.56	0.77	0.78	1.57
S4	3.413	3.43	0.49	-0.28	-0.28	1.68	0.54	0.55	2.68	0.61	0.62	2.58
S5	3.172	3.18	0.18	-0.22	-0.22	2.93	0.37	0.37	2.15	0.43	0.44	2.45

+5 cm aux mesures de hauteur d'eau

Nombre d'itérations : 8

Nombre d'appels du modèle : 89

Valeur de ϕ (résiduel) : 5,7E-03



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.020	1.2
Section 2	0.028	0.030	8.1
Section 3	0.036	0.039	7.0
Section 4	0.026	0.027	4.9
Section 5	0.032	0.035	8.7

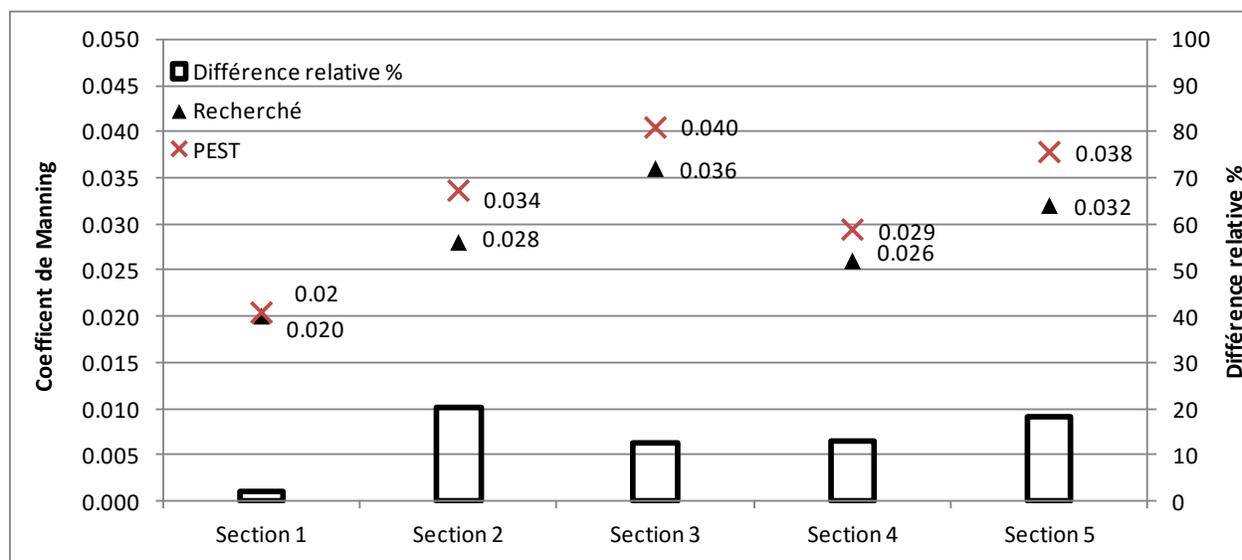
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.466	1.42	3.23	1.15	1.14	0.69	0.94	0.94	0.60	1.48	1.47	0.53
S2	2.836	2.80	1.26	-1.23	-1.22	0.64	0.90	0.89	1.78	1.53	1.51	1.16
S3	3.600	3.60	0.04	-0.56	-0.55	2.06	0.53	0.52	1.27	0.77	0.75	1.87
S4	3.513	3.49	0.53	-0.28	-0.27	2.43	0.54	0.52	2.53	0.61	0.59	2.41
S5	3.272	3.27	0.12	-0.22	-0.21	2.70	0.37	0.36	2.07	0.43	0.42	2.14

+10 cm aux mesures de hauteur d'eau

Nombre d'itérations : 7

Nombre d'appels du modèle : 73

Valeur de ϕ (résiduel) : 2,3E-03



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.020	0.020	2.0
Section 2	0.028	0.034	20.0
Section 3	0.036	0.040	12.4
Section 4	0.026	0.029	13.0
Section 5	0.032	0.038	18.1

Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.516	1.42	6.29	1.15	1.13	1.00	0.94	0.93	0.99	1.48	1.47	0.88
S2	2.886	2.82	2.25	-1.23	-1.24	1.06	0.90	0.84	6.55	1.53	1.50	1.65
S3	3.65	3.64	0.34	-0.56	-0.54	3.52	0.53	0.51	2.87	0.77	0.74	3.39
S4	3.563	3.53	0.94	-0.28	-0.27	4.82	0.54	0.51	5.25	0.61	0.57	5.06
S5	3.322	3.32	0.20	-0.22	-0.20	5.12	0.37	0.35	3.90	0.43	0.41	4.14

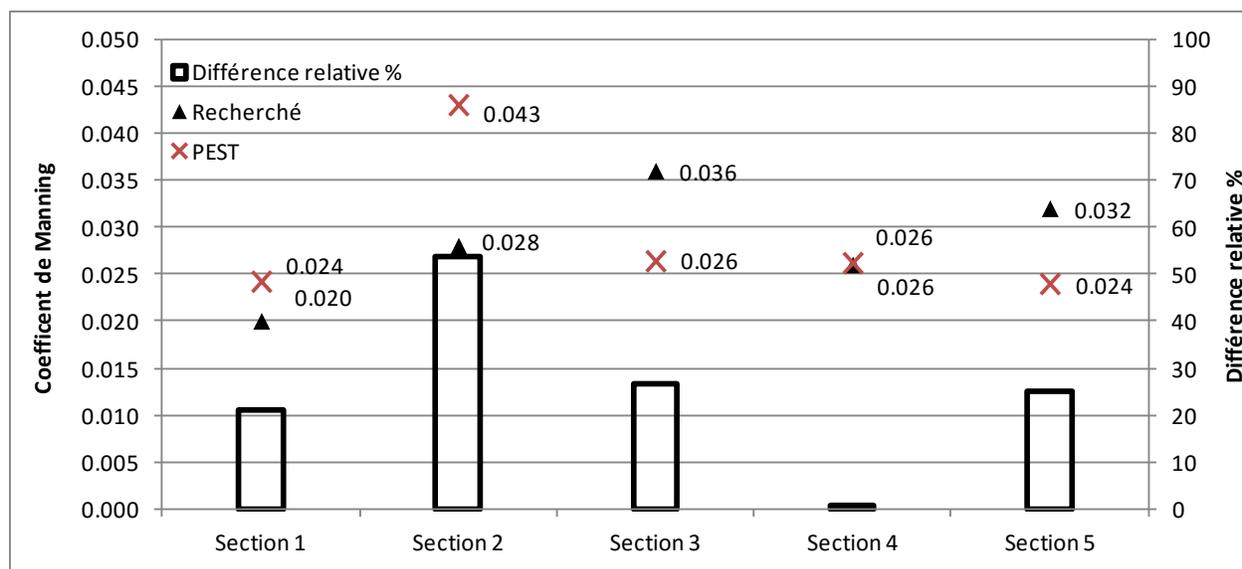
Étude de sensibilité – mesure de débit

+20 % à la mesure de débit du modèle

Nombre d'itérations : 4

Nombre d'appels du modèle : 43

Valeur de ϕ (résiduel) : 0,21



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.020	0.024	21.1
Section 2	0.028	0.043	53.7
Section 3	0.036	0.026	26.7
Section 4	0.026	0.026	0.8
Section 5	0.032	0.024	25.1

