PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Développement d'une méthodologie de calage automatisée pour tout modèle de rivière basé sur le logiciel hydrosédimentaire mhyser1.0
Auteur: Author:	Justin McKibbon
Date:	2009
Type:	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis
Référence: Citation:	McKibbon, J. (2009). Développement d'une méthodologie de calage automatisée pour tout modèle de rivière basé sur le logiciel hydrosédimentaire mhyser1.0 [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8440/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/8440/
Directeurs de recherche: Advisors:	Tew-Fik Mahdi
Programme: Program:	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE DE CALAGE AUTOMATISÉE POUR TOUT MODÈLE DE RIVIÈRE BASÉ SUR LE LOGICIEL HYDROSÉDIMENTAIRE MHYSER1.0

JUSTIN MCKIBBON

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUES ET DES MINES

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIMPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)
MAI 2009

© Justin McKibbon, 2009

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-53913-2
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-53913-2

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODOLOGIE DE CALAGE AUTOMATISÉ POUR TOUT MODÈLE DE RIVIÈRE BASÉ SUR LE LOGICIEL HYDROSÉDIMENTAIRE MHYSER1.0

présenté par : MCKIBBON Justin

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

a été dûment acceptée 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. PELLETIER Pierre, M.Sc.A, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, le professeur Tew-Fik Mahdi Ph.D., pour son soutien, ces judicieux conseils ainsi que les nombreuses opportunités d'apprentissage offertes au cours de la maîtrise.

Je remercie aussi les compagnies GENIVAR Inc. et Hydro-Québec, qui ont fourni le modèle de la rivière Romaine et les rapports techniques des études hydrodynamique et hydrosédimentaire réalisées. J'aimerais remercier particulièrement M. Pierre Pelletier, M.Sc.A, de GENIVAR Inc., pour son expertise en lien avec ce projet.

RÉSUMÉ

Le calage manuel des modèles hydrosédimentaires est une opération laborieuse et répétitive nécessitant la supervision continue d'un personnel qualifié et expérimenté. Néanmoins, un effort considérable doit y être investi, car la qualité de l'ajustement est ce qui permet de statuer sur la fiabilité des modèles. Le développement d'une méthodologie de calage automatisée permet donc de réduire le temps consacré à cette opération en plus d'améliorer la qualité des résultats. L'outil mis au point est conçu pour être utilisé avec le logiciel MHYSER1.0, qui modélise les écoulements sur fonds mobiles. Une interface graphique simple et conviviale permet de configurer facilement la procédure et de choisir les paramètres d'optimisation et d'observation désirés. L'outil utilise le logiciel PEST pour effectuer le calage des paramètres d'optimisation continus et ajuste lui-même les paramètres discontinus. La méthodologie est entièrement autonome et, lorsque terminée, retourne le modèle avec la valeur optimale des paramètres de calage. Des simulations réalisées à l'aide de modèles simples permettent de valider la procédure avant sa mise en application avec un modèle élaboré dans le cadre d'une étude sur la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Romaine. Les résultats d'analyses démontrent que la méthodologie est en mesure d'effectuer le calage en peu de temps et avec une excellente précision. L'optimisation des coefficients de Manning mène à un ajustement satisfaisant la ligne d'eau et une étude du débit solide à l'exutoire de la rivière permet d'établir la combinaison optimale pour le choix de l'équation de transport et le nombre de tubes de courant.

Mots clés : calage/calibration automatisé/automatique, modèles hydrosédimentaires, modèles de rivières, écoulements sur fond mobile, transport de sédiments, paramètres d'optimisation, paramètres de calage, paramètres d'observation, MHYSER, GSTARS, PEST.

ABSTRACT

Manual calibration of river models is a laborious and repetitive process, which requires continuous supervision by skilled personnel. This amount of effort is required since the quality of the fitting is normally what gauges the reliability of model predictions. The development of an automatic calibration method provides an effective means to reduce the time needed to complete the procedure, and improve the precision of the results. The instrument created is designed specifically to be used with the natural river hazards prediction model MHYSER1.0. Configuration of the procedure is achieved through a user-friendly graphic interface, which allows to select the desired optimisation and observation parameters. The model-independent parameter estimation software PEST calibrates continuous optimisation parameters, while the instrument itself fits discontinuous parameters. The process is completely autonomous and, once completed, returns the model with the calibration parameters at their optimal values. The instrument is validated using simple models before being applied to a more complex one, developed during a study on the dynamics of sediment routing on the Romaine River. The results show that calibration is achieved rapidly and with excellent precision. Adjustment of the Manning coefficients leads to a satisfactory fitting of the water surface and analysis of the sediment discharge at the mouth of the river enables the identification of the optimal combination between the transport equation and the number of stream tubes used.

Key words : automatic calibration/fitting, river model , sediment transport, sediment routing, natural river hazards predictions, model-independent parameter estimation, optimisation parameters, calibration parameters, observation parameters, MHYSER, GSTARS, PEST.

TABLES DES MATIÈRES

Remerciements iv
Résumé v
Abstract vi
Tables des matières vii
Liste des tableaux ix
Liste des figures xiii
Liste des symboles xvii
Liste des annexes xx
Introduction 1
Chapitre 1 – Transport de sédiments 3
1.1 Fondements théoriques 3
1.2 Notions de rhéologie 5
1.3 Modes de transport 6
1.4 Vitesse de sédimentation 7
1.5 Équations de transport 9
1.5.1 Transport de sédiments non cohésifs 10
1.5.2 Transport de sédiments cohésifs 20
1.6 Transport solide hors équilibre 23
Chapitre 2 – Logiciel hydrosédimentaire MHYSER1.0 24
2.1 Coefficients de pertes de charge 25
2.1.1 Pertes de charge linéaires 25
2.1.2 Pertes de charge singulières 26
2.2 Nombre de tubes de courant 26
2.3 Capacité de transport 28
2.4 Débit solide entrant 29
2.5 Épaisseur de la couche active 29
2.6 Paramètres d'optimisation 30

Chapitre 3 – Logiciel OptiMHYSER 32
3.1 Paramètres de calage et d'observation 32
3.1.1 Paramètres de calage 32
3.1.2 Paramètres d'observation 33
3.2 Logiciel PEST 34
3.2.1 Algorithme PEST 35
3.2.2 Implémentation de l'algorithme PEST 38
3.2.3 Limites du logiciel 45
3.3 Optimisation des paramètres de calage discontinus 46
3.3.1 Paramètres d'optimisation continus et discontinus 46
3.3.2 Paramètres discontinus seulement 48
3.4 Interfaces graphiques OptiMHYSER 49
3.4.1 Classeur Excel 49
3.4.2 Formulaires de saisies 50
3.4.3 Organigramme de programmation 54
Chapitre 4 – Validation et application 57
4.1 Validation 57
4.1.1 Canal trapézoïdal à fond fixe 57
4.1.2 Canal trapézoïdal à fond mobile 61
4.2 Application 64
4.2.1 Description du modèle 65
4.2.2 Calage du modèle 67
Conclusion 88
Bibliographie 91
Annexes 94

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 – Équations originales (1973) et réviées (1990) permettant d'estimer la valeur des coefficients *A*, *C*, *m* et *n* de l'équation de transport de Ackers et White (1973) 16

Tableau 1.2 – Valeurs du coefficients Ω de l'équation de transport de l'Université de Tsinghua (1985) 20

Tableau 2.1 – Équations de transport incluses dans MHYSER1.0 pour les matériaux non cohésifs 28

Tableau 3.1 – Enregistrement des paramètres d'optimisation discontinus sélectionnés 47

Tableau 3.2 – Enregistrement de la valeur de la fonction objective 47

Tableau 4.1 – Caractéristiques du canal trapézoïdal à fond fixe 58

Tableau 4.2 – Résultats d'analyse pour le modèle du canal trapézoïdal à fond fixe 59

Tableau 4.3 – Résultats des analyses effectuées avec le modèle du canal trapézoïdal à fond fixe : Coefficients de Manning désirés et calculés 60

Tableau 4.4 – Résultats des analyses effectuées avec le modèle du canal trapézoïdal à fond fixe : Élévations de la surface libre désirées et calculées 60

Tableau 4.5 – Caractéristiques du canal trapézoïdal à fond mobile 61

Tableau 4.6 – Accumulation des dépôts désirées pour le modèle du canal trapézoïdal à fond mobile 62

Tableau 4.7 – Résultats de la 1ère analyse avec le modèle du canal trapézoïdal à fond mobile 62

Tableau 4.8 – Résultats de la 2e analyse avec le modèle du canal trapézoïdal à fond mobile 63

Tableau 4.9 – Résultats de l'analyse effectuée avec le modèle du canal trapézoïdal à fond mobile (calage des coefficients de la courbe de tarage du débit solide entrant) : ajustement final de l'accumulation des dépôts (poids) 64

Tableau 4.10 – Élévations de la surface libre désirées et calculées issues des modèles original et optimisé pour débits faibles et moyens de la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s) 68

Tableau 4.11 – Données d'observation désirées, employées lors du calage du modèle pour débits faibles et moyens de la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s), et données d'observation calculées finales 69

Tableau 4.12 – Résultats du calage de la ligne d'eau pour le modèle à débits faibles et moyens de la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s) 71

Tableau 4.13 – Résultats de validation pour le modèle à débits faibles et moyens de la rivière Romaine 72

Tableau 4.14 – Validation du modèle pour débits fiables et moyens de la rivière Romaine (calage effectué avec Q = 390 m^3/s) : Élévations de la surface libre mesurées et calculées 73

Tableau 4.15 – Élévations de la surface libre désirées et calculées, issues du modèle optimisé pour débits forts de la rivière Romaine (Q = 1317 m^3/s) 78

Tableau 4.16 – Données d'observation désirées, employées lors du calage du modèle pour débits forts de la rivière Romaine (Q = 1317 m^3/s), et données d'observation calculées finales (modèle original non disponible)..... 79

Tableau 4.17 – Poids annuel de sédiments transportés selon les différentes combinaisons de l'équation de transport et du nombre de tubes de courant mises à l'essai pour le modèle de la rivière Romaine..... 82

Tableau 4.18 – Équation de transport et nombre de tubes de courant offrant le meilleur ajustement selon le poids annuel de sédiments transportés..... 85

Tableau 4.19 – Débits solide journalier (tonnes/jour) : meilleur ajustement selon le poids annuel de sédiments transportés au Pk3.80 pour l'année 2003 (38 300 tonnes)..... 86

Tableau 4.20 – Débits solide journalier (tonnes/jour) : meilleur ajustement selon le débit solide observé au PK3.80 entre le 18 mai 2003 et le 8 juin 2003 (fonction objective minimum)..... 86

Tableau 4.21 – Équation de transport et nombre de tubes de courant offrant le meilleur ajustement selon le débit solide journalier observé..... 87

Tableau B.1 – Équations de transport incluses dans MHYSER1.0 pour les matériaux non cohésifs..... 106

Tableau B.2 – Équations de transport incluses dans MHYSER1.0 pour les matériaux cohésifs..... 106

Tableau C.1 – Description des paramètres d'optimisation du logiciel OptiMHYSER..... 122

Tableau C.1.1 – Valeurs du coefficients Ω de l'équation de transport de l'Université de Tsinghua (1985) 125

Tableau C.2 – Boutons de contrôle du formulaire de saisie principal du logiciel OptiMHYSER 128

Tableau C.3 – Description des paramètres de contrôle du logiciel PEST 130

Tableau C.4 – Paramètres de contrôle PEST liés aux paramètres d'optimisation d'OptiMHYSER 135

Tableau C.5 – Boutons de contrôle du formulaire de saisie « Paramètres Avancés » 137

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 – Vitesse de sédimentation selon le diamètre des particules, la température de l'eau et le facteur de forme (Yang, 2003) 9

Figure 1.2 – Diagramme de Shields (1936) (Yang, 2003) 11

Figure 1.3 – Effet de la concentration de particules en suspension sur la vitesse de sédimentation (Yang et Simões, 2002) 21

Figure 2.1 – Simulation quasi bidimensionnelle (tubes de courant) (Yang et Simões, 2002) 27

Figure 2.2 – Modèle de Bennett et Nordin (Yang et Simões, 2002) 29

Figure 3.1 – Direction de convergence du vecteur de raffinement (a) selon l'algorithme du logiciel PEST et (b) suivant le gradiant négatif de la fonction objective (Doherty, 2004) 36

Figure 3.2 – Exemple (a) d'un fichier d'entrée et (b) d'un fichier gabarit 39

Figure 3.3 – Exemple (a) d'un fichier de sortie et (b) d'un fichier d'instruction 40

Figure 3.4 – Exemple d'un fichier de contrôle PEST 41

Figure 3.5 – Page d'accueil du classeur *Microsoft Excel* auquel d'intègre le logiciel OptiMHYSER 50

Figure 3.6 – Formulaire de saisie principal du logiciel OptiMHYSER : (a) onglet « Paramètres d'optimisation », (b) onglet « Paramètres d'observation » 52

Figure 3.7 – Formulaire de saisie pour les paramètres avancés du logiciel OptiMHYSER : (a) onglet « Contrôle de PEST », (b) onglet « Contrôle des paramètres d'optimisation » 53

Figure 3.8 – Organigramme de programmation du logiciel OptiMHYSER 55

Figure 4.1 – Comportement de base du modèle décrit au tableau 6.1 58

Figure 4.2 – Carte de la rivière Romaine et des sections d'écoulements (GENIVAR, 2007) 66

Figure 4.3 – Ligne d'eau calculée et observée entre le PK0.70 et le PK16.08 sur la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s) 74

Figure 4.4 – Ligne d'eau calculée et observée entre le PK16.00 et le PK35.00 sur la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s) 75

Figure 4.5 – Ligne d'eau calculée et observée entre le PK34.80 et le PK51.75 sur la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s) 76

Figure 4.6 – Comparaison des coefficients de Manning optimisés pour débits faibles et moyens du modèle de la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s) 77

Figure 4.7 – Comparaison des coefficients de Manning optimisés pour débits forts du modèle de la rivière Romaine (Q = 1317 m^3/s) 80

Figure 4.8 – Poids total de sédiments transportés au PK3.80 pour l'année 2003 selon les différentes combinaisons de l'équation de transport et du nombre de tubes de courant mises à l'essai (modèle optimisé) 83

Figure 4.9 – Poids total de sédiments transportés au PK3.80 pour l'année 2003 selon les différentes combinaisons de l'équation de transport et du nombre de tubes de courant mises à l'essai (modèle original) 84

Figure 4.10 – Débit solide journalier au PK3.80, selon le meilleur ajustement du poids annuel de sédiments transportés (38 300 tonnes) 85

Figure 4.11 – Débit solide journalier au PK3.80, selon le meilleur ajustement par rapport aux observations effectuées pendant la période du 18 mai 2003 au 8 juin 2003 87

Figure A.1 – Rivière Romaine et sections d'écoulement du modèle numérique PK0.70 – PK51.75 (GENIVAR, 2007) 95

Figure B.1 – Schématisation des canaux (Yang et Simões, 2002) 98

Figure B.2 – Discrétisation des sections d'écoulement (Yang et Simões, 2002) 98

Figure B.3 – Hydrogramme d'entrée quasi non permanent (Yang et Simões, 2002) 99

Figure B.5 – Simulation quasi bidimensionnelle (tubes de courant) (Yang et Simões, 2002) 99

Figure B.5 – Propriétés géométriques d'un écoulement 101

Figure B.6 – Modèle de Bennett et Nordin (Yang et Simões, 2002) 107

Figure B.7 – Modèles de Kikkiawa et coll. (1976) et Ikeda et coll. (1987) (Yang et Simões, 2002) 108

Figure B.8 – Variation verticale ou latérale du lit selon la minimisation de la puissance totale de l'écoulement (Yang et Simões, 2002) 110

Figure C.1 – Page d'accueil du classeur Microsoft Excel auquel s'intègre le logiciel OptiMHYSER 113

Figure C.2 – Fenêtre permettant de reprendre ou cesser définitivement l'exécution d'OptiMHYSER lorsqu'interrompue 115

Figure C.3 – Première interrogation après avoir lancé OptiMHYSER 116

Figure C.4 – Deuxième interrogation après avoir lancé OptiMHYSER : (a) s'il n'existe aucun fichier de récupération pour le fichier de données du modèle, (b) si un fichier de récupération est détecté 116

Figure C.5 – Troisième interrogation après avoir lancé OptiMHYSER 117

Figure C.6 – Quatrième interrogation après avoir lancé OptiMHYSER 118

Figure C.7 – (a) Cinqième et (b) sixième interrogation après avoir lancé OptiMHYSER 118

Figure C.8 – Formulaire de saisie « OptiMHYSER1.2 » 120

Figure C.9 – Formulaire de saisie « Paramètres Avancés » 129

LISTE DES SYMBOLES

A	aire du fond [m^2]
A_d	aire de la section d'une couche unitaire du lit [m^2]
A_s	volume de sédiments en suspension par unité de longueur [m^3/m]
α	coefficient de distribution de vitesse, rapport entre la force de soulèvement et de traînée, paramètre de Marquardt [-]
a_E	coefficient d'érosion d'*Exner* [-]
β	angle entre la contrainte de cisaillement et la direction de l'écoulement [°]
C	concentration moyenne de sédiments, coefficients de rugosité de Chézy [ppm, -]
C_{ai}	concentration de sédiments à une profondeur de référence a [ppm]
C_D	coefficient de traînée [-]
C_t	concentration massique de sédiments, capacité de transport [kg/m^3, $tonnes/m^3$]
C_{tg}	concentration totale de gravier en parties par millions [ppm]
C_{ts}	concentration totale de sable en parties par millions [ppm]
C_L	coefficient de perte d'énergie [-]
c_s	vitesse de propagation cinématique [m/s]
D, h, Y	profondeur d'eau [m]
D^*	diamètre adimensionnel [-]
d	diamètre des particules [mm]
δ	pente de fond transversale [m/m]
F_D	force de traînée [N]
F_r	nombre de Froude [-]
f	coefficient de frottement de Darcy-Weisbach [-]
Φ	fonction objective [-]
Φ_T	puissance totale [kW]
g	gradient de la fonction objective [-]
γ	poids volumique de l'eau [N/m^3]

γ_s	poids volumique des sédiments [N/m^3]
H	énergie totale [m]
h_B	pertes de charge singulières [m]
h_E	pertes de charge causées par l'expansion ou la contraction [m]
h_f	pertes de charge [m]
h_L	pertes de charge linéaires [m]
η	volume de sédiments (η = 1 – porosité) [m^3]
I	matrice identité [-]
J	matrice jacobienne [-]
J_e, S_f	pente énergétique [m/m]
K	débitance [m^3/s]
K_s, K_r	coefficients de frottement de Strickler [-]
κ	constante de von Kàrmàn [-]
λ	coefficient de protection [-]
M	quantité de mouvement [N]
μ	viscosité dynamique de l'eau, coefficient de friction dynamique de Coulomb [kg/m/s, -]
n	coefficients de rugosité de Manning [-]
ν	viscosité cinématique de l'eau [m^2/s]
P	probabilité de déposition [-]
p	porosité du lit, pourcentage de matériel [%, -]
Q	débit liquide, matrice diagonale [m^3/s, -]
Q_s	débit solide [kg/s]
Q_t	transport solide total [kg/s]
q	débit liquide par unité de largeur [m^3/s/m]
q_b, q_i, q_s, q_t	débit solide par unité de largeur du canal [kg/s/m]
q_{lat}	débit solide latéral [kg/s/m]
R, R_h	rayon hydraulique [m]
Re	nombre de Reynolds [-]
r	rayon de la particule [mm]

ρ	masse volumique de l'eau [kg/m^3]
ρ_s	masse volumique des sédiments [kg/m^3]
S	pente du fond [m/m]
$S_{f,moy}$	pente énergétique moyenne [m/m]
σ	angle entre la direction de transport et la direction de l'écoulement [rad]
T	température, périmètre mouillé [°C, m]
T_e	temps d'érosion caractéristique [s]
t	temps [s]
τ'	contrainte de cisaillement de Laursen associée à la résistance des grains [N/m^2]
τ, τ_{zx}, τ^*	contrainte de cisaillement dans le fluide [N/m^2]
τ_c, τ_c^*	contrainte de cisaillement critique [N/m^2]
τ_{cd}	contrainte de cisaillement critique de déposition [N/m^2]
τ_{cs}	contrainte de cisaillement critique d'érosion [N/m^2]
τ_e^*	contrainte de cisaillement effective [N/m^2]
U, V	vitesse d'écoulement moyenne [m/s]
U_{cr}	vitesse moyenne critique [m/s]
U^*	vitesse de frottement ($U^* = \sqrt{gDS}$) [m/s]
U_e^*	vitesse de frottement effective [m/s]
u	vitesse d'écoulement ponctuelle [m/s]
$u_{cr,s}^*$	vitesse de frottement critique [m/s]
W	largeur du canal [m]
W_P	poids déjaugé [N]
w_i	poids des paramètres d'observation [-]
ω_s	vitesse de sédimentation [m/s]
X	concentration massique de sédiments par unité de volume du fluide [kg/m^3]
x	chaînage [m]
y	élévation à partir du fond du canal [m]
$\bar{y}$	profondeur du centroïde de la section [m]
Z	élévation de la surface libre [m]
z	côte du fond [m]

INTRODUCTION

Le calage fait partie intégrante de la modélisation numérique. Cette opération consiste à ajuster les constantes des modèles de façon à ce que le comportement prévu soit raisonnablement comparable aux valeurs mesurées (Termium Plus, 2009). Ceci est l'étape préliminaire de la modélisation qui est possiblement la moins profitable, car la démarche est laborieuse et répétitive, nécessite une importante quantité de données d'observation et ne produit essentiellement aucune « nouvelle » information. De plus, un personnel qualifié et expérimenté est requis pour superviser l'accomplissement de la procédure. Néanmoins, la qualité du calage est ce qui permet de statuer sur la fiabilité des modèles.