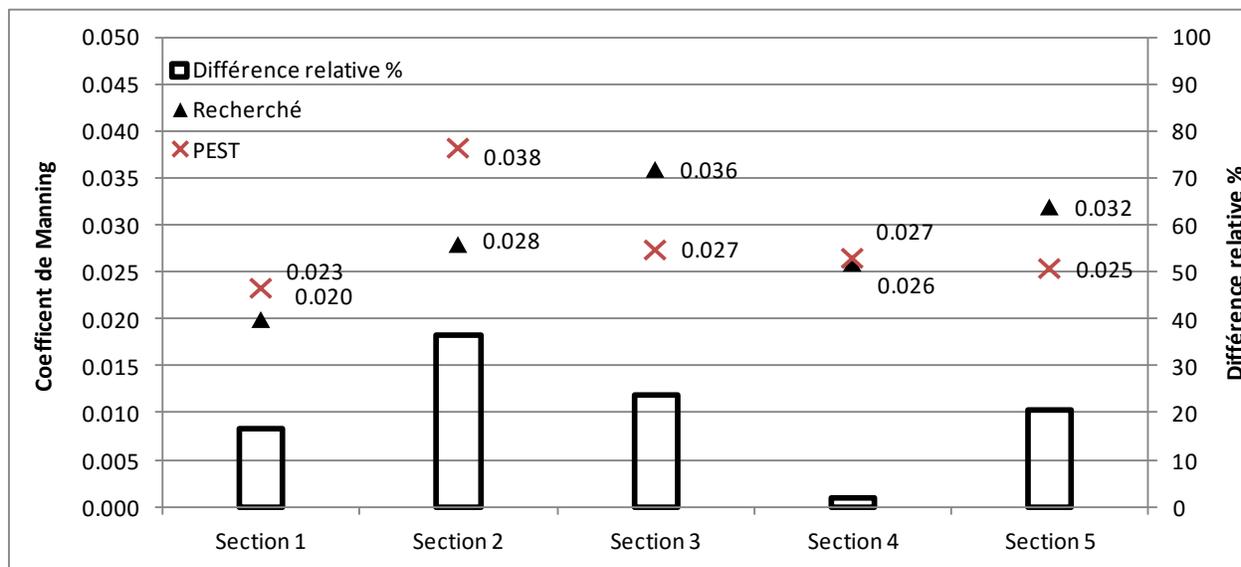
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.556	9.87	1.15	1.18	3.23	0.94	0.94	0.04	1.48	1.51	2.05
S2	2.786	3.053	9.57	-1.23	-1.36	10.84	0.90	0.82	8.92	1.53	1.59	4.23
S3	3.551	3.618	1.90	-0.56	-0.65	16.31	0.53	0.62	17.22	0.77	0.90	16.53
S4	3.463	3.587	3.58	-0.28	-0.32	12.96	0.54	0.61	13.71	0.61	0.69	13.67
S5	3.222	3.288	2.05	-0.22	-0.27	24.14	0.37	0.44	18.61	0.43	0.51	20.14

+15% à la mesure de débit du modèle

Nombre d'itérations : 7

Nombre d'appels du modèle : 67

Valeur de ϕ (résiduel) : 0,11



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.023	16.7
Section 2	0.028	0.038	36.7
Section 3	0.036	0.027	23.8
Section 4	0.026	0.027	2.0
Section 5	0.032	0.025	20.5

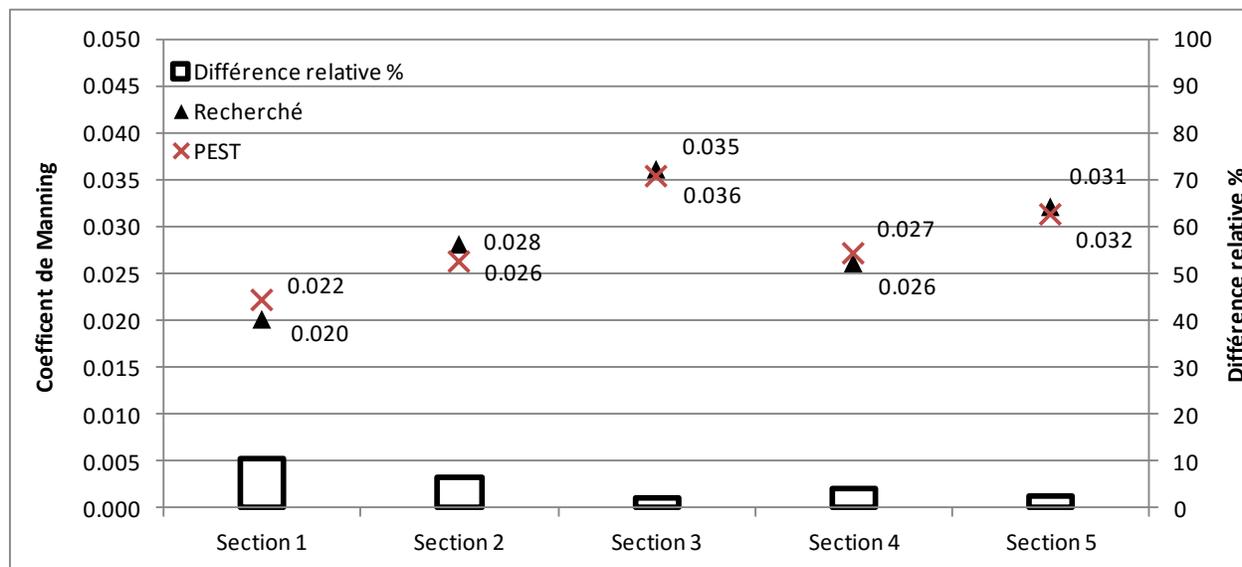
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.524	7.59	1.15	1.17	2.10	0.94	0.93	0.66	1.48	1.50	1.13
S2	2.786	2.980	6.98	-1.23	-1.31	6.70	0.90	0.89	1.06	1.53	1.59	3.93
S3	3.551	3.570	0.52	-0.56	-0.64	13.67	0.53	0.60	14.66	0.77	0.88	13.93
S4	3.463	3.554	2.63	-0.28	-0.31	10.11	0.54	0.59	9.80	0.61	0.67	9.97
S5	3.222	3.266	1.35	-0.22	-0.25	18.33	0.37	0.42	14.06	0.43	0.49	15.27

+10 % à la mesure de débit du modèle

Nombre d'itérations : 8

Nombre d'appels du modèle : 83

Valeur de ϕ (résiduel) : 5,1E-02



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.022	10.3
Section 2	0.028	0.026	6.6
Section 3	0.036	0.035	2.0
Section 4	0.026	0.027	4.0
Section 5	0.032	0.031	2.5

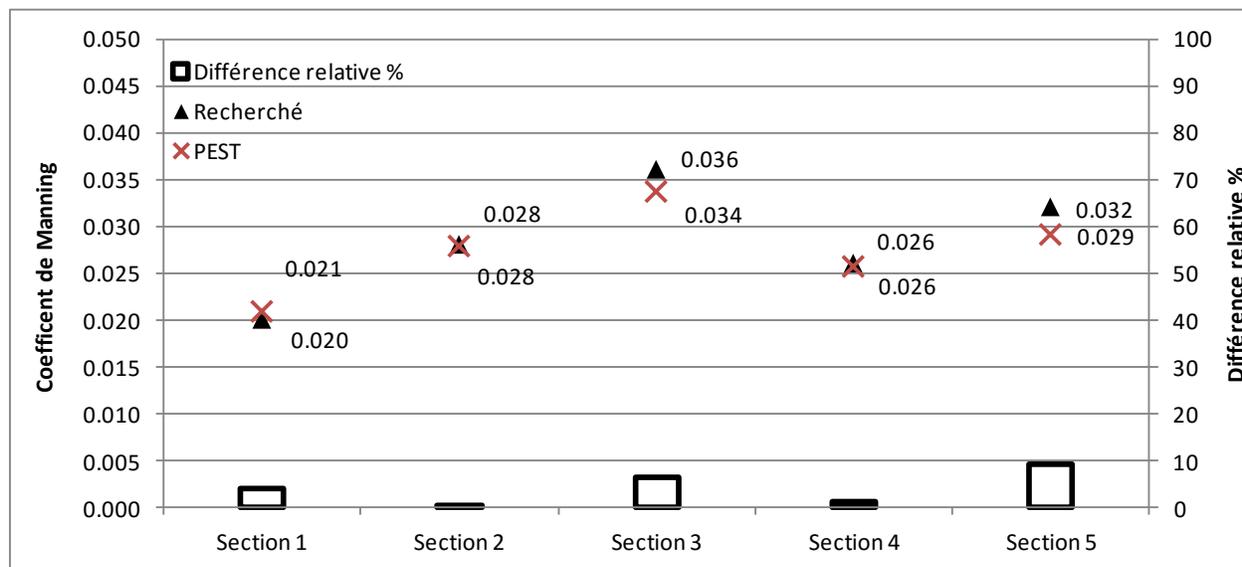
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.483	4.70	1.15	1.16	1.22	0.94	0.94	0.27	1.48	1.49	0.75
S2	2.786	2.917	4.70	-1.23	-1.30	5.96	0.90	0.88	2.28	1.53	1.57	3.03
S3	3.551	3.584	0.93	-0.56	-0.60	8.09	0.53	0.57	9.20	0.77	0.83	8.40
S4	3.463	3.528	1.87	-0.28	-0.30	6.54	0.54	0.57	6.26	0.61	0.64	6.43
S5	3.222	3.244	0.68	-0.22	-0.24	12.23	0.37	0.40	9.59	0.43	0.47	10.38