Malgré la mise en marché de logiciels de plus en plus sophistiqués, des lacunes persistent en ce qui concerne l'élaboration de mécanismes de support au calage. Or, les exigences envers la fiabilité des modèles ne cessent de croître (Vidal, Moisan, Faure & Dartus, 2007). Le développement d'une méthodologie automatisée est donc une stratégie novatrice de répondre à ces exigences tout en permettant d'éviter les inconvénients associés aux procédures de calage manuelles.

La nature unique des différents logiciels de modélisation en hydraulique fluviale freine cependant l'élaboration d'une méthodologie généralisée. Le projet de recherche se concentre alors sur le logiciel hydrosédimentaire MHYSER1.0 (Model for the HYdraulics of SEdiments in Rivers, version 1.0), développé par le professeur Mahdi (Mahdi, 2009). Ce dernier permet de modéliser les écoulements sur fonds mobiles. Il est parmi l'un des plus sophistiqués de son domaine et est essentiellement un prolongement de la série populaire GSTARS (Generalized Sediment Tranport model for Alluvial River Simulation) (Yang & Simões, 2002).

La procédure mise sur pied est centrée sur l'utilisation du logiciel d'optimisation PEST (Parameter ESTimation software), développé spécifiquement pour le calage

automatique de modèles numériques. Ce logiciel crée une image du fichier d'entrée du modèle et la raffine progressivement en ajustant la valeur des paramètres de calage de manière à ce que l'écart entre les résultats obtenus et les résultats désirés soit le plus faible possible (Doherty, 2004).

Le calage des modèles MHYSER ne peut cependant être effectué en totalité par PEST puisque le logiciel ne permet pas d'utiliser des paramètres d'optimisation discontinus. La méthodologie développée comble alors cette faiblesse en effectuant elle-même l'ajustement de ce type de paramètres. Un algorithme ingénieux détermine la combinaison optimale menant au plus faible écart entre les données d'observation calculées et les données d'observation désirées. Un couplage de cet algorithme et du logiciel PEST coordonne l'optimisation simultanée des paramètres continus et discontinus.

L'outil conçu possède une interface graphique simple et conviviale permettant de configurer facilement la procédure de calage et de choisir les paramètres d'optimisation et d'observation désirés. Il effectue le mariage entre les logiciels MHYSER1.0 et PEST et génère automatiquement tous les fichiers de données nécessaires pour leur exécution. La procédure est entièrement autonome et, lorsque terminée, retourne le modèle avec la valeur optimale des paramètres de calage.

Le développement de la méthodologie commence par l'étude des concepts fondamentaux derrière la modélisation des écoulements en rivières et du transport de sédiments. Ceci facilite l'apprentissage du fonctionnement du logiciel MHYSER1.0 et l'identification des paramètres d'optimisation et d'observation. Ensuite viennent l'apprentissage du logiciel PEST puis l'élaboration de l'outil de calage automatisé OptiMHYSER. Finalement, des simulations réalisées à l'aide de modèles simples permettent de valider la méthodologie avant sa mise en application avec un modèle élaboré dans le cadre d'une étude sur la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Romaine (GENIVAR, 2004 & 2006).

CHAPITRE 1 – Transport de sédiments

L'étude du transport de sédiments est principalement orientée vers l'élaboration de critères de mise en mouvement des particules et le développement d'équations permettant d'estimer la capacité de transport des écoulements. Plusieurs publications ont mis de l'avant des relations semi-empiriques basées sur des essais réalisés en laboratoires et des observations faites en rivières naturelles. Toutefois, ces relations ne sont souvent que valides pour le spectre étroit de conditions hydrosédimentologiques à l'intérieur duquel les analyses ont été effectuées. Il n'existe à ce jour aucune loi universelle permettant de caractériser de façon générale le transport solide.

Ce chapitre présente une courte introduction au sujet. Il expose les fondements théoriques, les comportements possibles du mélange eau – sédiments et les différents types de transports pouvant être observés dans les écoulements. Il traite aussi de la vitesse de sédimentation des particules et fait un survol des équations de transport employées par le logiciel hydrosédimentaire MHYSER1.0. Finalement, il discute brièvement du transport solide hors équilibre.

1.1 Fondements théoriques

Les écoulements sur fonds mobiles sont régis par le système d'équations aux dérivées partielles de *Saint-Venant – Exner* (Graf et Altinakar, 2000).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h\frac{\partial U}{\partial x} + U\frac{\partial h}{\partial x} = 0 \qquad \text{Équation 1.1}$$

$$\frac{1}{g}\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{g}\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial x} = -J_e \qquad \text{Équation 1.2}$$

$$(1-p)\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial U}\frac{\partial U}{\partial x} = 0 \qquad \text{Équation 1.3}$$

où h est la profondeur d'eau, U la vitesse d'écoulement moyenne, z la côte du fond, J_e la pente énergétique, p la porosité du lit, q_s le débit solide par unité de largeur du canal, x le chaînage et t le temps.

Les équations 1.1 et 1.2 expriment les principes de continuité et de conservation de la quantité de mouvement, appliqués à un écoulement non permanent et non uniforme dans un canal prismatique rectangulaire à pente faible et à fond fixe. L'équation 1.3 représente quant à elle une équation de continuité appliquée à la phase solide. Elle est développée à partir de la relation d'*Exner* (Graf, 1971).

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -a_E \frac{\partial U}{\partial x} \qquad \text{Équation 1.4}$$

où a_E est le coefficient d'érosion d'*Exner*.

Le système possède cinq inconnues, soit : la profondeur d'eau (h), la vitesse d'écoulement moyenne (U), la cote du fond (z), la pente énergétique (J_e) et le débit solide (q_s). Des relations semi-empiriques doivent être employées pour estimer la valeur des paramètres J_e et q_s.

$$J_e = fonc(f, U, h) \qquad \text{Équation 1.5}$$

$$q_s = fonc(U, h; granulats) \qquad \text{Équation 1.6}$$

où f est un coefficient de frottement de type Darcy-Weisbach, Chézy ou Manning-Strickler.

Il existe une liaison implicite entre la phase liquide et la phase solide grâce aux paramètres U et h. Un couplage explicite peut aussi être effectué en ajoutant le terme $\partial z/\partial t$, généralement faible, à l'équation 1.1, la liant ainsi avec l'équation 1.3 (Graf et Altinakar, 2000).

Afin de résoudre ce système, il suffit d'établir une solution pour la phase liquide et de procéder ensuite à la recherche d'une solution pour la phase solide. De façon générale, les cas simples (écoulements permanents – uniformes) peuvent être résolus analytiquement, mais les problèmes plus complexes nécessitent l'application de méthodes numériques (Graf et Altinakar, 2000).

Afin de présenter le système d'équations de *Saint-Venant – Exner* de la manière faite, certaines hypothèses doivent être émises :

1. L'équation 1.1 n'est valide que pour un écoulement dans un canal prismatique rectangulaire.

2. L'équation 1.3 présume que le débit solide n'est fonction que de la vitesse d'écoulement de l'eau $\left(\frac{\partial q_s}{\partial x} = \frac{\partial q_s}{\partial U}\frac{\partial U}{\partial x}\right)$.

3. L'équation 1.5 admet que la pente énergétique, J_e, peut être exprimée par une relation établie pour un écoulement uniforme sur fond mobile.

1.2 Notions de rhéologie

Un mélange eau – sédiments peut adopter l'un de trois comportements, selon la concentration C de particules solides qu'il contient. L'eau pure et les mélanges ayant une très faible concentration de sédiments ($C << 1\%$) adoptent un comportement dit newtonien. Ils se déforment de façon proportionnelle à la contrainte qui leur est appliquée et obéissent à la loi de viscosité de Newton (Graf et Altinakar, 1998) :

$$\tau_{zx} = \mu \frac{du}{dz} \qquad \text{Équation 1.7}$$

où τ_{zx} est la contrainte de cisaillement dans le fluide, μ la viscosité dynamique et u la vitesse d'écoulement ponctuelle, mesurée selon un axe 'z' perpendiculaire au fond du canal.

De façon générale, les mélanges observés en rivières possèdent ce type de comportement. Toutefois, lorsque la concentration de sédiments augmente, la densité du mélange devient plus importante que celle de l'eau. Pour des concentrations inférieures à 8 %, le fluide adopte un comportement dit quasi newtonien. Des concentrations supérieures à cette limite transforment le mélange en fluide non

newtonien. Les particules solides demeurent en suspension plus longtemps et les concepts de l'hydraulique newtonienne, tels que la répartition de vitesse et la distribution de la concentration, ne sont plus valides (Graf et Altinakar, 2000). La tension de frottement, τ_{zx}, ne peut plus être décrite par une seule viscosité dynamique, μ.

1.3 Modes de transport

Les sédiments se déplacent selon trois modes de transport : par charriage, en suspension ou en suspension intrinsèque (Graf et Altinakar, 2000). La première catégorie regroupe les granulats plutôt grossiers. Ils avancent en glissants, roulants ou sautants brièvement sur le fond. Les sédiments plus fins, faisant de grands bonds et n'étant en contact avec le fond qu'occasionnellement, tombent quant à eux dans le deuxième mode de transport. Finalement, les particules très fines qui ne touchent jamais au fond sont prises en compte par le transport en suspension intrinsèque. Ensemble, ces trois modes définissent le transport solide total.

Ce système de classification comporte néanmoins son lot de complications. D'abord, il est difficile de faire la distinction entre la suspension et la suspension intrinsèque (Graf et Altinakar, 2000). Combinée à une concentration prédominante de sédiments en suspension, la suspension intrinsèque est fréquemment négligée lors des calculs. D'autres parts, la frontière entre le transport par charriage et le transport en suspension est généralement floue (Yang et Simões, 2002). Il est donc presque impossible de la positionner clairement. De toute façon, il existe un échange continuel de particules entre ces deux modes de transport. Plusieurs auteurs préfèrent alors ne discuter que du transport solide total (Yang, Ackers et White, Engelund et Hansen, Laursen, Toffaleti, etc.).

1.4 Vitesse de sédimentation

La vitesse de sédimentation, ω_s, est une propriété récurrente dans l'étude du transport solide. Elle représente la vitesse de chute d'une particule se déplaçant dans une colonne infinie d'eau claire et résulte de l'équilibre atteint entre la force de traînée, F_D, et le poids déjaugé de la particule, W_P. Cette propriété est étroitement liée à la taille, la forme, la rugosité de surface, la densité relative des sédiments et la viscosité de l'eau (Yang, 2003).

Les forces en jeux sont généralement exprimées en fonction du diamètre d'une sphère de dimension équivalente à la taille des particules.

$$F_D = C_D \rho \pi r^2 \frac{\omega_s^2}{2} \qquad \text{Équation 1.8}$$

$$W_P = \frac{4}{3} r^3 \pi (\rho_s - \rho) g \qquad \text{Équation 1.9}$$

où C_D est le coefficient de traînée, ρ et ρ_s la masse volumique de l'eau et des grains, respectivement, r le rayon de la particule et ω_s la vitesse de sédimentation.

En utilisant la solution analytique du coefficient de traînée, établie pour des écoulements à faible nombre de Reynolds (Re < 1.0), l'équilibre de force $F_D = W_P$ permet de formuler la relation suivante (Yang, 2003) :

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}} \qquad \text{Équation 1.10}$$

$$\omega_s = \frac{1}{18} \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g \frac{d^2}{\nu} \qquad \text{Équation 1.11}$$

où γ et γ_s sont respectivement les poids volumiques de l'eau et des sédiments, d le diamètre des particules et ν la viscosité cinématique de l'eau.

Une approximation plus complète du coefficient de traînée est proposée par Goldstein (1929) et est valide jusqu'à des nombres de Reynolds de 2.0. En présence

d'écoulements plus turbulents, des essais en laboratoire sont nécessaires pour estimer le coefficient.

$$C_D = \frac{24}{\mathrm{Re}}\left(1+\frac{3}{16}\mathrm{Re}-\frac{19}{1280}\mathrm{Re}^2+\frac{71}{20480}\mathrm{Re}^3+\ldots\right) \qquad \text{Équation 1.12}$$

L'équation 1.11 peut être appliquée aux particules de taille inférieure à 0.1 mm. Pour des tailles supérieures, Rubey (1933) propose une méthode alternative pour calculer la vitesse de sédimentation. L'équation 1.13 est mise de l'avant pour les particules inférieures à 2 mm et l'équation 1.14 pour des granulats au-delà de cette taille (Yang, 2003).

$$\omega_s = F\sqrt{dg\left(\frac{\gamma_s-\gamma}{\gamma}\right)} \qquad \text{Équation 1.13}$$

$$\omega_s = 3.32\sqrt{d} \qquad \text{Équation 1.14}$$

Le paramètre F prend une valeur de 0.79 lorsque les particules sont supérieures à 1 mm ou doit autrement être déterminé à partir de l'équation 1.15.

$$F = \sqrt{\frac{2}{3}+\frac{36\nu^2}{gd^3\left(\gamma_s/\gamma-1\right)}}-\sqrt{\frac{36\nu^2}{gd^3\left(\gamma_s/\gamma-1\right)}} \qquad \text{Équation 1.15}$$

Des études démontrent que la présence de particules fines dans l'eau peut augmenter sa viscosité et ainsi réduire la vitesse de chute des sédiments. Dans ce cas, le « U.S. Interagency Committee on Water Resources Subcommitte on Sedimentation » (1957) propose d'utiliser le schéma suivant pour estimer la vitesse de sédimentation.

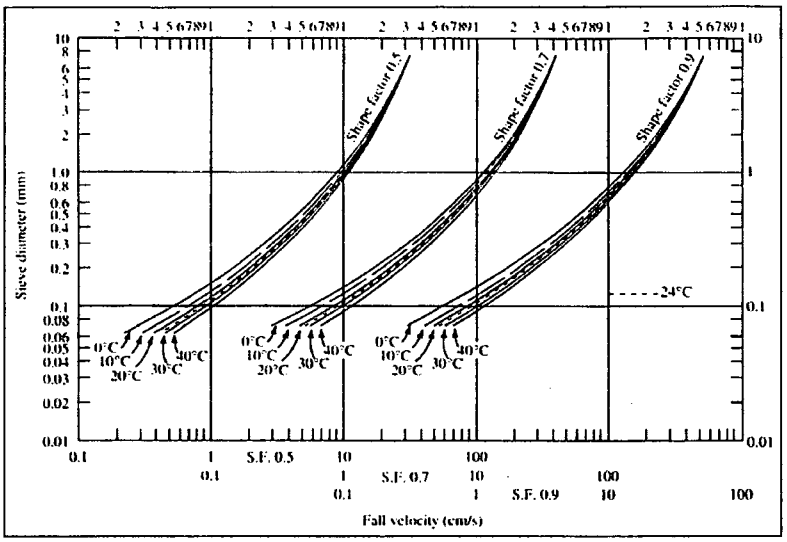


Figure 1.1 – Vitesse de sédimentation selon le diamètre des particules, la température de l'eau et le facteur de forme (Yang, 2003).

De façon générale, il est recommandé d'utiliser un facteur de forme, *SF*, de 0.7. Sinon, il est possible de l'estimer à partir de l'équation 1.16.

$$SF = \frac{c}{\sqrt{ab}} \qquad \text{Équation 1.16}$$

où a, b et c sont respectivement la longueur du côté le plus long, intermédiaire et le plus court d'une particule, suivant des axes tridimensionnels perpendiculaires.

Pour des diamètres excédants 10 mm la vitesse de sédimentation peut être évaluée à l'aide de l'équation suivante :

$$\omega_s = 1.1\sqrt{dg\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)} \qquad \text{Équation 1.17}$$

1.5 Équations de transport

Il existe un grand nombre de formules permettant d'estimer la capacité de transport des écoulements. Chaque auteur propose ces propres hypothèses. Ce travail n'examine cependant que les équations implémentées dans le logiciel MHYSER1.0. Celui-ci offre

19 formules de transport, soit 15 pour les matériaux non cohésifs et 4 pour les matériaux cohésifs. Ce compte rendu suit les notions et les théories abordées dans le manuel d'utilisateur du logiciel GSTARS3.0 (Yang et Simões, 2002).

Les équations considérées pour le transport de matériaux non cohésifs peuvent être séparées en deux catégories, selon le mode de transport auquel elles s'appliquent : le transport par charriage ou le transport total. Les équations liées aux matériaux cohésifs peuvent quant à elles être séparées selon le régime d'écoulement présent, soit un régime de déposition ou d'érosion.

1.5.1 Transport de sédiments non cohésifs

DuBoys (1879)

La méthode de DuBoys (1879) est fondée sur le concept d'excès de cisaillement sur le fond. Le modèle proposé prétend que le transport de sédiments est effectué par le glissement de couches superposées sur le lit des rivières. Le débit solide est estimé à partir de la relation suivante :

$$q_b = K\tau(\tau - \tau_c) \qquad \text{Équation 1.18}$$

où q_b et le débit solide par unité de largeur du canal, τ la contrainte de cisaillement, τ_c la contrainte de cisaillement critique et K est un coefficient propre à la granulométrie du fond.