+5% à la mesure de débit du modèle

Nombre d'itérations : 10

Nombre d'appels du modèle : 95

Valeur de ϕ (résiduel) : 1,4E-02



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.021	4.3
Section 2	0.028	0.028	0.6
Section 3	0.036	0.034	6.6
Section 4	0.026	0.026	1.4
Section 5	0.032	0.029	9.2

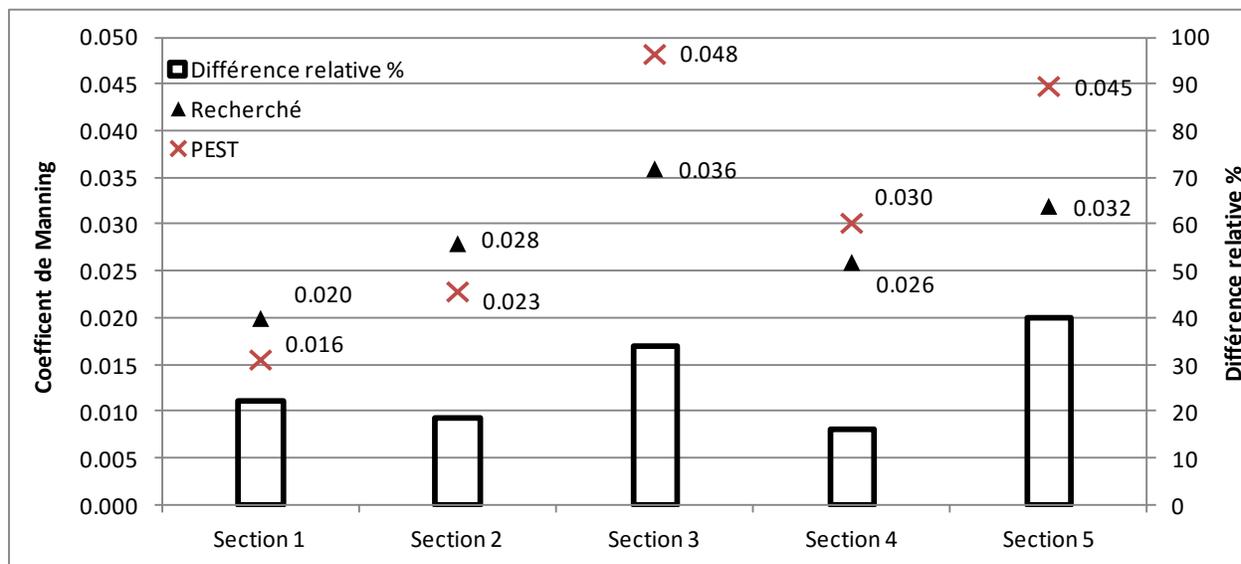
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.447	2.22	1.15	1.16	0.98	0.94	0.95	1.25	1.48	1.50	1.22
S2	2.786	2.828	1.52	-1.23	-1.28	4.19	0.90	0.91	1.43	1.53	1.58	3.11
S3	3.551	3.565	0.40	-0.56	-0.58	4.10	0.53	0.55	4.98	0.77	0.80	4.32
S4	3.463	3.491	0.82	-0.28	-0.29	3.57	0.54	0.56	3.76	0.61	0.63	3.83
S5	3.222	3.227	0.15	-0.22	-0.23	6.19	0.37	0.39	4.99	0.43	0.45	5.39