Straub (1935) démontre que le coefficient K pout être estimé selon l'équation 1.19.

$$K = \frac{0.173}{d^{¾}} \qquad \text{Équation 1.19}$$

La contrainte de cisaillement critique est quant à elle établie selon le diagramme de Shields (1936).

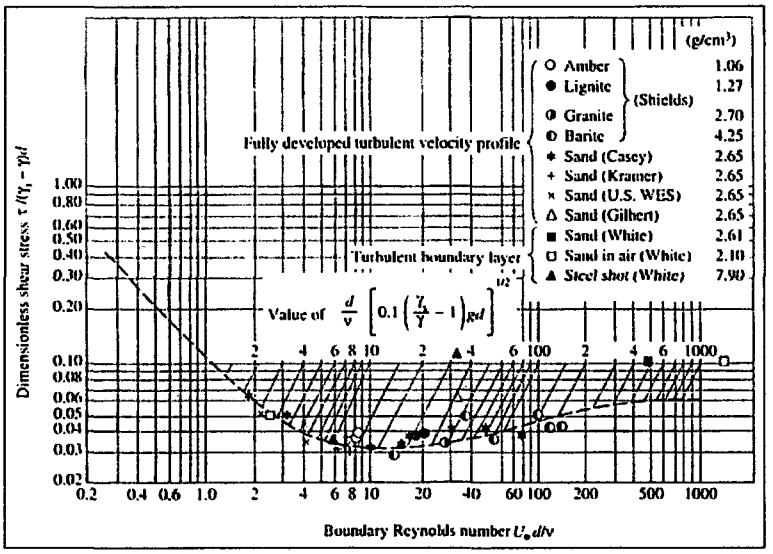


Figure 1.2 – Diagramme de Shields (1936) (Yang, 2003).

Le modèle représente mal le phénomène de transport observé en rivière, mais dans certains cas mène étonnamment à des résultats acceptables.

Meyer-Peter et Müller (1948)

Meyer-Peter et Müller (1948) proposent que le débit solide puisse être exprimé en fonction d'une pente énergétique modifiée de l'écoulement, S_r. Un ajustement est apporté à la pente énergétique totale, S, de manière à ce que seul le frottement dû à la résistance des grains soit responsable pour le transport de sédiments (Yang, 2003). La formule cible principalement le transport de matériaux grossiers, tels que le gravier.

$$\gamma RS\left(\frac{K_s}{K_r}\right)^{3/2} = 0.047(\gamma_s - \gamma)d + 0.25\rho^{1/3}q_b^{2/3} \qquad \text{Équation 1.20}$$

où R est le rayon hydraulique de la section, d le diamètre moyen des particules, ρ la masse spécifique de l'eau [tonne métrique-s/m^4] et q_b le débit solide en poids déjaugé par unité de temps et de largeur [tonne métrique/s/m].

Les paramètres K_s et K_r sont des coefficients de frottement de Strickler, déterminés respectivement à partir de la formule classique (équation 1.21) et la relation proposée

par Müller (équation 1.22). Le rapport entre les deux coefficients constitue le facteur d'ajustement permettant d'obtenir la pente énergétique modifiée S_r de l'écoulement.

$$K_s = \frac{U}{R^{2/3}\sqrt{S}} \qquad \text{Équation 1.21}$$

$$K_r = \frac{26}{d_{90}^{1/6}} \qquad \text{Équation 1.22}$$

où U est la vitesse d'écoulement moyenne et d_{90} la taille du tamis laissant passer 90% des sédiments.

Parker (1990)

S'appuyant sur le concept de mobilité équivalente, Parker (1990) énonce qu'il est possible d'estimer le débit solide uniquement en fonction de la taille médiane des particules, d_{50}. Une gamme étendue d'observations effectuées sur le terrain avec des sédiments de 18 mm à 28 mm a permis d'élaborer de la relation 1.25.

$$W^* = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)\frac{q_{bi}}{p_i DS\sqrt{gDS}} \qquad \text{Équation 1.23}$$

$$\phi_{50} = \frac{DS}{0.875 d_{50}}\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)^{-1} \qquad \text{Équation 1.24}$$

où q_{bi} et p_i sont respectivement le débit solide par unité de largeur et le pourcentage de matériel contenu dans la fraction granulométrique i et D est la profondeur d'eau.

$$W^* = \begin{cases} 0.0025\phi_{50}^{14.2} & si \quad \phi_{50} < 1.0 \\ 0.0025\exp\left\{14.2(\phi_{50}-1) - 9.28(\phi_{50}-1)^2\right\} & si \quad 1.0 \le \phi_{50} \le 1.59 \\ 13.685\left(1 - \dfrac{0.835}{\phi_{50}}\right)^{4.5} & si \quad \phi_{50} > 1.59 \end{cases} \qquad \text{Équation 1.25}$$

Laursen (1958) et Laursen modifiée par Madden (1993)

Laursen (1958) propose une équation basée sur le concept d'excès de cisaillement sur le fond élaboré par Shields (1936). La formule combine les déplacements effectués en transport par charriage et en transport en suspension.

$$C_t = 0.01\gamma \sum_i p_i \left(\frac{d_i}{D}\right)^{7/6} \left(\frac{\tau'}{\tau_{ci}} - 1\right) f\left(\frac{U^*}{\omega_i}\right) \qquad \text{Équation 1.26}$$

où C_t est la concentration massique de sédiments, U^* la vitesse de frottement ($U^* = \sqrt{gDS}$), ω_i et τ_{ci} sont respectivement la vitesse de sédimentation et la contrainte de cisaillement critique des particules de diamètre d_i et τ' est la contrainte de cisaillement de Laursen associée à la résistance des grains.

$$\tau' = \frac{\rho V^2}{58}\left(\frac{d_{50}}{D}\right)^{1/3} \qquad \text{Équation 1.27}$$

Une première relation $f\left(\frac{U^*}{\omega_i}\right)$ a été établie par Laursen (1958) puis a ensuite été révisée par Madden (1993). La deuxième relation permet d'utiliser l'équation de transport pour des sédiments non cohésifs de taille très fine. De plus, elle tient compte des effets du nombre de Froude.

Toffaleti (1969)

La méthode de Toffaleti (1969) débute en transformant la section d'écoulement en prisme rectangulaire de largeur B et de profondeur R, où R est le rayon hydraulique du canal. Elle sépare ensuite le prisme en quatre couches superposées : une pour le lit et trois pour le fluide. Les frontières des couches se trouvent respectivement aux élévations $2d_i$, $\frac{D}{11{,}24}$ et $\frac{D}{2{,}5}$, où d_i est la taille des grains et D la profondeur de l'écoulement.

Le transport par charriage et le transport en suspension sont calculés séparément puis ensuite sommés pour déterminer le transport solide total. Une distribution continue de

la concentration de sédiments en suspension et une répartition de la vitesse d'écoulement suivant l'équation 1.28 sont les deux hypothèses sur lesquelles s'appuient les équations développées.

$$u = (1+\eta_v)U\left(\frac{y}{D}\right)^{\eta_v} \qquad \text{Équation 1.28}$$

où u est la vitesse d'écoulement ponctuelle à une élévation y à partir du fond du canal, U la vitesse d'écoulement moyenne, D la profondeur de l'écoulement et η_v un coefficient estimé selon la relation empirique 1.29.

$$\eta_v = 0.1198 + 0.00048T \qquad \text{Équation 1.29}$$

où T est la température de l'eau [°F].

$$q_{sui} = M_i \frac{(D/11.24)^{0.244Z_i}(D/2.5)^{0.5Z_i}\left[D^{\eta_1} - (D/2.5)^{\eta_1}\right]}{\eta_1} \qquad \text{Équation 1.30}$$

$$q_{smi} = M_i \frac{(D/11.24)^{0.244Z_i}\left[(D/2.5)^{\eta_2} - (D/11.24)^{\eta_2}\right]}{\eta_2} \qquad \text{Équation 1.31}$$

$$q_{sli} = M_i \frac{(D/11.24)^{\eta_3} - (2d_i)^{\eta_3}}{\eta_3} \qquad \text{Équation 1.32}$$

Les coefficients M_i, η_1, η_2 et η_3 sont établis à partir de relations empiriques élaborées en fonction des paramètres η_v et Z_i.

$$Z_i = \frac{\omega_i U}{C_Z DS} \geq 1.5\eta_v \qquad \text{Équation 1.33}$$

$$C_Z = 260.67 - 0.667T \qquad \text{Équation 1.34}$$

Le transport par charriage est quant à lui estimé à partir de l'équation 1.35.

$$q_{bi} = M_i(2d_i)^{\eta_3} \qquad \text{Équation 1.35}$$

Le transport solide total, Q_t, peut alors être obtenu en faisant la somme des débits solides associés aux quatre couches.

$$Q_{ti} = B(q_{bi} + q_{sui} + q_{smi} + q_{sli}) \qquad \text{Équation 1.36}$$

Engelund et Hansen (1972)

Les équations de transport mises de l'avant par Engelund et Hansen (1972) reposent sur le concept de la puissance de l'écoulement proposé par Bagnold (1966) et le principe de similarité. Initialement réservées pour des régimes d'écoulements inférieurs, les auteurs ont trouvé que ces formules peuvent donner des résultats satisfaisants lorsqu'appliquées à des régimes d'écoulements supérieurs si le lit du canal présente des granulats ayant une taille de 0.15 mm et plus (Yang, 2003).

$$f'\phi = 0.1\theta^{3/2} \qquad \text{Équation 1.37}$$

$$f' = \frac{2gSD}{U^2} \qquad \text{Équation 1.38}$$

$$\phi = \frac{q_t}{\gamma_s}\left[\left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}\right)gd^3\right]^{-1/2} \qquad \text{Équation 1.39}$$

$$\theta = \frac{\tau}{(\gamma_s - \gamma)d} \qquad \text{Équation 1.40}$$

où q_t est le débit solide total massique par unité de largeur.

Ackers et White (1973) et Ackers et White révisée (1990)

Ackers et White (1973) proposent une relation pour le transport de sédiment, G_{gr}, établie en fonction d'un nombre de mobilité, F_{gr}, et un diamètre de particules adimensionnels, d_{gr}.

$$F_{gr} = U^{*n}\left[gd\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)\right]^{-1/2}\left[\frac{U}{\sqrt{32}\log(\alpha D/d)}\right]^{1-n} \qquad \text{Équation 1.41}$$

$$d_{gr} = d\left[\frac{g}{\nu^2}\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right)\right]^{1/3} \qquad \text{Équation 1.42}$$

où U^* est la vitesse de frottement et α un coefficient pour les écoulements turbulents – rugueux ($\alpha = 10$).

La relation adimensionnelle G_{gr} prend la forme suivante :

$$G_{gr} = \frac{XD}{(d\gamma_s)/\gamma}\left(\frac{U^*}{U}\right)^n \qquad \text{Équation 1.43}$$

$$G_{gr} = C\left(\frac{F_{gr}}{A} - 1\right)^m \qquad \text{Équation 1.44}$$

où X est la concentration massique de sédiments par unité de volume du fluide et les coefficients A, C, m et n des paramètres devant être estimés à partir des relations empiriques présentées au tableau 1.1.

Des essais en laboratoire effectués en 1973 sur des sédiments de tailles supérieures à 0.04 mm et des écoulements ayant un nombre de Froude inférieur à 0.8 ont permis de livrer une première série d'équations pour les paramètres A, C, m et n. Toutefois, les coefficients obtenus avaient tendance à surestimer le débit solide lorsqu'en présence de sédiments inférieurs à 0.2 mm ou des granulats grossiers. Une série d'équations révisée a alors été émise en 1990.

Tableau 1.1 – Équations originales (1973) et révisées (1990) permettant d'estimer la valeur des coefficients A, C, m et n de l'équation de transport de Ackers et White (1973).

	1973	1990
$1 < d_{gr} \leq 60$	$A = 0.23d_{gr}^{-½} + 0.14$ $\log C = -3.53 + 2.86\log d_{gr} - (\log d_{gr})^2$ $m = 9.66d_{gr}^{-1} + 1.34$ $n = 1.00 - 0.56\log d_{gr}$	$A = 0.23d_{gr}^{-½} + 0.14$ $\log C = -3.46 + 2.79\log d_{gr} - 0.98(\log d_{gr})^2$ $m = 6.83d_{gr}^{-1} + 1.67$ $n = 1.00 - 0.56\log d_{gr}$
$d_{gr} > 60$	$A = 0.17$ $C = 0.025$ $m = 1.50$ $n = 0$	$A = 0.17$ $C = 0.025$ $m = 1.78$ $n = 0$

Yang (sable, 1973 et 1979) et Yang (gravier, 1984)

Yang (1972) développe sa propre théorie sur le transport de sédiments, qu'il base sur son concept de la puissance unitaire de l'écoulement (« unit stream power »). Ce concept diffère de celui élaboré par Bagnold (1966) dans la mesure que Yang (1972)

considère la puissance que contient un volume unitaire de fluide plutôt qu'une surface unitaire du lit de la rivière (Yang, 2003). La puissance de l'écoulement résulte alors du produit entre la vitesse moyenne de l'eau, U, et la pente du fond, S. Les travaux de l'auteur mènent à l'élaboration de sa première équation de transport pour le sable.

Sable (1973) :

$$\log C_{ts} = 5.435 - 0.286\log\frac{\omega d}{\nu} - 0.457\log\frac{U^*}{\omega} + \left(1.799 - 0.409\log\frac{\omega d}{\nu} - 0.314\log\frac{U^*}{\omega}\right)\log\left(\frac{US}{\omega} - \frac{U_{cr}S}{\omega}\right) \qquad \text{Équation 1.45}$$

où C_{ts} est la concentration totale de sable en parties par millions et U_{cr} la vitesse moyenne critique de l'écoulement pour amorcer le mouvement des particules.

Yang (1979) modifie ensuite l'équation 1.45, estimant qu'il est possible de laisser tomber le terme $\frac{U_{cr}S}{\omega}$ lorsqu'en présence d'écoulements qui excèdent largement les conditions nécessaires pour initier le mouvement des particules.

Sable (1979) :

$$\log C_{ts} = 5.165 - 0.153\log\frac{\omega d}{\nu} - 0.297\log\frac{U^*}{\omega} + \left(1.780 - 0.360\log\frac{\omega d}{\nu} - 0.480\log\frac{U^*}{\omega}\right)\log\frac{US}{\omega} \qquad \text{Équation 1.46}$$

L'équation 1.46 est réservée aux écoulements ayant une concentration de sédiments supérieure à 100 ppm. Cependant, des études statistiques exhaustives démontrent que l'équation 1.45 est toute aussi fiable pour des concentrations de cette envergure (Yang, 2003).

Yang (1984) étend sa théorie sur le transport des grains de sable (1973) aux particules de gravier. Il conserve la même forme de l'équation, mais ajuste les coefficients en conséquence.

Gravier (1984) :

$$\log C_{tg} = 6.681 - 0.633 \log \frac{\omega d}{\nu} - 4.816 \log \frac{U^*}{\omega} + \left(2.784 - 0.305 \log \frac{\omega d}{\nu} - 0.282 \log \frac{U^*}{\omega}\right) \log\left(\frac{US}{\omega} - \frac{U_{cr}S}{\omega}\right) \qquad \text{Équation 1.47}$$

où C_{tg} est la concentration totale de gravier en parties par millions.

Yang (sable, modifiée pour une concentration élevée de sédiments en suspension intrinsèque, 1996)

Pour tenir compte des effets dus à la concentration élevée de sédiments en suspension intrinsèque dans l'écoulement Yang *et coll.* (1996) propose une forme révisée de l'équation de Yang (1979) pour le sable.

$$\log C_{ts} = 5.165 - 0.153 \log \frac{\omega_m d}{\nu_m} - 0.297 \log \frac{U^*}{\omega_m} + \left(1.780 - 0.360 \log \frac{\omega_m d}{\nu_m} - 0.480 \log \frac{U^*}{\omega_m}\right) \log\left[\left(\frac{\gamma_m}{\gamma_s - \gamma_m}\right)\frac{US}{\omega_m}\right] \qquad \text{Équation 1.48}$$

où l'indice *m* signifie l'emploi de la propriété *modifiée*, qui tient compte du taux de sédiments en suspension intrinsèque.

Ashida et Michiue (1972)

De façon similaire à Toffaleti (1969), Ashida et Michiue (1972) considèrent séparément le transport par charriage et le transport en suspension. Ils proposent une équation pour le transport par charriage qui est fonction de trois contraintes de cisaillement : la contrainte l'écoulement, τ^*, la contrainte critique, τ_c^*, et la contrainte effective, τ_e^*.

$$\frac{q_{bi}}{p_i U_e^* d_i} = 17\tau_{ei}^* \left(1 - \frac{\tau_{ci}^*}{\tau_i^*}\right)\left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{ci}^*}{\tau_i^*}}\right) \qquad \text{Équation 1.49}$$

où q_{bi} et p_i sont respectivement le débit solide transporté par charriage et le pourcentage de matériel contenu dans la fraction granulométrique *i* et U_e^* la vitesse de frottement effective.

Les sédiments transportés en suspension sont quant à eux pris en compte par l'équation suivante :

$$q_{si} = C_{ai}\nu\left(e^{-c_1 a} - e^{-c_1 h}\right)\frac{e^{c_1 a}}{c_1} \qquad \text{Équation 1.50}$$

$$c_1 = \frac{6\omega_i}{\kappa u^* h} \qquad \text{Équation 1.51}$$

où C_{ai} est la concentration de sédiments à une profondeur de référence a (habituellement $a = 0.05h$), h la profondeur d'eau et κ est la constante de von Kàrmàn (0.412).

Le transport solide total, q_i, est estimé en sommant les équations 1.49 et 1.50.

$$q_i = q_{bi} + q_{si} \qquad \text{Équation 1.52}$$

Université de Tsinghua (vidange de réservoirs, 1985)

L'Université de Tsinghua (1985) met de l'avant une équation qui permet d'estimer la capacité de transport des écoulements lors de la vidange de réservoirs hydrauliques. Cette formule est développée à partir d'observations faites sur des réservoirs situés en Chine.

$$Q_s = \Omega\frac{Q^{1.6}S^{1.2}}{W^{0.6}} \qquad \text{Équation 1.53}$$

où Q_s est le débit solide, Q le débit de l'écoulement, W la largeur du canal, S la pente du fond et Ω un facteur associé au type de sédiments présents.

L'équation 1.53 ne tient pas compte de la cohésion entre les sédiments. L'Université maintient l'hypothèse que la fréquence des vidanges est suffisamment élevée pour que les sédiments n'aient pas le temps de créer des forces de liaisons entre eux. Le tableau 1.2 présente les différentes valeurs que peut prendre le coefficient Ω selon le type de sédiments présent dans le réservoir.

Tableau 1.2 – Valeurs du coefficient Ω de l'équation de transport de l'Université de Tsinghua (1985)

Valeur de Ω	Type de sédiments
1600	Sédiments loess
650	Sédiments ayant un diamètre médian inférieur ou égal à 0.1 mm
300	Sédiments ayant un diamètre médian supérieur à 0.1 mm
180	Vidange à faible débit

1.5.2 Transport de sédiments cohésifs

Les sédiments cohésifs sont généralement classés comme des sols à granulométrie fine, inférieure à 62.5 µm, composés de particules qui adhèrent les unes aux autres. Ce sont des boues constituées principalement de silt et/ou d'argile. À cette échelle, les caractéristiques des sédiments ne peuvent plus être exprimées uniquement en fonction de la taille des particules. Il existe une interaction complexe entre les propriétés physico-chimiques de l'eau et des boues, la structure du lit et le transport solide.

Malgré l'évolution des connaissances dans ce domaine, il n'existe toujours aucune méthode fiable pour modéliser le transport de ce type de sédiments. Les équations développées doivent être utilisées avec prudence et nécessitent habituellement une calibration exhaustive. Le logiciel de modélisation MHYSER possède quatre équations de transport, soit deux pour les écoulements en régime de déposition et deux autres pour les écoulements en régime d'érosion.

Chaque régime d'écoulement est caractérisé par une contrainte de cisaillement critique : τ_{cd} pour le régime de déposition et τ_{cs} pour le régime d'érosion ($\tau_{cd} < \tau_{cs}$). Ces frontières délimitent les zones de mouvement des particules. Lorsque la contrainte de cisaillement appliquée par l'écoulement, τ_b, est inférieure à τ_{cd}, les sédiments se déposent sur le lit. Lorsqu'elle est supérieure à τ_{cs}, les sédiments se détachent du lit. Autrement, la contrainte de cisaillement est trop forte pour permettre la déposition, mais trop faible pour amorcer l'érosion.

Déposition

En régime de déposition, la concentration de sédiments dans l'eau, C, peut avoir un effet non négligeable sur la vitesse de sédimentation ω_s. Au cours de la décantation, les particules s'agglomèrent ensemble pour former des agrégats. En dessous d'une première concentration critique, C_1, la vitesse de sédimentation augmente proportionnellement avec la dimension des agrégats. La chute est alors dite *libre*. Au-dessus de cette limite, les solides en suspension ont pour effet de freiner la descente des particules. Passé une seconde concentration critique, C_2, la taille des agrégats agit comme un parachute. Plus elle est élevée, plus la résistance de chute est forte. La relation entre la vitesse de sédimentation et la dimension des particules s'inverse. Les particules sont alors en chute *restreinte*. La région entre les concentrations C_1 et C_2 est nommée zone de *floculation*.

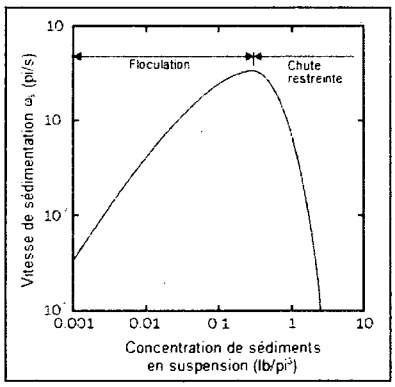


Figure 1.3 – Effet de la concentration de particules en suspension sur la vitesse de sédimentation (Yang et Simões, 2002).

Le taux de déposition des sédiments peut être approximé par la relation suivante :

$$\frac{dC}{dt} = -\frac{P\omega_s C}{h} \qquad \text{Équation 1.54}$$

où C est la concentration moyenne de sédiments sur la profondeur h de l'écoulement, ω_s la vitesse de sédimentation des particules et P un paramètre représentant la probabilité de déposition.

$$P = \begin{cases} 1 - \dfrac{\tau_b}{\tau_{cd}} & si \quad \tau_b < \tau_{cd} \\ 0 & si \quad \tau_b \geq \tau_{cd} \end{cases} \qquad \text{Équation 1.55}$$

En présence d'une chute libre, l'équation 1.54 peut être intégrée analytiquement.

$$\frac{C}{C_0} = \exp\left\{-\frac{\omega_s \Delta t}{h}\left(1-\frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right)\right\} \qquad \text{Équation 1.56}$$

où C_0 et C sont les concentrations de sédiments au début et à la fin du pas de temps, respectivement, et Δt le temps que prend les particules à traverser le bras de rivière à l'étude ($\Delta x/U$).

Des méthodes d'intégrations numériques doivent cependant être employées pour les zones de floculation et de chute restreinte.

$$C = C_0 - \frac{\omega_s C_0 \Delta t}{h}\left(1-\frac{\tau_b}{\tau_{cd}}\right) \qquad \text{Équation 1.57}$$

Chaque zone de chute est caractérisée par une vitesse de sédimentation particulière.

Chute libre : ($C < C_1$)
$$\omega_s = \frac{\left(\gamma_s/\gamma - 1\right) g d^2}{18\nu} \qquad \text{Équation 1.58}$$

Zone de floculation : ($C_1 \leq C \leq C_2$)
$$\omega_s = MC^N \qquad \text{Équation 1.59}$$

Chute restreinte : ($C > C_2$)
$$\omega_s = \omega_0 (1-kC)^l \qquad \text{Équation 1.60}$$

$$\omega_0 = \frac{MC_2^N}{(1-kC_2)^l} \qquad \text{Équation 1.61}$$

où k, l, M et N des constantes spécifiques au site étudié.

Érosion

Deux types d'érosion peuvent être observés en rivière : l'érosion de surface et l'érosion de masse. Le premier type survient lorsque la contrainte de cisaillement τ_b est supérieure à la limite τ_{cs} mais inférieure à la contrainte de cisaillement critique pour l'érosion de masse τ_{cm}. Les particules sont alors emportées une par une. Le deuxième type survient lorsque τ_b excède τ_{cm}. Dans ce cas, des plaques entières de boues sont délogées.

Le taux d'enlèvement des sédiments, E, dépend du type d'érosion observé.

Érosion de surface : $(\tau_{cs} < \tau_b \leq \tau_{cm})$

$$E_1 = \frac{1}{A}\frac{dm}{dt} = M_1\left(\frac{\tau_b}{\tau_{cs}} - 1\right) \qquad \text{Équation 1.62}$$

Érosion de masse : $(\tau_b > \tau_{cm})$

$$E_2 = \frac{1}{A}\frac{dm}{dt} = M_2\left(\frac{T_e}{\Delta t}\right) \qquad \text{Équation 1.63}$$

où les indices 1 et 2 dénotent l'utilisation des propriétés relatives à l'érosion de surface et l'érosion de masse, respectivement, A est l'aire du fond, M un paramètre expérimental, Δt le pas de temps, et T_e un temps d'érosion caractéristique.

Les paramètres M, τ_{cs} et τ_{cm} sont calculés en fonction du type de sédiment en place ainsi que la salinité, le contenu minéral, le pH et la température de l'eau.

1.6 Transport solide hors équilibre

Un changement brusque de la capacité de transport de l'écoulement peut occasionner un déséquilibre entre le débit solide réel et le débit solide théorique. Cette situation survient fréquemment à la sortie d'ouvrages de contrôles, où la section d'écoulement passe d'un canal à fond fixe à un canal à fond mobile ($q_s = 0 \rightarrow q_s > 0$), ou vis versa lorsqu'un cours d'eau se jette dans un réservoir ($q_s > 0 \rightarrow q_s = 0$). Une certaine distance est requise avant que le débit solide redevienne égal à la capacité de transport de l'écoulement. Han (1980) propose le modèle suivant pour tenir compte du délai d'ajustement de l'équilibre.

$$C_i = C_{t,i} + \left(C_{i-1} - C_{t,i-1}\right)\exp\left\{-\frac{\alpha\omega_s\Delta x}{q}\right\} + \left(C_{t,i-1} - C_{t,i}\right)\left(\frac{q}{\alpha\omega_s\Delta x}\right)\left[1 - \exp\left\{-\frac{\alpha\omega_s\Delta x}{q}\right\}\right] \qquad \text{Équation 1.64}$$

où C est la concentration de sédiments, C_t la capacité de transport, q le débit de l'écoulement par unité de largeur, Δx la longueur du bras de rivière étudié, ω_s la vitesse de sédimentation, i l'indice de la section et α un paramètre adimensionnel.

Han et He (1990) recommandent des valeurs de $\alpha = 0.25$ pour la déposition et $\alpha = 1.0$ pour l'érosion.

CHAPITRE 2 – Logiciel hydrosédimentaire MHYSER1.0

Le logiciel hydrosédimentaire MHYSER1.0 (Model for the HYdraulics of SEdiments in Rivers, version 1.0), développé par le professeur Mahdi (Mahdi, 2009), permet de modéliser les écoulements en rivières et le transport de sédiments. Il est parmi l'un des plus sophistiqués de son domaine. Il est essentiellement un prolongement de la série populaire GSTARS (Generalized Sediment Tranport model for Alluvial River Simulation), développée au U.S. Bureau of Reclamations par les professeurs Chih Ted Yang, Albert Molinas et Fransico J. M. Simões (Yang et Simões, 2002), avec deux améliorations importantes : l'élimination des erreurs numériques générées par GSTARS3.0 et l'implémentation d'une méthode plus rigoureuse pour analyser la stabilité des berges (Mahdi, 2009).

Le logiciel MHYSER est retenu pour ce projet, car il offre une convivialité maximale pour l'ingénieur pratiquant. D'abord, l'approche quasi bidimensionnelle répond de façon satisfaisante aux besoins rudimentaires de la modélisation hydrosédimentaire. La simplicité de résolution des équations unidimensionnelles, combinée à l'utilisation des tubes de courant, permet d'exploiter le plein potentiel des mesures prises sur le terrain, sans exiger la quantité importante de données d'observation nécessaires pour la modélisation pleinement bidimensionnelle ou tridimensionnelle. Deuxièmement, MHYSER et GSTARS sont les seuls logiciels hydrosédimentaires qui intègrent la théorie sur la minimisation de la puissance de l'écoulement pour estimer les variations latérales ou verticales du fond. Finalement, l'implémentation d'une méthode plus rigoureuse pour analyser la stabilité des berges permet de mieux évaluer les conséquences de l'érosion et la réponse de l'écoulement suite à un glissement de terrain.

MHYSER est un logiciel très complexe. Ce chapitre fait un bref survol des fonctionnalités susceptibles d'être utilisées au cours du calage des modèles. L'annexe B présente un compte rendu plus détaillé du fonctionnement du logiciel.

2.1 Coefficients de pertes de charge

Les premiers candidats susceptibles d'être impliqués dans le calage de modèles hydrosédimentaires sont les coefficients de pertes de charge. Les pertes de charges sont de deux natures : linéaires ou singulières.

2.1.1 Pertes de charge linéaires

Les pertes de charge linéaires, h_L, résultent du produit entre la pente énergétique moyenne de l'écoulement et la longueur du tronçon.

$$h_L = S_{f,moy}\Delta x \qquad \text{Équation 2.1}$$

où $S_{f,moy}$ est la pente énergétique moyenne et Δx la longueur du tronçon.

La pente énergétique moyenne de l'écoulement est calculée à partir de la pente énergétique ponctuelle des sections qui bornent chaque tronçon. Le logiciel admet que pente énergétique ponctuelle d'une section puisse être évaluée à partir d'une formule développée pour un écoulement uniforme, qui exprime le rapport entre le débit et la débitance élevé au carré.

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \qquad \text{Équation 2.2}$$

où Q est le débit liquide et K la débitance d'une section.

MHYSER1.0 met à la disposition de l'usager les formules de Manning, Chézy et Darcy-Weisbach pour résoudre l'équation 2.2. Chacune possède ces propres coefficients de rugosité, dont les valeurs sont ajustées progressivement lors du calage.

Manning : $K = \frac{1.49}{n} A R_h^{2/3}$ Équation 2.3

Chézy : $K = C A R_h^{1/2}$ Équation 2.4

Darcy-Weisbach : $$K = \left(\frac{8gR_h}{f}\right)^{1/2} A$$ Équation 2.5

où n, C et f sont respectivement les coefficients de rugosité de Manning, Chézy et Dary-Weisbach, A l'aire de la section mouillée et R_h le rayon hydraulique.

Quatre équations sont offertes pour calculer la pente énergétique moyenne de l'écoulement.

Moyenne algébrique : $$S_{f,moy} = \frac{S_{f,1} + S_{f,2}}{2}$$ Équation 2.6

Moyenne géométrique : $$S_{f,moy} = \sqrt{S_{f,1} S_{f,2}}$$ Équation 2.7

Moyenne harmonique : $$S_{f,moy} = \frac{2S_{f,1} S_{f,2}}{S_{f,1} + S_{f,2}}$$ Équation 2.8

Débitance moyenne : $$S_{f,moy} = \left(\frac{2Q}{K_1 + K_2}\right)^2$$ Équation 2.9

2.1.2 Pertes de charge singulières

Aux pertes de charge linéaires doivent être ajoutées les pertes de charge causées par l'expansion ou la contraction du canal, h_E, et les pertes de charge singulières, h_B, générées par un coude ou une structure artificielle.

$$h_E = C_E \left|\frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g}\right|$$ Équation 2.10

$$h_B = C_B \frac{V_2^2}{2g}$$ Équation 2.11

2.2 Nombre de tubes de courant

L'utilisation des tubes de courant est ce qui permet d'effectuer la modélisation quasi bidimensionnelle du transport solide. Cette approche est un compromis ingénieux entre les méthodes d'analyses unidimensionnelles et bidimensionnelles. Une fois le calcul de

la ligne d'eau terminé, chaque tronçon du canal est divisé en travées parallèles de débitance équivalente, nommées tubes de courants. Le nombre de tubes employés doit être spécifié à l'avance par l'usager. Les tubes sont traités comme des sections d'écoulement unidimensionnelles. Ceci permet alors de modéliser simultanément l'érosion et l'aggradation sur une même section tout en conservant la simplicité de résolution des équations unidimensionnelles.

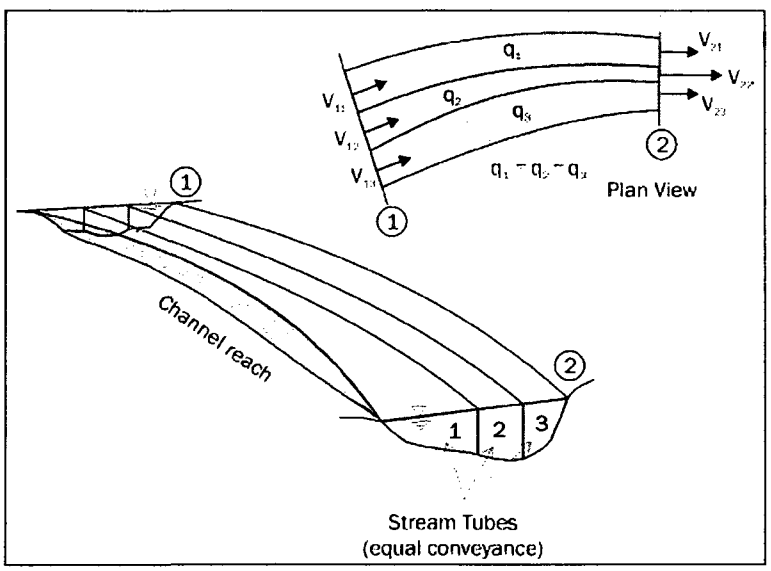


Figure 2.1 – Simulation quasi bidimensionnelle (tubes de courant) (Yang et Simões, 2002)

Les tubes de courants sont délimités par des lignes de courants. Ces dernières sont des lignes auxquelles les vecteurs d'écoulement sont tangents en tous points et à tout instant. Aucun échange liquide à travers les frontières des tubes n'est donc possible. Chacun est traité comme un canal unidimensionnel aux paramètres hydrauliques connus. Le débit solide est évalué en considérant les tubes indépendants les uns des autres. La position des frontières est ajustée automatiquement à chaque pas de temps de manière à conserver une débitance équivalente pour l'ensemble des tubes.

L'approche quasi bidimensionnelle possède cependant certaines limites. Premièrement, l'analyse unidimensionnelle de la ligne d'eau aboutie à une surface libre horizontale. Cette simplification peut donc générer des erreurs d'extrapolation lors du positionnement des tubes de courants. D'autres parts, les algorithmes de calculs étant

basés sur des équations unidimensionnelles, le logiciel n'est pas en mesure de modéliser les phénomènes d'écoulement plus complexes que sont les tourbillons, les remous, les écoulements inversés et les variations latérales de la surface libre.

2.3 Capacité de transport

Le logiciel offre 15 formules permettant d'estimer la capacité de transport des écoulements pour les matériaux non cohésifs. Les théories sur lesquelles s'appuient ces équations ont été discutées au chapitre 1, section 1.5. Les formules sont regroupées en deux catégories, selon le mode de transport auquel elles s'appliquent (par charriage ou transport total).

Tableau 2.1 – Équations de transport incluses dans MHYSER1.0 pour les matériaux non cohésifs

Matériaux non cohésifs	
1 – DuBoys (1897)	Transport par charriage
2 – Meyer-Peter et Müller (1948)	Transport par charriage
3 – Parker (1990)	Transport par charriage
4 – Laursen (1958)	Transport total
5 – Laursen modifiée (1993)	Transport total
6 – Toffaleti (1969)	Transport total
7 – Engelund et Hansen (1972)	Transport total
8 – Ackers et White (1973)	Transport total
9 – Ackers et White révisée (1990)	Transport total
10 – Yang sable (1973)	Transport total
11 – Yang sable (1979)	Transport total
12 – Yang gravier (1984)	Transport total
13 – Yang sable modifiée (1996)	Transport total
14 – Ashida et Michiue (1972)	Transport total
15 – Université de Tsinghua (1985)	Transport total

2.4 Débit solide entrant

Le débit solide entrant est un quatrième élément du logiciel pouvant intervenir dans le calage des modèles. MHYSER permet d'inscrire ce paramètre au fichier de données par l'entremise d'une courbe de tarage (équation 2.12) ou d'un hydrogramme discrétisé.

$$Q_{solide} = \alpha\left[Q_{liquide}\right]^{\beta} \qquad \text{Équation 2.12}$$

où α et β sont des coefficients pouvant être ajuster lors du calage.

2.5 Épaisseur de la couche active

La modélisation hydrosédimentaire doit tenir compte de la quantité de sédiments présents sur le fond et étant disponibles pour le transport. Le débit solide ne peut emporter des particules inexistantes. Afin de gérer la logistique entre le débit solide théorique et le débit solide réel, MHYSER1.0 applique le modèle de transport développé par Bennett et Nordin (1977) (Mahdi, 2009). Ce dernier sépare astucieusement le lit du canal en un maximum de trois couches (voir figure 2.2).

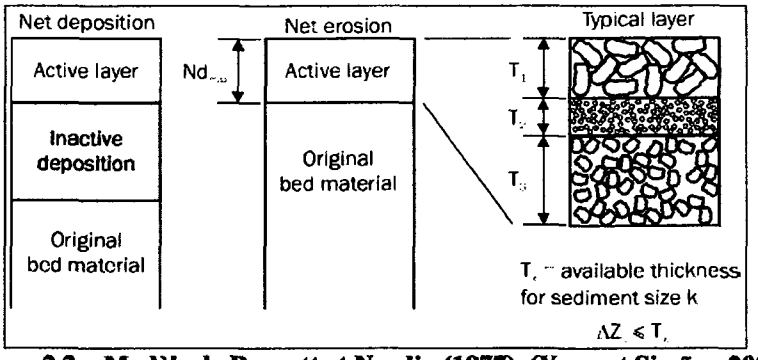


Figure 2.2 – Modèle de Bennett et Nordin (1977). (Yang et Simões, 2002)

La couche active contient l'ensemble des sédiments disponibles pour le transport. Son épaisseur est réglementée par un coefficient multiplicateur appliqué au diamètre représentatif de la plus grosse fraction granulométrique contenant au moins 1% des particules. Par défaut, le coefficient multiplicateur est fixé à 14, mais il peut être ajusté

à la guise de l'usager. Le modèle divise la couche active en différentes sous-couches à granulométrie uniforme. Leur épaisseur est proportionnelle à la quantité de matériel contenu dans chaque fraction granulométrique du lit. En régime d'érosion, la variation de l'élévation du fond est limitée par l'épaisseur de ces sous-couches.

$$\Delta Z_k \leq T_k \qquad \text{Équation 2.13}$$

où T_k est l'épaisseur de la sous-couche associée à la fraction granulométrique k.