-20% à la mesure de débit du modèle

Nombre d'itérations : 11

Nombre d'appels du modèle : 114

Valeur de ϕ (résiduel) : 0,19



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.016	22.3
Section 2	0.028	0.023	18.4
Section 3	0.036	0.048	34.0
Section 4	0.026	0.030	16.1
Section 5	0.032	0.045	40.0

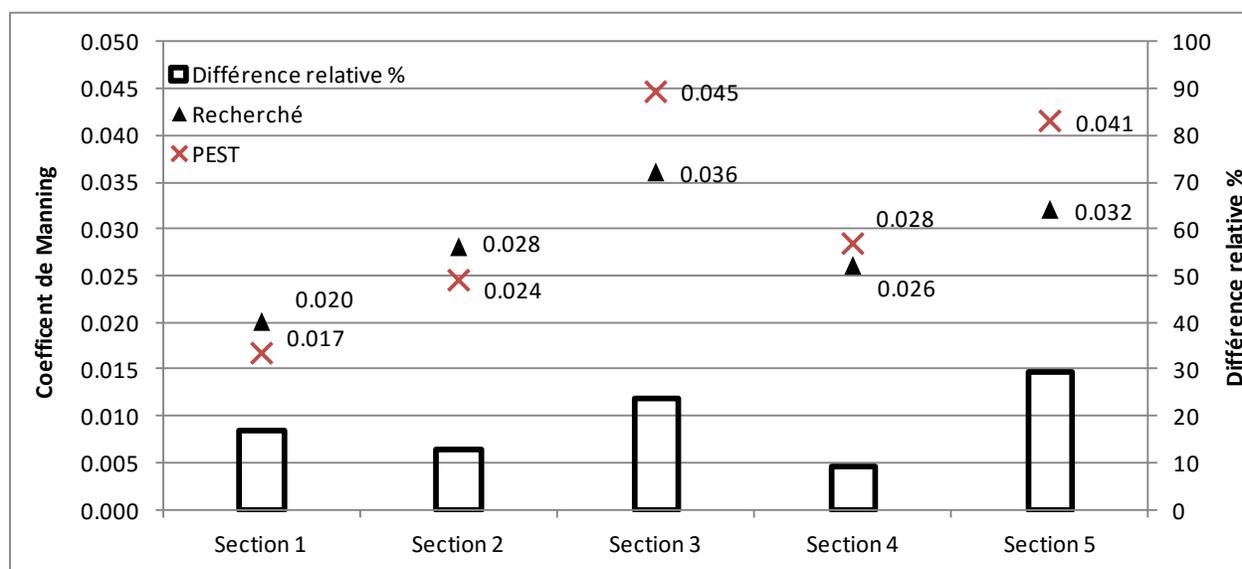
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.259	11.09	1.15	1.07	6.37	0.94	0.95	0.48	1.48	1.43	3.44
S2	2.786	2.537	8.92	-1.23	-1.22	1.00	0.90	0.81	10.52	1.53	1.46	4.34
S3	3.551	3.497	1.53	-0.56	-0.46	17.42	0.53	0.43	18.19	0.77	0.63	17.93
S4	3.463	3.378	2.44	-0.28	-0.22	19.68	0.54	0.44	18.51	0.61	0.49	18.68
S5	3.222	3.184	1.17	-0.22	-0.17	19.30	0.37	0.30	17.68	0.43	0.35	18.02