L'épaisseur de la couche active est étroitement liée avec le pas de temps sédimentaire. Plus le pas de temps est long, plus l'épaisseur doit être grande afin de ne pas artificiellement limiter l'érosion.

La couche inactive n'est utilisée qu'en présence d'une aggradation nette du fond. Elle enregistre l'accumulation des dépôts et ajuste la granulométrie de la couche active en conséquence. Finalement, la dernière couche est caractérisée par la granulométrie originale du lit, soit celle fournie lors de l'élaboration du modèle. Elle possède une profondeur infinie et alimente la couche active lorsqu'en présence d'un régime d'érosion nette.

L'information granulométrique est conservée à chaque point de discrétisation des sections et est mise à jour à tous les pas de temps. Au début de chaque itération, une fois les frontières des tubes de courant repositionnées, cette information sert à régénérer l'épaisseur des différentes couches du modèle.

2.6 Paramètres d'optimisation

Le logiciel MHYSER est très complexe et plusieurs de ces paramètres peuvent être utilisés lors du calage des modèles. Les paramètres d'optimisation les plus importants sont :

1. coefficients de pertes de charge (linéaires et singulières)
2. équation pour calculer la pente énergétique moyenne de l'écoulement
3. nombre de tubes de courant
4. équation de transport
5. débit solide entrant (courbe de tarage et hydrogramme discrétisé)
6. épaisseur de la couche active

Le calage manuel de ces paramètres peut rapidement devenir une opération lourde et complexe. Une démarche automatisée permettrait donc de simplifier ce processus et d'accélérer sa mise en application.

CHAPITRE 3 – Logiciel OptiMHYSER

Le logiciel OptiMHYSER est un outil développé pour le calage automatisé de tout modèle de rivière basé sur le logiciel hydrosédimentaire MHYSER. Une interface graphique simple et conviviale permet de choisir les paramètres d'optimisation et d'observation désirés pour caler le modèle. La procédure de calibration est entièrement autonome et une fois lancée elle ne nécessite aucune intervention supplémentaire de la part de l'usager. Lorsque terminée, elle retourne le modèle avec la valeur finale des paramètres d'optimisation donnant lieu au plus faible écart entre les données d'observation calculées et les données d'observation désirées.

OptiMHYSER intègre à son algorithme le logiciel PEST, développé spécifiquement pour le calage automatique de modèles numériques. Ce logiciel est utilisé pour optimiser les paramètres continus du modèle MHYSER. OptiMHYSER configure automatiquement PEST et génère tous les fichiers de données nécessaires pour son exécution. L'optimisation des paramètres discontinus est effectuée par un algorithme distinct qui fonctionne en parallèle avec PEST.

Ce chapitre fait un bref survol du fonctionnement d'OptiMHYSER. Il présente les hypothèses derrière le choix des paramètres de d'optimisation et d'observation, résume la structure du logiciel et explique comment s'effectue la gestion des paramètres continus et discontinus. Un guide d'utilisation détaillé est offert à l'annexe C.

3.1 Paramètres de calage et d'observation

3.1.1 Paramètres de calage

Les paramètres de calage, ou d'optimisation, sont des paramètres contenus dans les fichiers de données du modèle MHYSER. Leur valeur est modifiée progressivement de

manière à ajuster les résultats des simulations afin d'obtenir une réponse du modèle qui correspond au comportement observé in situ. OptiMHYSER possède huit paramètres d'optimisation, dont cinq sont continus et trois sont discontinus. La première catégorie regroupe : les coefficients de perte de charge locale, les coefficients de rugosité, l'épaisseur de la couche active et le débit sédimentaire entrant (hydrogramme discrétisé et courbe de tarage). Les paramètres discontinus sont quant à eux : la méthode utilisée pour calculer la pente énergétique moyenne de chaque bief, le nombre de tubes de courants employés et l'équation de transport utilisée.

La littérature démontre que les coefficients de rugosités et de perte de charge locale sont les paramètres usuels pour le calage de la ligne d'eau (Anastasiadou-Partheniou & Samuels (1998) et Vidal, Moisan, Faure & Dartus (2007)). En ce qui concerne le calage de la phase solide, il existe d'autres paramètres mieux adaptés pour ajuster le comportement du modèle. Malheureusement, peu d'ouvrages portent sur le calage de modèles hydrosédimentaires. La sélection des paramètres repose donc sur une étude personnelle des variables ayant une influence importante sur les résultats de simulations, mais pour lesquels il existe peu d'information permettant de confirmer leur valeur. Il est conclu que l'équation de transport, l'épaisseur de la couche active et le débit sédimentaire entrant répondent bien à ce critère.

Deux paramètres d'optimisation supplémentaires sont ajoutés à la sélection, en lien avec certaines fonctionnalités innovatrices du logiciel MHYSER. Il s'agit du nombre de tubes de courants et de la méthode utilisée pour calculer la pente énergétique moyenne de chaque bief. L'objectif de cette addition est de pouvoir observer l'effet qu'ont ces paramètres sur les résultats de simulations.

3.1.2 Paramètres d'observation

Les paramètres d'observation sont des paramètres contenus dans les fichiers de sorties du modèle MHYSER. Au cours du processus de calage, leur valeur est comparée aux

mesures prises sur le terrain. Un *paramètre d'observation* contient généralement plusieurs *données d'observation.* Les données inscrites aux fichiers de sorties sont désignées comme les **données d'observation calculées** et les mesures auxquelles elles sont comparées, les **données d'observation désirées.** OptiMHYSER possède sept paramètres d'observation, soit : l'élévation de la surface libre, l'aire de la section mouillée, la vitesse d'écoulement, l'accumulation des dépôts (poids et volume), le niveau du talweg et le profile de la section. Les paramètres choisis dépendent essentiellement de l'information contenue dans les fichiers de sorties et des données dont dispose le modélisateur.

3.2 Logiciel PEST

Le calage des paramètres d'optimisation continus est effectué par le logiciel PEST. Cette section résume sommairement les fonctionnalités du logiciel utilisées dans le cadre de ce projet. Elle détail aussi les opérations que doit effectuer OptiMHYSER pour configurer correctement PEST et générer tous les fichiers de données nécessaires pour sont exécution. La description, les théories et les équations présentées suivent la documentation qui accompagne PEST (Doherty, 2004).

PEST (Parameter ESTimation software) est un logiciel qui permet d'effectuer le calage automatique des modèles numériques non linéaires. Sa structure innovatrice lui donne la possibilité d'être exécuté avec plusieurs différents types de modèles, qu'ils relèvent du domaine hydraulique, hydrologique, géotechnique, ou autres. La souplesse du logiciel permet d'adapter le processus de calage aux besoins du modèle plutôt que d'adapter le modèle aux besoins du processus de calage. Il offre ainsi à la communauté de modélisateurs une méthode de calibration unique, robuste et efficace (Doherty, 2004).

PEST prend le contrôle du logiciel de modélisation numérique et commence par créer une image du fichier d'entrée du modèle. Cette image est ensuite modifiée de façon

itérative, selon une série d'instructions fournie par l'usager, en faisant varier la valeur des paramètres de calage identifiés. À chaque itération, PEST exécute le logiciel de modélisation et observe les résultats générés dans le fichier de sortie. À la fin de la procédure, il fournit la combinaison optimale des paramètres de calage générant le plus faible écart entre les résultats obtenus et les résultats désirés (Doherty, 2004).

3.2.1 Algorithme PEST

L'algorithme utilisé pour caler les modèles numériques repose sur un processus itératif de raffinement. Étant donné un premier vecteur b_0 de dimension m x 1, contenant la valeur initiale des m paramètres de calage, PEST exécute le logiciel de modélisation numérique afin de générer un vecteur c_0 de dimension n x 1, contenant la valeur **calculée** des n paramètres d'observation du modèle. Il ajuste ensuite progressivement le vecteur b_0 à l'aide d'un vecteur de raffinement u, lui aussi de dimension m x 1, de manière à ce que le vecteur c_0 tende vers le vecteur c, contenant la valeur **désirée** des n paramètres d'observation. Une fonction objective Φ mesure l'écart entre les vecteurs c et c_0, évaluant ainsi la qualité du calage. Le logiciel considère avoir atteint son objectif (c.-à-d. obtenir une réponse du modèle qui correspond au comportement observé en nature) lorsque la fonction objective est à son minimum.

3.2.1.1 Calcul du vecteur de raffinement, u

Le calcul du vecteur de raffinement requiert la linéarisation du modèle numérique. Le théorème de Taylor est alors employé. Connaissant la réponse c_0 à une excitation b_0 d'un système d'équations M et étant donné un vecteur b_1 suffisamment proche de b_0, une bonne approximation du vecteur c_1 peut être obtenue par l'équation suivante :

$$c_1 = c_0 + J(b_1 - b_0) \qquad \text{Équation 3.1}$$

où J est la matrice jacobienne de M.

Suivant cette hypothèse, le vecteur de raffinement peut alors être calculé à partir de l'équation 3.2.

$$u = \left(J^t Q J\right)^{-1} J^t Q (c - c_0) \qquad \text{Équation 3.2}$$

où Q est une matrice diagonale ayant comme éléments non nuls le poids, w_i, associé à chaque paramètre d'observation élevé au carré et l'exposant t dénote la transposé de la matrice.

De façon générale, le vecteur u converge vers le minimum de la fonction objective tel qu'illustré à la figure 3.1a pour un système composé de deux paramètres. Il est généralement préférable que l'orientation du vecteur soit différente de celle du gradient négatif de la fonction objective, représenté par le vecteur $-g$.

$$g_i = \frac{\partial \Phi}{\partial b_i} \qquad \text{Équation 3.3}$$

où l'indice i représente le $i^{ième}$ élément des vecteurs g et b.

Ceci permet d'éviter un comportement en dents de scie lorsque la fonction objective est proche de son minimum (voir figure 3.1b). Cependant, pour un mauvais estimé initial des paramètres de calage, la fonction objective peut être très loin de son minimum. Une rotation du vecteur u vers le vecteur $-g$ lors des premières itérations peut donc accélérer la convergence.

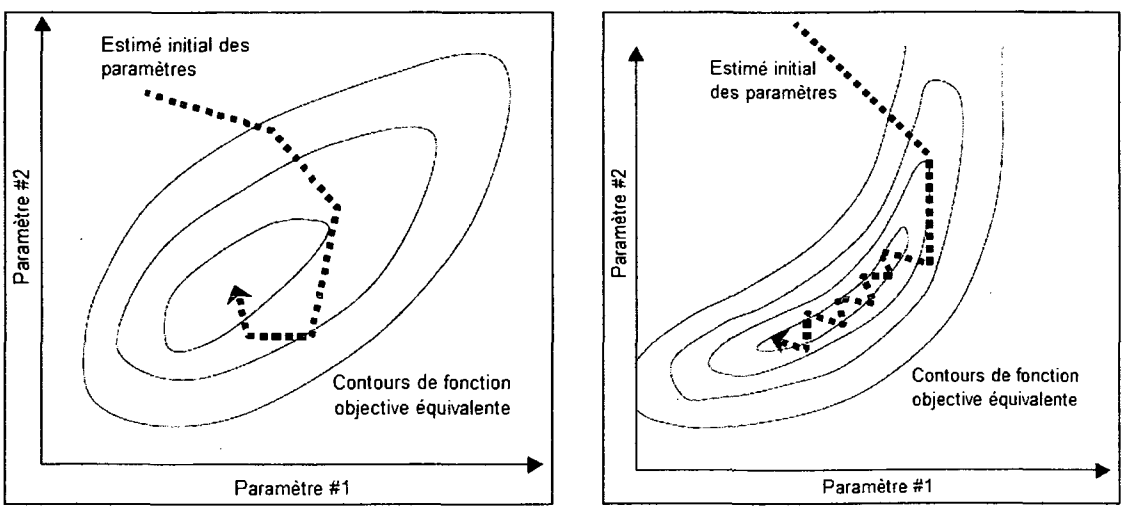


Figure 3.1 – Direction de convergence du vecteur de raffinement (a) selon l'algorithme du logiciel PEST et (b) suivant le gradient négatif de la fonction objective (Doherty, 2004).

Le paramètre de Marquardt (1963), α, est utilisé pour effectuer cette rotation. Additionné à la matrice normale $(J'QJ)$, une valeur élevée de α fait dévier le vecteur u vers le gradient négatif -g. PEST modifie progressivement la valeur de ce paramètre, l'augmentent ou le diminuant, à la recherche du minimum de la fonction objective.

$$u = (J'QJ + \alpha I)^{-1} J'Q(c - c_0) \qquad \text{Équation 3.4}$$

où I est la matrice identité de dimensions n x n.

Outre son orientation, le vecteur de raffinement possède aussi une longueur optimale, décrite par le produit entre le vecteur u et le coefficient d'ajustement β.

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{m} (c_i - c_{0,i}) w_i^2 \gamma_i}{\sum_{i=1}^{m} (w_i \gamma_i)^2} \qquad \text{Équation 3.5}$$

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^{n} u_j \frac{\partial c_{0,i}}{\partial b_j} \qquad \text{Équation 3.6}$$

À la fin de chaque itération, le raffinement des paramètres de calage (vecteur b) est calculé selon l'équation suivante :

$$b = b_0 + \beta u \qquad \text{Équation 3.7}$$

3.2.1.2 Fonction objective

Suivant le théorème de Taylor énoncé précédemment (voir équation 3.1), la fonction objective Φ prend la forme suivante :

$$\Phi = (c - c_0 - J(b - b_0))' Q(c - c_0 - J(b - b_0)) \qquad \text{Équation 3.8}$$

Elle exprime la somme des résiduels entre les divers éléments des vecteurs c et c_0 élevés au carré.

3.2.1.3 Calcul des dérivées (matrice jacobienne)

PEST est structuré de manière à être indépendant du logiciel de modélisation numérique. Il ne peut donc pas évaluer les dérivées partielles contenues dans la matrice jacobienne directement à partir des équations sur lesquelles s'appuie le modèle. Une méthode aux différences finies est alors utilisée. Au début du processus de calage, la méthode des différences finies avant est choisie, car elle est relativement rapide et offre une précision adéquate. À tour de rôle, PEST ajoute un incrément prédéterminé à chaque paramètre de calage et exécute le logiciel de modélisation. Il observe ensuite la réponse des paramètres d'observation. Les dérivées partielles sont alors évaluées comme étant le rapport entre la variation de chaque paramètre d'observation et l'incrément ajouté au paramètre de calage.

Cependant, lorsque le logiciel s'approche du minimum de la fonction objective, une précision accrue des dérivées est généralement requise. Dès que la variation de la fonction objective glisse en dessous d'un certain seuil, PEST permet de sélectionner automatiquement la méthode des différences finies centrées pour calculer les dérivées partielles. De façon similaire à la méthode des différences finies avant, le logiciel ajoute et soustrait un incrément prédéterminé aux paramètres de calage et observe la réponse des paramètres d'observation. Il offre la possibilité d'évaluer les dérivées partielles à trois points suivant un ajustement de type parabolique, moindre carré ou points extérieurs.

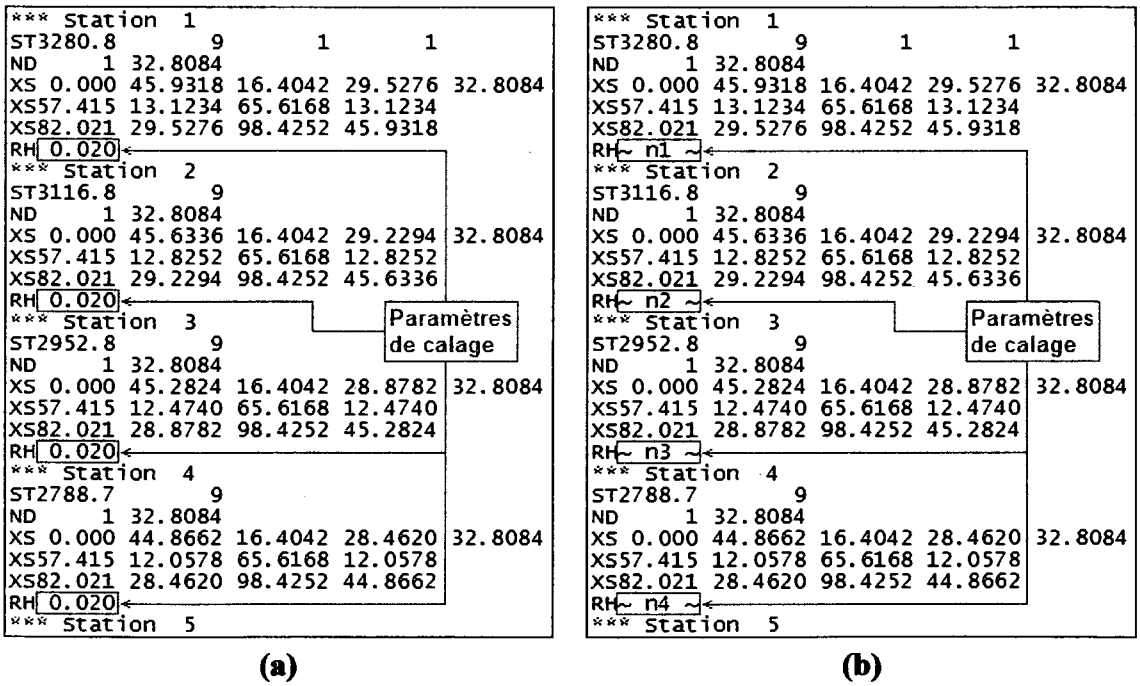
3.2.2 Implémentation de l'algorithme PEST

L'implémentation de l'algorithme PEST nécessite la création de trois fichiers de données qui rendent possible l'exécution du logiciel : un fichier gabarit, un fichier d'instruction et un fichier de contrôle. Les deux premiers fichiers permettent de cibler respectivement l'emplacement des paramètres de calage et d'observation dans les fichiers d'entrées et de sorties du modèle tandis que le dernier fichier contient

l'information relative au fonctionnement de PEST. Chaque fichier est unique au modèle utilisé et à la configuration des paramètres d'optimisation et d'observation choisie. OptiMHYSER doit alors être en mesure de les créer de façon automatique et de s'assurer qu'ils contiennent l'information appropriée pour ne pas générer d'erreur d'exécution avec PEST.

3.2.2.1 Fichier gabarit

Le fichier gabarit est essentiellement une copie exacte du fichier de données du modèle, sur laquelle des caractères de délimitation identifient l'emplacement des paramètres de calage. Au début de chaque itération, PEST inscrit la valeur de chaque paramètre aux endroits appropriés et présente le fichier gabarit comme fichier d'entrée au logiciel de modélisation. Un fichier gabarit doit être généré pour chaque fichier d'entrée contenant des paramètres de calage.

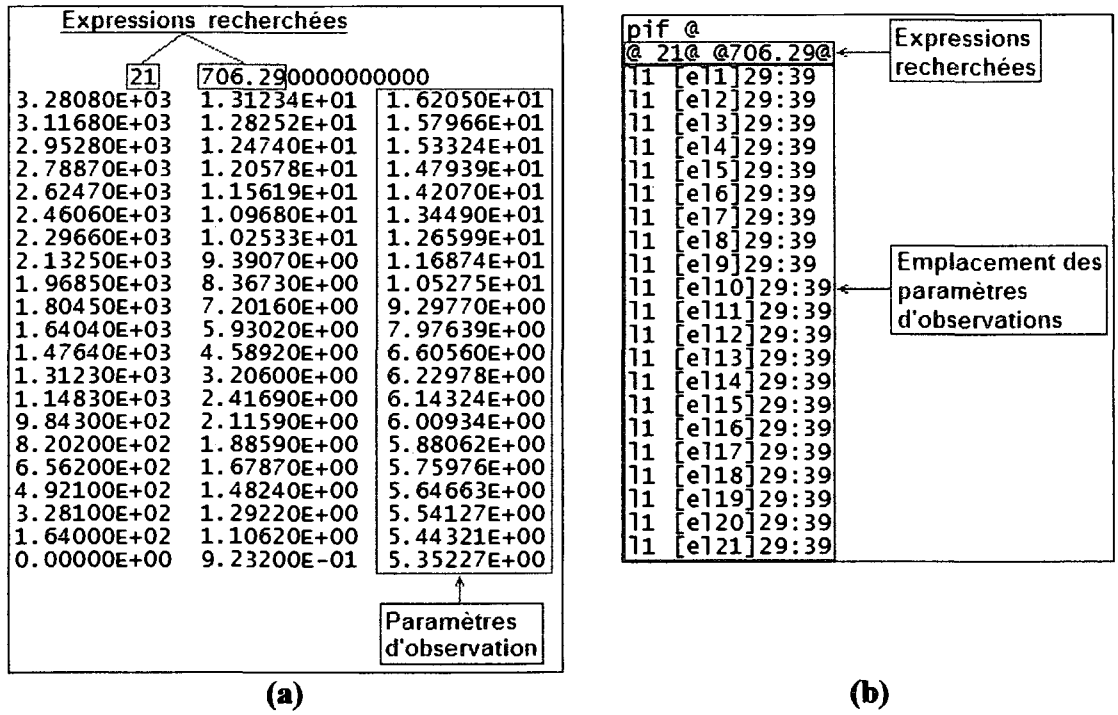


(a) **(b)**

Figure 3.2 – Exemple (a) d'un fichier d'entrée et (b) d'un fichier gabarit.

3.2.2.2 Fichier d'instruction

Le fichier d'instruction contient, quant à lui, une liste de commandes qui guident PEST vers l'emplacement des paramètres d'observation. Contrairement au fichier d'entrée, où l'identification des paramètres de calage est relativement facile, le contenu volumineux du fichier de sortie complexifie cette tâche pour les paramètres d'observation. Le fichier d'instruction aide alors PEST à parcourir le fichier de sortie à la recherche de mots ou de phrases clés. Une série de commandes permet ensuite de cibler l'information recherchée par rapport à l'emplacement de ces mots ou ces phrases clés. De façon similaire au fichier gabarit, un fichier d'instruction doit être généré pour chaque fichier de sortie parcouru.



(a) **(b)**

Figure 3.3 – Exemple (a) d'un fichier de sortie et (b) d'un fichier d'instruction.

3.2.2.3 Fichier de contrôle

Symboliquement, le fichier de contrôle représente le cerveau de PEST. Il effectue l'union entre le fichier gabarit et le fichier d'instruction en plus de régulariser le

processus de calage. Il contient notamment les paramètres qui règlementent la variation de la fonction objective, des paramètres de calage et du lambda de Marquardt ainsi que ceux qui servent de critères d'arrêt au logiciel.

```
pcf
* control data
norestart estimation
21 21 1 0 1
1 1 single nopoint 1 0 0
1000.0 10.0 0.3 0.01 10
1.0 5.0 0.1
0.15
30 0.005 3 3 0.0005 3
0 0 0
* parameter groups
RU absolute 0.005 0.005 switch 1.0 best_fit
* parameter data
n1 none factor 0.01 0.005 0.05 RU 1.0 0.0 1
  ...
* observation groups
ELEVSF
* observation data
sfl1 1.62049E+01 1.0 ELEVSF
  ...
* model command line
C:\MHYSER1\MHYSER1exe\mhyser1.exe < C:\MHYSER1\Examples\Example1\Valid1\Ex1.inp
* model input/output
C:\MHYSER1\Examples\Example1\Valid1\Ex1.tpl C:\MHYSER1\Examples\Example1\Valid1\Ex1.data
C:\MHYSER1\Examples\Example1\Valid1\Ex1[out].ins C:\MHYSER1\Examples\Example1\valid1\Ex1.out
```

Figure 3.4 – Exemple d'un fichier de contrôle PEST

3.2.2.4 Contrôle des paramètres de calage

Bien que la valeur optimale des paramètres de calage ne soit pas connue, il est néanmoins possible de cibler une plage de données parmi laquelle elle devrait se trouver. Cette plage dépend habituellement des limites du schéma numérique ou du phénomène physique lui-même. Elle doit être respectée afin de garantir la cohérence du modèle. PEST exige alors qu'une borne inférieure et une borne supérieure soient fournies pour la valeur de chaque paramètre de calage.

Outre les limites imposées sur la valeur des paramètres, il est aussi important de restreindre la variation que peuvent subir ces derniers d'une itération à l'autre. En présence de modèles hautement non linéaires, une trop grande variation des paramètres de calage, donc un vecteur de raffinement trop long, peut faire passer aveuglément la fonction objective par-dessus son minimum. Les limites imposées peuvent être de natures relative ou factorielle. Un paramètre soumis à une limite de nature relative doit respecter l'équation suivante :

$$\left|\frac{b-b_0}{b_0}\right| \leq r \qquad \text{Équation 3.9}$$

où b et b_0 sont respectivement les valeurs du paramètre de calage observées au début et à la fin d'une itération et r est la borne de variation relative.

Un paramètre soumis à une limite de nature factorielle doit quant à lui respecter l'une des conditions énoncées ci-dessous :

$$\frac{b_0}{f} \leq b \leq fb_0 \quad \text{si } b_0 \text{ est positif} \qquad \text{Équation 3.10a}$$

$$fb_0 \leq b \leq \frac{b_0}{f} \quad \text{si } b_0 \text{ est négatif} \qquad \text{Équation 3.10b}$$

où f est la borne de variation factorielle.

Si, au cours d'une itération, un ou plusieurs paramètres excèdent les bornes établies, PEST réduit la longueur du vecteur de raffinement de manière à ce que les paramètres fautifs reviennent à l'intérieur des limites prescrites.

Toutefois, en présence de paramètres insensibles (c.-à-d. nécessitant d'importantes variations pour faire fluctuer la fonction objective) cette démarche peut nuire grandement à la vitesse de convergence du processus de calage. PEST permet alors de figer temporairement la valeur de ces paramètres pendant quelques itérations. Ceci neutralise leur effet sur la fonction objective et accélère la vitesse de convergence.

3.2.2.5 Utilisation du paramètre de Marquardt

L'utilité du paramètre de Marquardt a été discutée à la section 3.2.1.1. Il sert essentiellement à orienter le vecteur de raffinement u dans la direction optimale pour minimiser la fonction objective. Quant à son implémentation dans l'algorithme, PEST exige d'abord qu'une première valeur du paramètre soit fournie au début de l'exécution. À chaque itération subséquente, le logiciel tente de réduire cette valeur d'un facteur prédéterminé X. Idéalement, le paramètre de Marquardt devrait tendre vers

une valeur nulle en même temps que la fonction objective approche de son minimum. Cependant, une diminution du paramètre ne garantit pas nécessairement une réduction de la fonction objective. Si l'effet désiré n'est pas observé, PEST essaie alors d'augmenter le paramètre du même facteur *X*. De façon générale, une dizaine de paramètres de Marquardt peuvent être mis à l'essai à chaque itération.

Cette technique d'orientation implique toutefois que le logiciel requière des critères de décisions additionnels pour choisir la meilleure action à entreprendre, c.-à-d. essayer de nouveaux paramètres de Marquardt ou passer à l'itération suivante. Ces critères se fient principalement à la variation de la fonction objective. D'abord, si aucune modification du paramètre (augmentation ou diminution) ne réussit à réduire la fonction objective, PEST procède automatiquement à la prochaine itération. Sinon, le logiciel stipule qu'il est préférable de passer à l'itération suivante lorsque le rapport entre la valeur de la fonction objective obtenue pour un paramètre de Marquardt particulier et la valeur la plus faible atteinte lors de l'itération précédente glisse en dessous d'un certain seuil.

$$\frac{\Phi_i^j}{\Phi_{i-1}} \leq S1 \qquad \text{Équation 3.11}$$

où Φ_i^j est la valeur de la fonction objective obtenue pour le $j^{ième}$ paramètre de Marquardt mis à l'essai à l'itération i, Φ_{i-1} la valeur de la fonction objective minimum atteinte lors de l'itération i-1 et $S1$ un seuil prédéterminé.

Toutefois, il est possible pour PEST d'avoir de la difficulté à atteindre le taux de réduction $S1$, surtout lorsqu'il s'approche du minimum de la fonction objective où la valeur change très peu. Dans ce cas, le logiciel utilise plutôt la réduction relative obtenue suite à l'essai de deux paramètres de Marquardt consécutifs. Si cette réduction est insuffisante, PEST estime qu'il serait plus efficace de passer à la prochaine itération.

$$\frac{\left(\Phi_i^{j-1} - \Phi_i^j\right)}{\Phi_i^{j-1}} \leq S2 \qquad \text{Équation 3.12}$$

où Φ_i^{j-1} et Φ_i^j sont respectivement les valeurs de la fonction objective obtenues pour les paramètres de Marquardt j-1 et j lors de l'itération i et $S2$ est un seuil prédéterminé.

Finalement, s'il s'avère impossible de satisfaire les limites $S1$ et $S2$, PEST procède automatiquement à l'itération suivante lorsque plus de M paramètres de Marquardt ont été mis à l'essai.

3.2.2.6 Critères d'arrêt

Afin de mener à terme le processus de calage, PEST se fie à certains critères d'arrêt pour déterminer le moment opportun auquel il devrait cesser son exécution. Ces critères peuvent être séparés en deux groupes, selon qu'ils s'appuient sur la variation de la fonction objective ou celle des paramètres de calage. Évidemment, le critère d'arrêt le plus souhaité est lorsque la fonction objective atteint une valeur nulle. Toutefois, cette condition se matérialise rarement quand des mesures prises sur le terrain sont utilisées pour effectuer le calage. Le logiciel doit alors utiliser d'autres paramètres pour conclure qu'il a atteint le meilleur ajustement possible.

Un des premiers critères auquel se fie PEST est la variation positive de la fonction objective. Si le logiciel est incapable de réduire la valeur de cette fonction suite à N_1 itérations consécutives, il conclut avoir trouvé son minimum. Inversement, en présence d'une variation négative, si un seuil de réduction prédéterminé n'est pas atteint au cours de N_2 itérations, le logiciel considère être suffisamment proche du minimum pour qu'il soit inutile de poursuivre l'exécution.

Outre la variation de la fonction objective, PEST surveille aussi la variation des paramètres de calage. Lorsque la variation maximale demeure en dessous d'une certaine limite pendant N_3 itérations, le logiciel estime qu'il a trouvé la valeur optimale

des paramètres et que des itérations supplémentaires n'apporteraient aucun gain de précision notable.

Finalement, en présence de modèles instables, il est possible qu'aucun de ces critères ne soit satisfait. Dans ce cas, PEST termine automatiquement son exécution après un nombre prédéterminé d'itérations N_4.

3.2.3 Limites du logiciel

Le logiciel PEST est un outil avant-gardiste et efficace pour le calage des modèles numériques. Cependant, l'algorithme possède certaines limites pouvant affecter la qualité des résultats ou restreindre son domaine d'application. Bien que plusieurs auteurs s'accordent sur le fait qu'une fonction objective exprimant la somme des erreurs élevées aux carrées est parmi l'un des meilleurs critères d'ajustements pour le calage automatique, certains critiquent son caractère myope (Anastasiadou-Partheniou & Samuels, 1998). Anastasiadou-Partheniou et Samuels (1998) argumentent que ce type de fonction est incapable de repérer un ajustement adéquat, mais décalé dans le temps. Dans leur étude, les auteurs proposent de combiner la fonction objective à une formule de pondération, qui porte une attention particulière aux caractéristiques importantes des observations (Anastasiadou-Partheniou & Samuels, 1998).

Deuxièmement, une analyse des critères d'arrêt du logiciel permet de constater qu'il est possible que le processus de calage soit capturé par un minimum local de la fonction objective. En effet, le logiciel ne parcourt pas la gamme complète de valeurs fournie pour les paramètres de calage, mais se fie plutôt au comportement de la fonction. Si celle-ci diminue très peu ou pas du tout au cours d'un certain nombre d'itérations, PEST conclut avoir trouvé son minimum. Or, il peut ne s'agir que d'un minimum local. Des données d'observations erronées peuvent facilement piéger le logiciel de cette manière en monopolisant le contrôle de la fonction objective. Si aucune configuration du modèle ne permet d'atteindre les valeurs désirées, l'écart résiduel supplante

l'ajustement des autres paramètres d'observations et empêche une variation significative de la fonction. Les critères d'arrêts du logiciel terminent alors prématurément l'optimisation.

Finalement, une des limites les plus encombrantes de l'algorithme est que les dérivées partielles des paramètres de calage doivent être continues. Il est donc impossible d'inclure au processus de calage des paramètres discontinus, tels que le nombre de tubes de courants ou l'équation de transport.

3.3 Optimisation des paramètres de calage discontinus

Afin de palier aux limites d'utilisation du logiciel PEST, deux algorithmes d'optimisation distincts ont été développés pour effectuer le calage des paramètres discontinus.

3.3.1 Paramètres d'optimisation continus et discontinus

Le premier algorithme est activé lorsqu'il y a combinaison de paramètres continus et discontinus dans la sélection des paramètres d'optimisation. Celui-ci doit travailler conjointement avec PEST pour établir la configuration optimale du modèle. L'algorithme commence en dressant les fichiers nécessaires pour l'exécution de PEST (**.tpl*, **.ins*, **.pst* et **.inp*), de la même manière que lorsque seuls des paramètres d'optimisation continus sont sélectionnés. Il enregistre ensuite les paramètres discontinus choisis à l'aide d'un tableau similaire au tableau 3.1. La valeur « VRAI » est inscrite sous un paramètre lorsque celui-ci fait partie de la sélection et la valeur « FAUX » dans le cas inverse.

Tableau 3.1 – Enregistrement des paramètres d'optimisation discontinus sélectionnés.

Pente énergétique moyenne (ER)	1	2	...	4		
FAUX	VRAI	FAUX	...	FAUX		
Nombre de tubes de courant (NT)	1	2	...		9	
VRAI	FAUX	VRAI	...		VRAI	
Équation de transport (TS)	1	2	...			14
VRAI	VRAI	VRAI	...			FAUX

Ensuite, pour chaque paramètre activé, l'algorithme parcourt itérativement les lignes du tableau en s'arrêtant sur les cellules dont la valeur est fixée à « VRAI ». Ceci permet alors d'identifier toutes les combinaisons possibles. À chaque itération, OptiMHYSER modifie le fichier gabarit créé plus tôt afin d'y inscrire les valeurs appropriés des paramètres discontinus pour la combinaison en cours. Il exécute ensuite PEST pour optimiser les paramètres continus et récupère la valeur de la fonction objective inscrite dans le fichier de sortie *.*rec*. Cette valeur est sauvegardée dans un second tableau, similaire au tableau 3.2.

Tableau 3.2 – Enregistrement de la valeur de la fonction objective.

		NT			
ER	**TS**	1	2	...	9
1	1	Valeur de la fonction objective			
	2				
	...				
	14				
...	...				
4	1				
	2				
	...				
	14				

Lorsque toutes les combinaisons de paramètres discontinus ont été mises à l'essai, OptiMHYSER parcourt le tableau 3.2 à la recherche de la cellule contenant la valeur minimum de la fonction objective. L'emplacement de celle-ci identifie la combinaison optimale. Finalement, le logiciel effectue une itération supplémentaire avec ces paramètres afin que le fichier de données du modèle reflète sa meilleure configuration.

Cet algorithme présente deux obstacles importants. D'abord afin de rendre la procédure de calage entièrement autonome, OptiMHYSER doit être en mesure lancer

automatiquement PEST et de lui fournir le chemin vers le fichier de données du modèle. Ensuite, avant d'aller récupérer la valeur de la fonction objective, il doit attendre que PEST ait terminé sont exécution. Une sous-routine de programmation permet de surmonter ces obstacles. Elle prend le contrôle de l'ordinateur, lance PEST, surveille son fonctionnement et attend qu'il retourne sa valeur de fin d'exécution.

Rappelons que PEST utilise trois critères de convergence pour établir l'optimum des paramètres d'optimisation continus : augmentation de la fonction objective, réduction insuffisante de la fonction objective ou réduction insuffisante des paramètres d'optimisation (voir section 2.2.9 dans Doherty (2004), p.2-25).

3.3.2 Paramètres discontinus seulement

Le deuxième algorithme d'optimisation est activé lorsque seuls des paramètres de calage discontinus sont sélectionnés. Il est très semblable à celui décrit à la section précédente, mais ne requière pas l'exécution de PEST. Ceci implique alors qu'OptiMHYSER doit être en mesure d'évaluer lui-même la qualité de l'ajustement.

Le logiciel commence encore une fois par la création des fichiers PEST. Même si ce logiciel n'intervient pas dans le processus de calage, OptiMHYSER se sert de certains de ces fichiers pour récupérer les données d'observation calculées et évaluer la fonction objective. Les paramètres d'optimisation discontinus choisis sont ensuite enregistrés de la même manière que précédemment, en utilisant le tableau 3.1, et le logiciel identifie itérativement toutes les combinaisons possibles. Cette fois-ci par contre, au lieu de modifier le fichier gabarit, OptiMHYSER inscrit directement la valeur des paramètres dans le fichier de données du modèle. Il exécute ensuite MHYSER. La sous-routine de programmation décrite précédemment permet d'effectuer le lancement de façon automatique, de fournir le chemin ver le fichier de données et d'attendre la fin d'exécution du logiciel. OptiMHYSER utilise ensuite le fichier d'instruction PEST (*.*ins*) pour récupérer les données d'observation calculées. Il les compare

automatiquement aux données d'observation désirées et calcule la valeur de la fonction objective : mesure l'écart entre les données, l'élève au carré et fait la somme. La fonction objective est ensuite inscrite dans la cellule appropriée du tableau 3.2. Finalement, lorsque toutes les combinaisons de paramètres d'optimisation discontinus ont été mises à l'essai, OptiMHYSER détermine laquelle donne lieu au meilleur ajustement et exécute MHYSER une dernière fois afin que le fichier de données du modèle soit dans son état optimal.