-15% à la mesure de débit du modèle

Nombre d'itérations : 8

Nombre d'appels du modèle : 74

Valeur de ϕ (résiduel) : 0,11



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.017	17.0
Section 2	0.028	0.024	12.8
Section 3	0.036	0.045	23.8
Section 4	0.026	0.028	8.9
Section 5	0.032	0.041	29.5

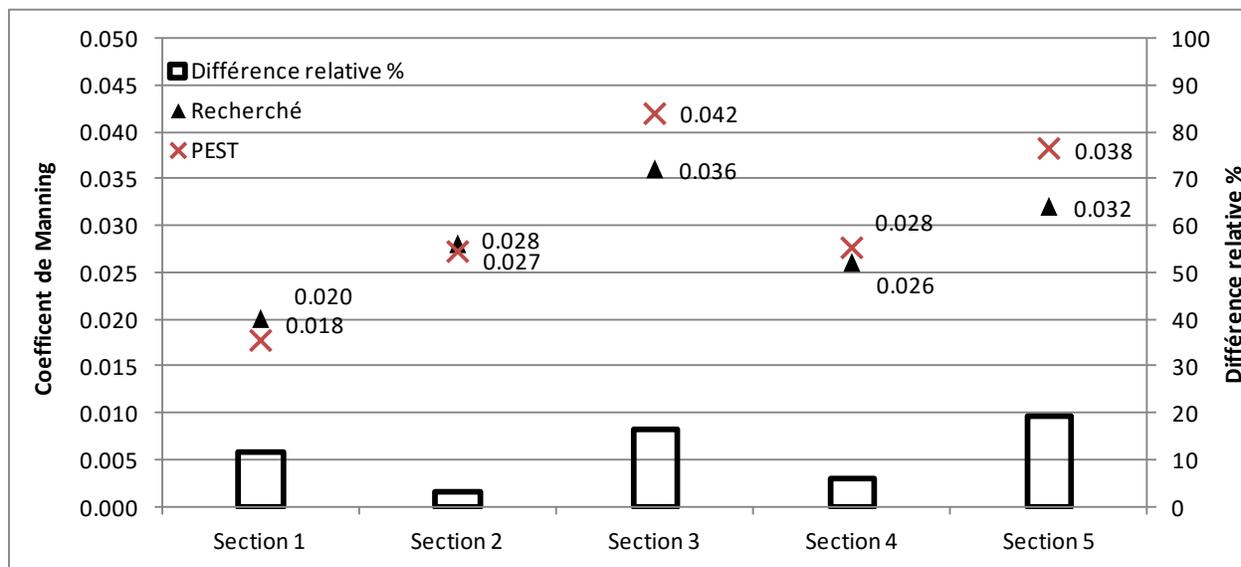
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.302	8.05	1.15	1.10	3.90	0.94	0.94	0.01	1.48	1.45	2.19
S2	2.786	2.602	6.60	-1.23	-1.23	0.32	0.90	0.83	8.24	1.53	1.48	3.13
S3	3.551	3.507	1.24	-0.56	-0.49	12.86	0.53	0.46	13.48	0.77	0.67	13.32
S4	3.463	3.392	2.05	-0.28	-0.24	14.32	0.54	0.46	13.65	0.61	0.52	13.70
S5	3.222	3.198	0.75	-0.22	-0.18	14.98	0.37	0.32	13.46	0.43	0.37	13.76

-10% à la mesure de débit du modèle

Nombre d'itérations : 9

Nombre d'appels du modèle : 95

Valeur de ϕ (résiduel) : 4,8E-02



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.018	11.7
Section 2	0.028	0.027	3.0
Section 3	0.036	0.042	16.4
Section 4	0.026	0.028	6.0
Section 5	0.032	0.038	19.3