3.4 Interfaces graphiques OptiMHYSER

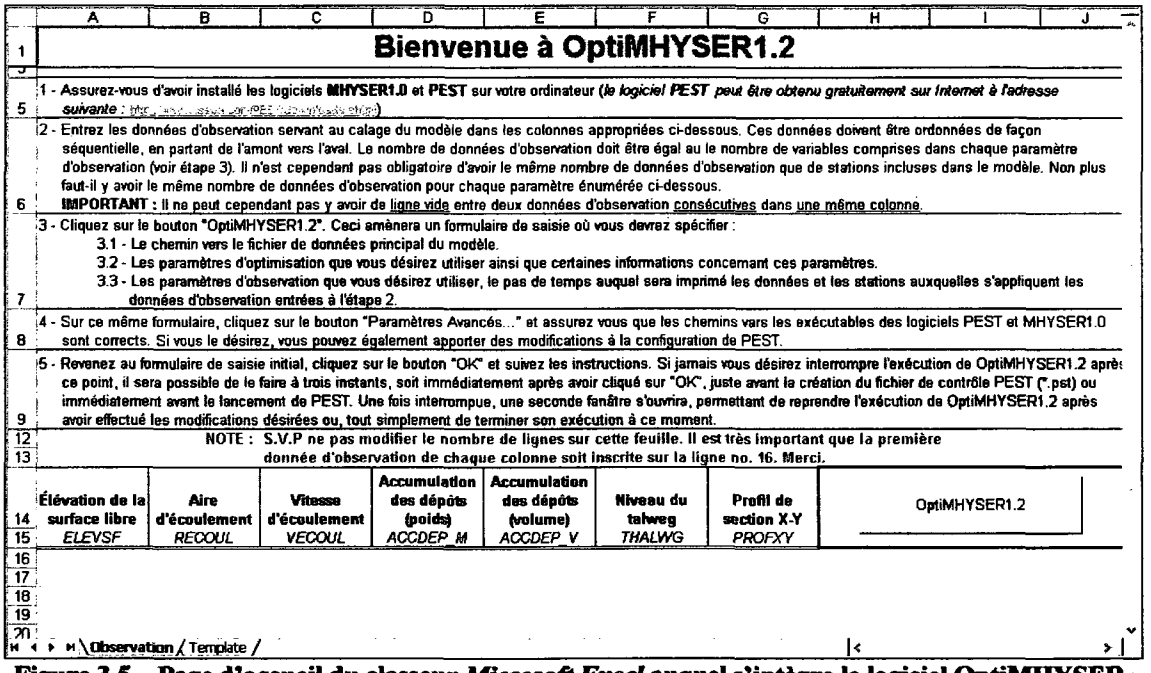
3.4.1 Classeur Excel

Le logiciel se présente comme un fichier *Microsoft Excel*. Lors de son ouverture, la première de deux feuilles de calculs s'affiche (figure 3.5). Elle possède une version abrégée du mode d'emploi, un espace réservé pour l'inscription des données d'observations désirées et un bouton de commande permettant de lancer OptiMHYSER. Les données d'observation désirées doivent être entrées en ordre séquentiel, en partant de l'amont vers l'aval, sous leurs colonnes respectives. Chaque colonne est associée à un paramètre d'observation spécifique. Le nombre de données inscrites pour chaque paramètre doit être inférieur ou égal au nombre de sections que contient le modèle (exception faite du paramètre « PROFXY »). Il n'est cependant pas obligatoire d'avoir le même nombre de données pour chaque paramètre utilisé. La liaison entre les données d'observation et les sections du modèle est effectuée lors de la sélection des paramètres d'observation sur le formulaire de saisie principal du logiciel (voir figure 3.6b).

En ce qui concerne le paramètre « PROFXY », le nombre de données d'observation utilisées doit correspondre à la somme des points de discrétisation qui décrivent chaque section choisie. Les données doivent représenter l'élévation finale observée pour les points inscrits au fichier de données du modèle (nouvelle coordonnée 'y' pour même

coordonnée 'x'). Ceci fait donc abstraction des points intermédiaires, ajoutés automatiquement par MHYSER au cours de son exécution. De la même façon que pour les autres paramètres, il n'est pas nécessaire d'avoir des données pour toutes les sections.

La deuxième feuille du classeur *Excel*, intitulée « Template », est utilisée lors de l'importation du fichier de données du modèle. Elle facilite l'identification des paramètres d'optimisation et l'attribution des noms de variables en plus de servir à la création du fichier gabarit principal, requis pour l'exécution de PEST. Cette feuille peut être consultée, mais aucune modification ne devrait lui être apportée.



Bienvenue à OptiMHYSER1.2

1 - Assurez-vous d'avoir installé les logiciels **MHYSER1.0** et **PEST** sur votre ordinateur (*le logiciel PEST peut être obtenu gratuitement sur Internet à l'adresse suivante :*

2 - Entrez les données d'observation servant au calage du modèle dans les colonnes appropriées ci-dessous. Ces données doivent être ordonnées de façon séquentielle, en partant de l'amont vers l'aval. Le nombre de données d'observation doit être égal au le nombre de variables comprises dans chaque paramètre d'observation (voir étape 3). Il n'est cependant pas obligatoire d'avoir le même nombre de données d'observation que de stations incluses dans le modèle. Non plus faut-il y avoir le même nombre de données d'observation pour chaque paramètre énumérée ci-dessous.

IMPORTANT : Il ne peut cependant pas y avoir de ligne vide entre deux données d'observation consécutives dans une même colonne.

3 - Cliquez sur le bouton "OptiMHYSER1.2". Ceci amènera un formulaire de saisie où vous devrez spécifier :
- 3.1 - Le chemin vers le fichier de données principal du modèle.
- 3.2 - Les paramètres d'optimisation que vous désirez utiliser ainsi que certaines informations concernant ces paramètres.
- 3.3 - Les paramètres d'observation que vous désirez utiliser, le pas de temps auquel sera imprimé les données et les stations auxquelles s'appliquent les données d'observation entrées à l'étape 2.

4 - Sur ce même formulaire, cliquez sur le bouton "Paramètres Avancés..." et assurez vous que les chemins vers les exécutables des logiciels PEST et MHYSER1.0 sont corrects. Si vous le désirez, vous pouvez également apporter des modifications à la configuration de PEST.

5 - Revenez au formulaire de saisie initial, cliquez sur le bouton "OK" et suivez les instructions. Si jamais vous désirez interrompre l'exécution de OptiMHYSER1.2 après ce point, il sera possible de le faire à trois instants, soit immédiatement après avoir cliqué sur "OK", juste avant la création du fichier de contrôle PEST (*.pst) ou immédiatement avant le lancement de PEST. Une fois interrompue, une seconde fenêtre s'ouvrira, permettant de reprendre l'exécution de OptiMHYSER1.2 après avoir effectué les modifications désirées ou, tout simplement de terminer son exécution à ce moment.

NOTE : S.V.P ne pas modifier le nombre de lignes sur cette feuille. Il est très important que la première donnée d'observation de chaque colonne soit inscrite sur la ligne no. 16. Merci.

Élévation de la surface libre	Aire d'écoulement	Vitesse d'écoulement	Accumulation des dépôts (poids)	Accumulation des dépôts (volume)	Niveau du talweg	Profil de section X-Y
ELEVSF	*RECOUL*	*VECOUL*	*ACCDEP_M*	*ACCDEP_V*	*THALWG*	*PROFXY*

OptiMHYSER1.2

Observation / Template /

Figure 3.5 – Page d'accueil du classeur *Microsoft Excel* auquel s'intègre le logiciel OptiMHYSER.

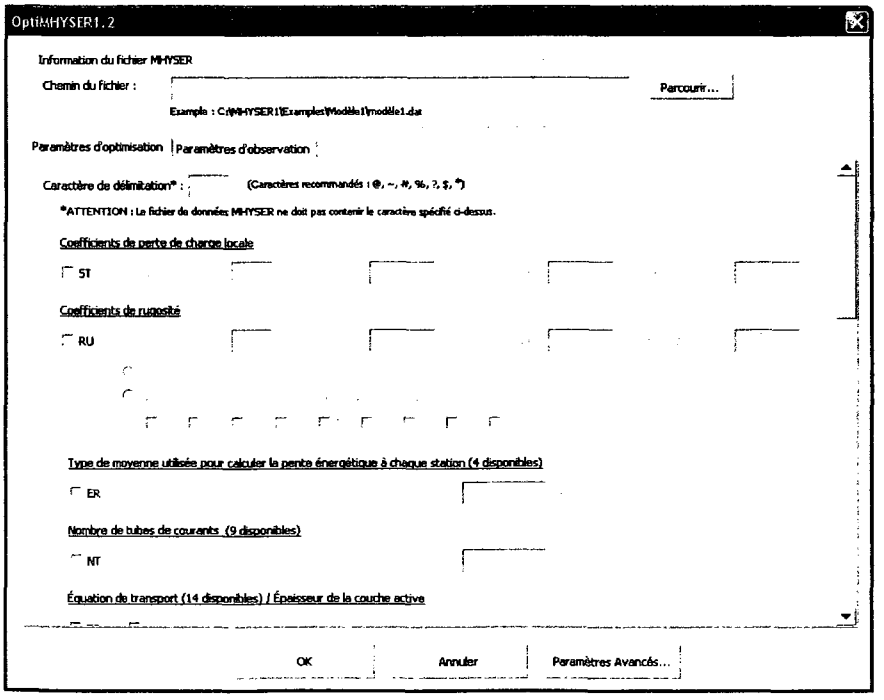
3.4.2 Formulaires de saisies

Le logiciel est lancé en appuyant sur le bouton « OptiMHYSER1.2 » et il interagit avec l'usager principalement par l'entremise de formulaires de saisies. Un premier formulaire (figure 3.6) permet de spécifier le chemin vers le fichier de données du modèle, de choisir un caractère de délimitation et d'activer les paramètres

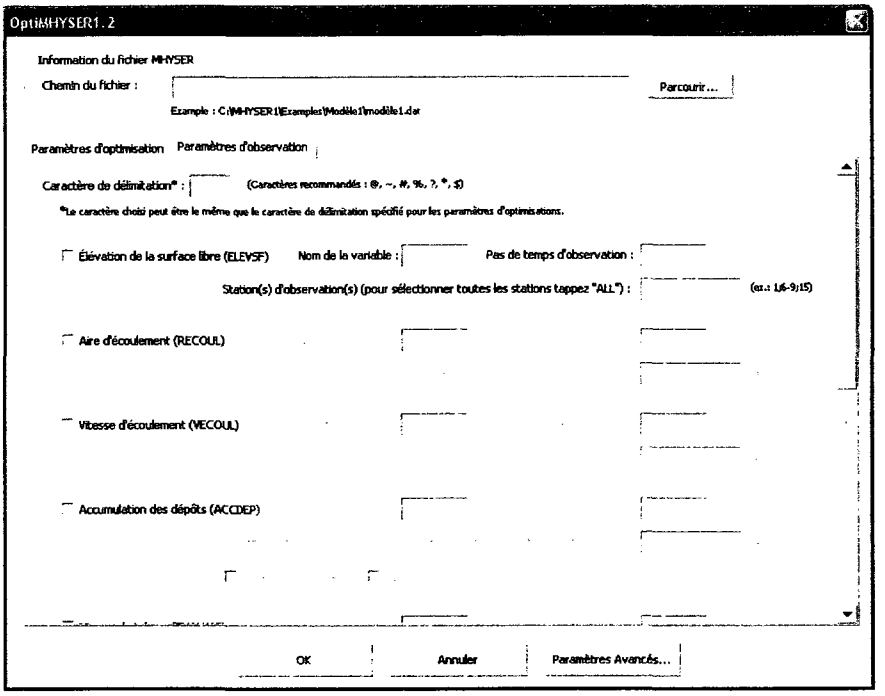
d'optimisation et d'observation désirés. Le caractère de délimitation est utilisé par PEST pour cibler l'emplacement des paramètres dans les fichiers d'entrée et de sortie du modèle.

Les paramètres d'optimisation sont identifiés par un court titre portant le même nom que le paramètre MHYSER auquel se rattache l'information. Les paramètres continus nécessitent tous un nom de variable, une valeur initiale ainsi qu'une limite inférieure et supérieure pour cette valeur. Les paramètres discontinus ne requièrent quant à eux qu'une sélection chiffrée, identifiant les combinaisons devant être mises à l'essai.

Les paramètres d'observation possèdent la même identification que celle inscrite sur la page d'accueil du classeur *Excel*. Chacun d'entre eux nécessite l'inscription d'un nom de variable ainsi que le pas de temps et les sections auxquels sont associées les données d'observation désirées. La liaison entre les sections du modèle et les données d'observation est effectuée à l'aide d'une sélection chiffrée semblable à celle utilisée pour les paramètres d'optimisation discontinus.



(a)

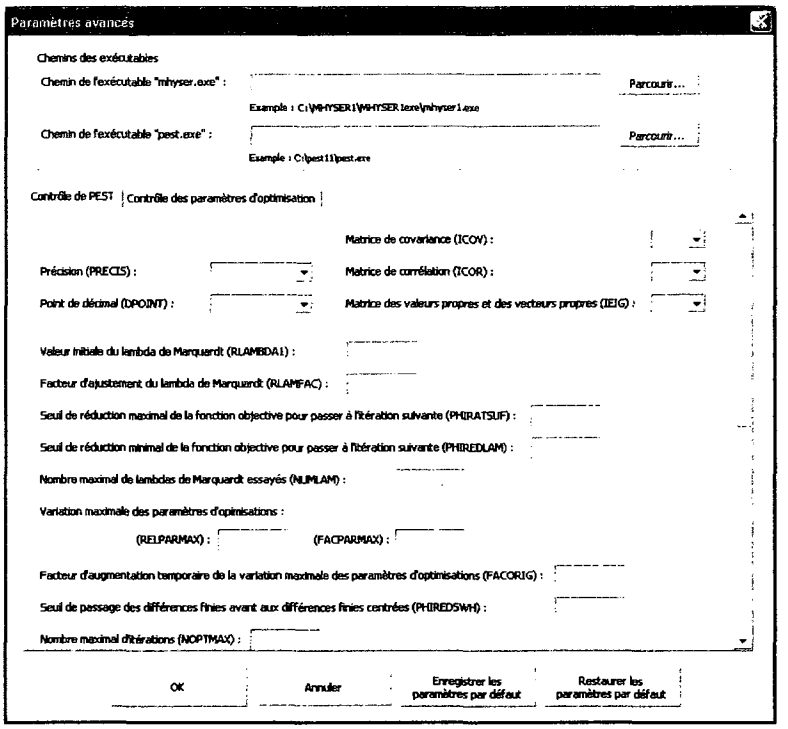


(b)

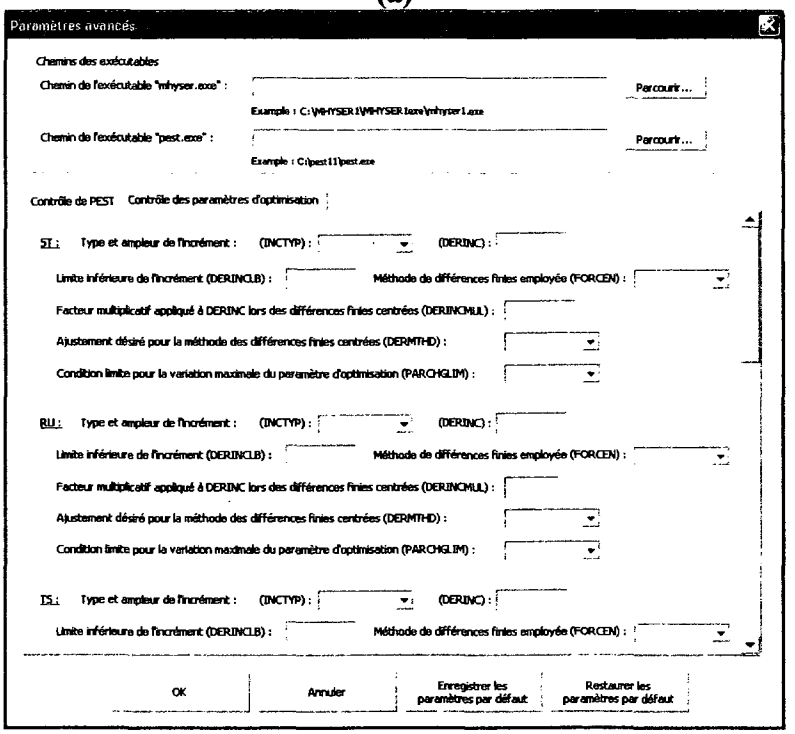
Figure 3.6 – Formulaire de saisie principal du logiciel OptiMHYSER : (a) onglet « Paramètres d'optimisation », (b) onglet « Paramètres d'observation ».

Le deuxième formulaire de saisie (figure 3.7) permet de spécifier le chemin vers les fichiers exécutables de PEST et de MHYSER et présente l'information d'usage relative aux paramètres de contrôle PEST. Le premier onglet contient un regroupement des paramètres de configuration généraux du logiciel. Il inclut notamment le degré de précision, la valeur initiale du lambda de Marquardt, les limites de variation de la fonction objective, les critères d'arrêt et quelques paramètres supplémentaires nécessaires au bon fonctionnement de PEST.

Le deuxième onglet contient quant à lui les paramètres de contrôle spécifiques aux paramètres d'optimisation d'OptiMHYSER. Ceux-ci contrôlent principalement les opérations relatives au calcul des dérivées partielles; à savoir : le type, la grandeur et la limite minimale de l'incrément ajouté aux paramètres, la méthode aux différences finies utilisée ainsi que certains paramètres supplémentaires exigés lorsque les différences finies centrées sont choisies.



(a)



(b)

Figure 3.7 – Formulaire de saisie pour les paramètres avancés du logiciel OptiMHYSER : (a) onglet « Contrôle de PEST », (b) onglet « Contrôle des paramètres d'optimisation ».

3.4.3 Organigramme de programmation

La figure 3.8 présente l'organigramme de programmation de OptiMHYSER. Avant d'arriver aux algorithmes d'optimisation décrits précédemment, le logiciel doit initialiser le processus de calage et s'assurer qu'il est bien configuré.

D'abord, après avoir enregistré l'information inscrite sur les formulaires de saisies, OptiMHYSER vérifie s'il existe un fichier de récupération pour le fichier de données du modèle. S'il n'en existe aucun, le logiciel peut en créer un automatiquement. Dans la mesure où des calages successifs utilisant différentes configurations de paramètres d'optimisation sont requis, le fichier de récupération permet de restaurer le modèle sous son format original avant chaque opération. Lorsqu'un tel fichier est présent, OptiMHYSER offre la possibilité d'effectuer la restauration de façon automatique.

Le fichier de données du modèle est ensuite importé sur la feuille « Template » du classeur Excel. Ceci facilite l'identification des paramètres de calage et l'attribution des noms de variables. Cette feuille est aussi utilisée lors de la création du fichier gabarit principal (*.*tpl*). Pour certains paramètres d'optimisation, OptiMHYSER offre la possibilité d'inclure au processus de calage les fichiers de données liés aux sources tributaires de la rivière. Le logiciel se sert de la feuille « Template » pour obtenir le nom de ces fichiers et effectuer les modifications nécessaires afin de les transformer en fichiers gabarits secondaires.

OptiMHYSER génère ensuite les fichiers d'instructions (*.*ins*) associés aux paramètres d'observation sélectionnés et le fichier de contrôle PEST (*.*pst*). Les données d'observation désirées, inscrites sur la feuille « Observation » du classeur Excel, sont intégrées automatiquement au fichier de contrôle.