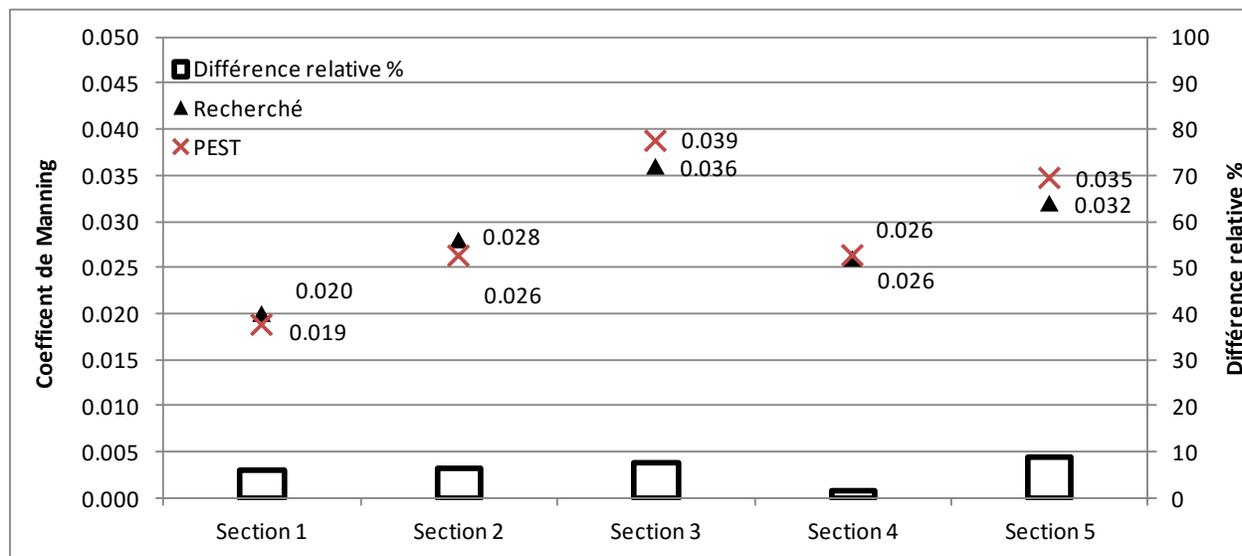
Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.341	5.30	1.15	1.11	2.85	0.94	0.94	0.11	1.48	1.46	1.53
S2	2.786	2.673	4.07	-1.23	-1.23	0.24	0.90	0.83	7.45	1.53	1.49	2.50
S3	3.551	3.530	0.58	-0.56	-0.51	8.86	0.53	0.48	9.22	0.77	0.70	9.19
S4	3.463	3.419	1.27	-0.28	-0.25	9.79	0.54	0.49	9.31	0.61	0.55	9.32
S5	3.222	3.208	0.45	-0.22	-0.19	10.47	0.37	0.33	9.13	0.43	0.39	9.39

-5% à la mesure de débit du modèle

Nombre d'itérations : 10

Nombre d'appels du modèle : 85

Valeur de ϕ (résiduel) : 1,2E-02



Coefficients de Manning	Recherché	PEST	Différence relative %
Section 1	0.02	0.019	6.1
Section 2	0.028	0.026	6.1
Section 3	0.036	0.039	7.7
Section 4	0.026	0.026	1.3
Section 5	0.032	0.035	8.6

Points d'observations	Hauteur d'eau			Vitesse X			Vitesse Y			Module Vitesse		
	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %	Obs. (m)	Sim. (m)	D.R. %
S1	1.416	1.379	2.62	1.15	1.14	0.84	0.94	0.94	0.00	1.48	1.48	0.38
S2	2.786	2.722	2.29	-1.23	-1.22	1.25	0.90	0.89	1.43	1.53	1.51	1.43
S3	3.551	3.538	0.35	-0.56	-0.53	4.54	0.53	0.51	3.92	0.77	0.74	4.42
S4	3.463	3.436	0.77	-0.28	-0.27	4.18	0.54	0.51	4.26	0.61	0.58	4.13
S5	3.222	3.211	0.33	-0.22	-0.20	5.30	0.37	0.35	4.52	0.43	0.41	4.64