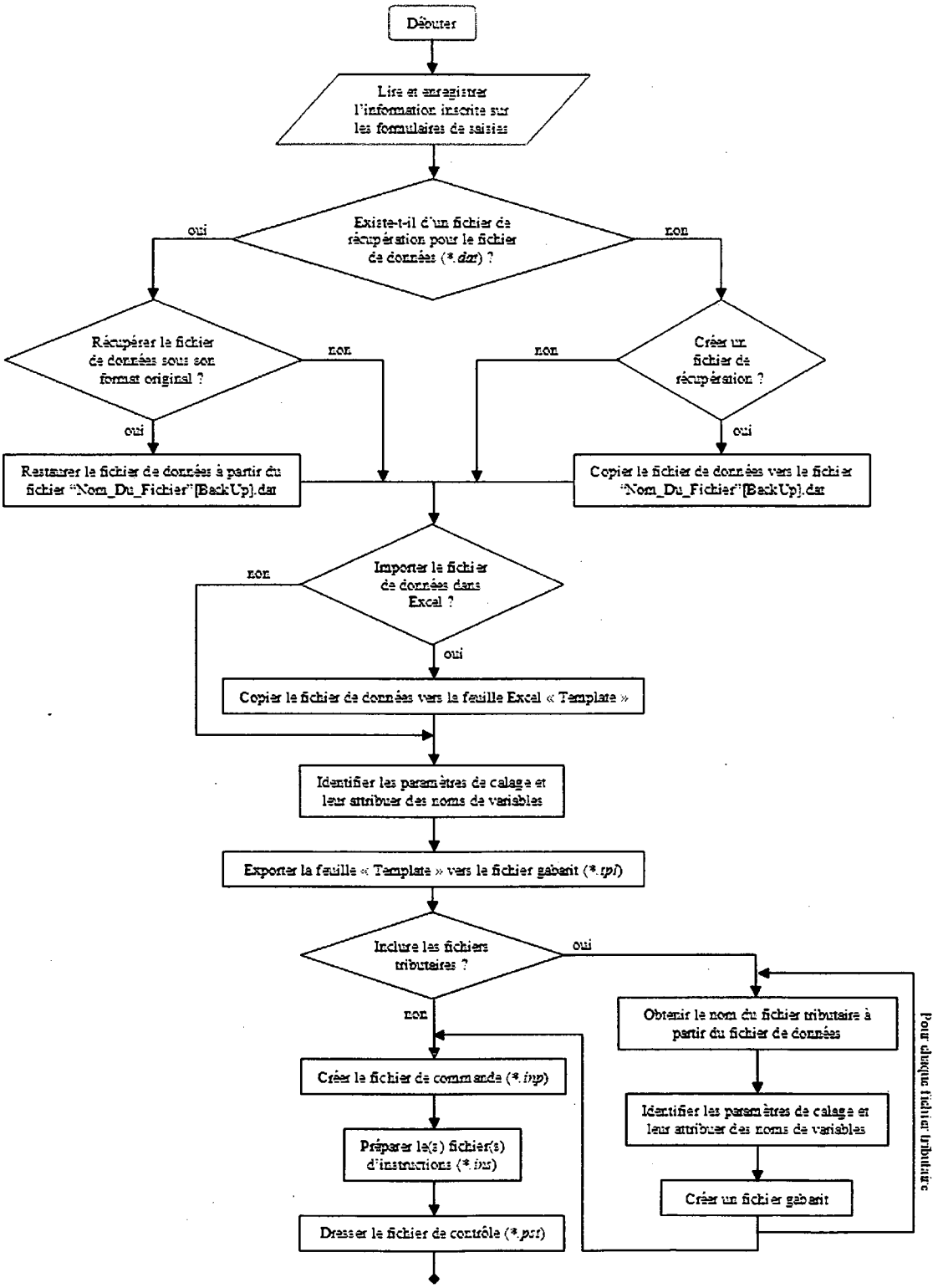


Figure 3.8 – Organigramme de programmation du logiciel OptiMHYSER

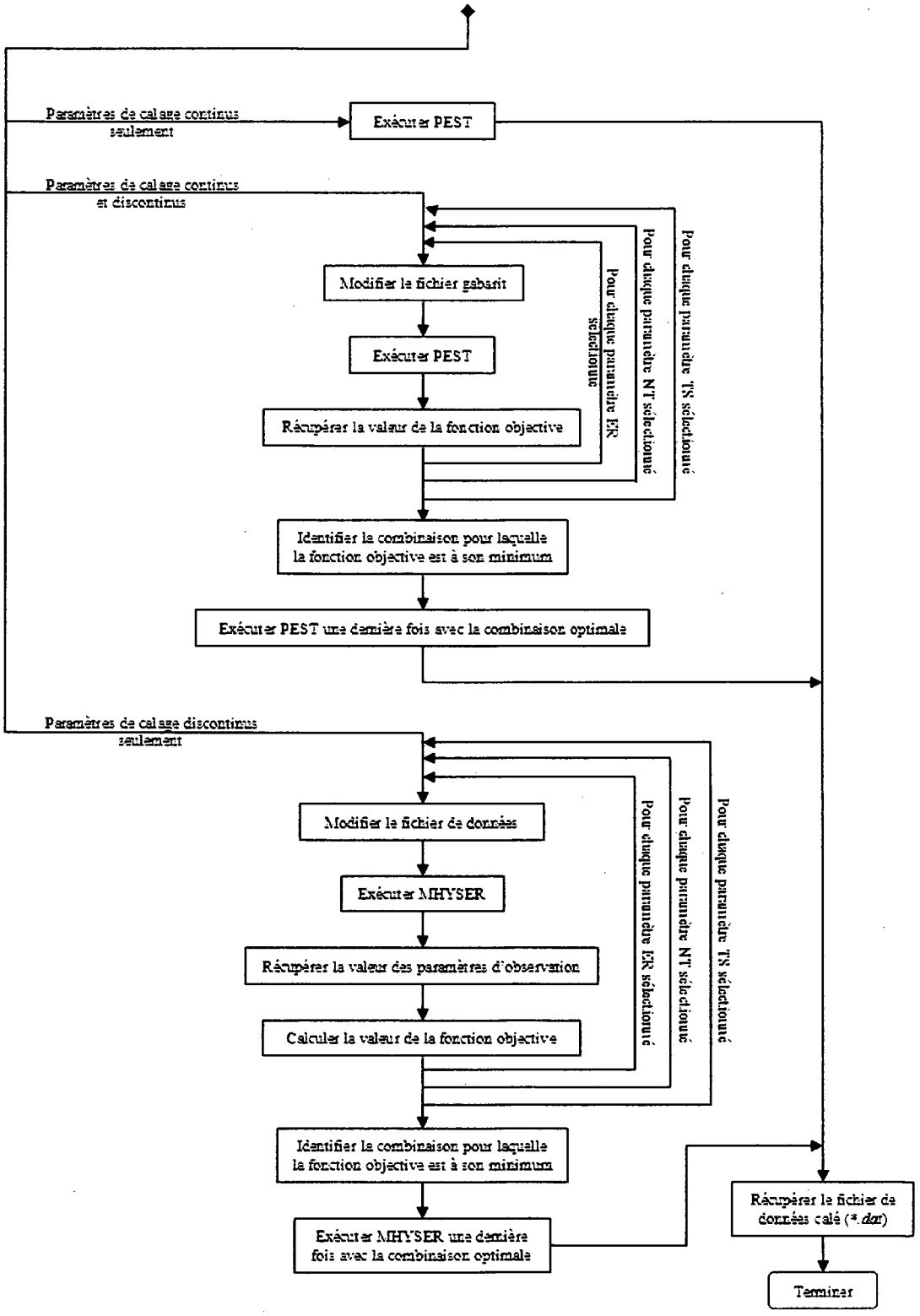


Figure 3.8 – Organigramme de programmation du logiciel OptiMHYSER (suite)

CHAPITRE 4 – Validation et application

L'efficacité d'OptiMHYSER est évaluée progressivement au cours des étapes de validation et d'application du logiciel. La validation est effectuée à l'aide de deux modèles simples tirés du manuel d'utilisateur de GSTARS3.0 (Yang et Simões, 2002) tandis que l'application fait usage d'un modèle élaboré lors d'une étude sur la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Romaine (GENIVAR, 2004 & 2006). Ce chapitre présente les résultats des différentes analyses effectuées.

4.1 Validation

Les modèles utilisés lors de la validation schématisent deux canaux prismatiques trapézoïdaux. Le premier canal possède un fond fixe et le second un fond mobile. Une première simulation MHYSER permet d'établir le comportement de base de chacun. Leurs paramètres d'optimisation sont ensuite modifiés et OptiMHYSER est appelé à effectuer le calage, en utilisant l'information provenant du comportement de base comme données d'observation désirées. Il s'agit alors de vérifier si le logiciel est en mesure de retrouver la configuration initiale des modèles.

4.1.1 Canal trapézoïdal à fond fixe

Le premier modèle permet d'effectuer rapidement le calage de la ligne d'eau. Les coefficients de Manning sont choisis comme paramètres d'optimisation et l'élévation de la surface libre comme paramètre d'observation. Le comportement de base du modèle est établi en utilisant un coefficient de Manning constant de 0.020 pour toutes les sections. Deux analyses sont ensuite effectuées : une première en réduisant les coefficients initiaux de moitié ($n_{initiaux} = 0.010$) et une seconde en les doublant ($n_{initiaux} = 0.040$). L'objectif est d'observer si la valeur initiale donnée aux paramètres d'optimisation a un effet sur les résultats du calage. Les limites inférieures et

supérieures des paramètres sont fixées respectivement à n_{inf} = 0.005 et n_{sup} = 0.050. Elles sont gardées constantes pour les deux analyses.

Les caractéristiques importantes du canal sont résumées au tableau 4.1 (Yang et Simões, 2002). Seule la ligne d'eau est modélisée. Un régime d'écoulement mixte est observé (subcritique → supercritique → subcritique) et un ressaut hydraulique se forme environ à mi-longueur du canal.

Tableau 4.1 – Caractéristiques du canal trapézoïdal à fond fixe.

Propriétés du canal	
Longueur, L	1 000 m
Pente longitudinale, J_f	variable (voir figure 4.1)
Débit, Q	20 m^3/s
Nombre de sections, N	21 également espacées de 50 m
Propriétés des sections transversales	
Largeur de la base, b	10 m
Pente transversale, 1 : m	1
Coefficients de Manning, n	0.020 pour toutes les sections

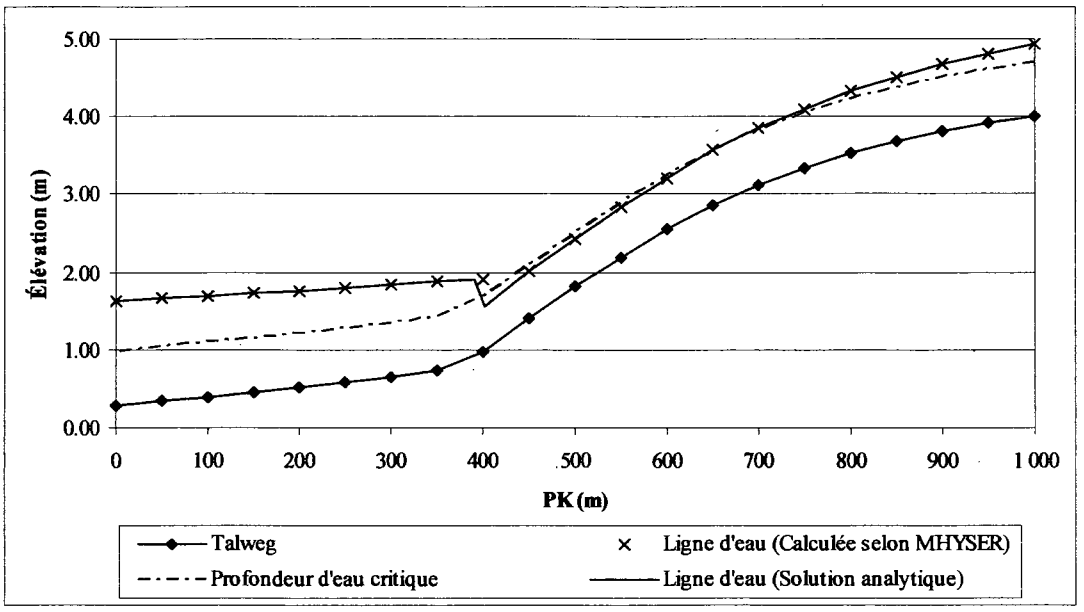


Figure 4.1 – Comportement de base du modèle décrit au tableau 4.1.

Les résultats des analyses sont très satisfaisants. Dans les deux cas, l'optimisation est effectuée en moins d'une minute et une précision millimétrique est atteinte pour les élévations finales de la surface libre. Il est possible de constater cependant que la qualité de l'estimation initiale des paramètres d'optimisation influence considérablement le temps de calcul et la précision du calage. Une précision accrue se fait au dépend d'un temps de calcul plus élevé. Le tableau 4.2 présente un résumé des résultats de cette première validation, et les tableaux 4.3 et 4.4 présentent les valeurs finales atteintes pour les paramètres d'optimisation et le paaramètres d'observation.

Un ajustement des paramètres de contrôle PEST a dû être effectué lors de la deuxième analyse pour arriver à résultats comparables à ceux de la première. Il a été nécessaire d'activer la méthode aux différences finies centrées pour le calcul des dérivées partielles. Malgré cela, l'écart résiduel maximal observé entre l'élévation de la surface libre calculée et l'élévation de la surface libre désirée demeure plus du double.

Tableau 4.2 – Résultats d'analyse pour le modèle du canal trapézoïdal à fond fixe.

	1ère analyse ($n_{initiaux} = 0.010$)	**2e analyse** ($n_{initiaux} = 0.040$)
Temps de calcul (Intel ® Core ™ 2 Quad CPU Q9450 @ 2.66 GHz, 4.0 GB RAM)	25 secondes	55 secondes
Nombre de lancements MHYSER	241	535
Coefficients de Manning		
Écart minimum	0.0002	0.0002
Écart maximum	0.0021	0.0014
Écart moyen	0.0008	0.0006
Élévations de la surface libre		
Écart minimum (mm)	0.00	0.00
Écart maximum (mm)	0.18	0.37
Écart moyen (mm)	0.06	0.06

Tableau 4.3 – Résultats des analyses effectuées avec le modèle du canal trapézoïdal à fond fixe : Coefficients de Manning désirées et calculées.

Sections		Coefficients de Manning désirés	Coefficients de Manning calculés ($n_{initiaux} = 0.010$)	Écart	Coefficients de Manning calculés ($n_{initiaux} = 0.040$)	Écart
No.	PK					
1	1.00	0.0200	0.0179	-0.0021	0.0205	0.0005
2	0.95	0.0200	0.0217	0.0017	0.0196	-0.0004
3	0.90	0.0200	0.0184	-0.0016	0.0204	0.0004
4	0.85	0.0200	0.0213	0.0013	0.0197	-0.0003
5	0.80	0.0200	0.0188	-0.0012	0.0203	0.0003
6	0.75	0.0200	0.0209	0.0009	0.0198	-0.0003
7	0.70	0.0200	0.0191	-0.0009	0.0202	0.0002
8	0.65	0.0200	0.0209	0.0009	0.0198	-0.0002
9	0.60	0.0200	0.0193	-0.0007	0.0202	0.0002
10	0.55	0.0200	0.0206	0.0006	0.0198	-0.0002
11	0.50	0.0200	0.0194	-0.0006	0.0202	0.0002
12	0.45	0.0200	0.0205	0.0005	0.0199	-0.0002
13	0.40	0.0200	0.0198	-0.0002	0.0204	0.0004
14	0.35	0.0200	0.0204	0.0004	0.0192	-0.0008
15	0.30	0.0200	0.0196	-0.0004	0.0209	0.0009
16	0.25	0.0200	0.0204	0.0004	0.0190	-0.0010
17	0.20	0.0200	0.0195	-0.0005	0.0211	0.0011
18	0.15	0.0200	0.0205	0.0005	0.0188	-0.0012
19	0.10	0.0200	0.0194	-0.0006	0.0212	0.0012
20	0.05	0.0200	0.0206	0.0006	0.0186	-0.0014
21	0.00	0.0200	0.0194	-0.0007	0.0214	0.0014
				0.0002	**Minimum**	0.0002
				0.0021	**Maximum**	0.0014
				0.0008	**Moyenne**	0.0006

Tableau 4.4 – Résultats des analyses effectuées avec le modèle du canal trapézoïdal à fond fixe : Élévations de la surface libre désirées et calculées.

Sections		Élévations de la surface libre désirées (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) ($n_{initiaux} = 0.010$)	Écart (m)	Élévation de la surface libre calculées (m) ($n_{initiaux} = 0.040$)	Écart (m)
No.	PK					
1	1.00	4.939 31	4.939 28	-0.000 03	4.939 19	-0.000 12
2	0.95	4.814 80	4.814 83	0.000 03	4.814 83	0.000 03
3	0.90	4.673 40	4.673 46	0.000 06	4.673 43	0.000 03
4	0.85	4.509 27	4.509 30	0.000 03	4.509 39	0.000 12
5	0.80	4.330 38	4.330 19	-0.000 18	4.330 01	-0.000 37
6	0.75	4.099 27	4.099 46	0.000 18	4.099 46	0.000 18
7	0.70	3.858 78	3.858 78	0.000 00	3.858 78	0.000 00
8	0.65	3.563 28	3.563 37	0.000 09	3.563 19	-0.000 09
9	0.60	3.208 64	3.208 55	-0.000 09	3.208 73	0.000 09
10	0.55	2.834 03	2.834 04	0.000 01	2.833 93	-0.000 11
11	0.50	2.431 21	2.431 31	0.000 10	2.431 19	-0.000 02
12	0.45	2.013 44	2.013 26	-0.000 18	2.013 58	0.000 14
13	0.40	1.898 87	1.898 81	-0.000 07	1.898 84	-0.000 03
14	0.35	1.872 46	1.872 41	-0.000 05	1.872 47	0.000 01
15	0.30	1.831 65	1.831 61	-0.000 04	1.831 65	0.000 01
16	0.25	1.792 42	1.792 39	-0.000 03	1.792 42	0.000 00
17	0.20	1.755 59	1.755 57	-0.000 02	1.755 60	0.000 00
18	0.15	1.721 12	1.721 10	-0.000 02	1.721 12	0.000 00
19	0.10	1.689 00	1.688 98	-0.000 02	1.689 00	0.000 00
20	0.05	1.659 10	1.659 09	-0.000 01	1.659 10	0.000 00
21	0.00	1.631 39	1.631 39	0.000 00	1.631 39	0.000 00
				0.000 00	**Minimum**	0.000 00
				0.000 18	**Maximum**	0.000 37
				0.000 06	**Moyenne**	0.000 06

4.1.2 Canal trapézoïdal à fond mobile

Le deuxième modèle permet de valider les composantes associées au transport solide d'OptiMHYSER. L'analyse effectuée utilise l'équation de transport et le nombre de tubes de courant comme paramètres d'optimisation. Au total, 13 équations sont mises à l'essai avec un nombre de tubes variant entre 1 et 5. L'accumulation des dépôts (poids) est désignée comme le paramètre d'observation. Le calage fait intervenir la fonction objective décrite à la section 3.3.2, lorsque seuls des paramètres d'optimisation discontinus sont sélectionnés, pour déterminer la combinaison optimale.

Le comportement de base du modèle est établi selon les caractéristiques fournies au tableau 4.5, avec l'équation de transport révisée de Ackers et White (1990) et trois tubes de courants (Yang et Simões, 2002).

Tableau 4.5 – Caractéristiques du canal trapézoïdal à fond mobile.

Propriétés du canal	
Longueur, L	1 524 m
Pente longitudinale, J_f	0.0001 m/m
Débit liquide, Q	84.95 m^3/s
Débit solide entrant, $Q_{s,entrant}$	86.23 tonnes/jour (voir équation 4.1)
Nombre de sections, N	21 également espacées de 76.2 m
Diamètre médian des granulats, d_{50}	0.447 mm
Température de l'eau, T	10 °C
Propriétés des sections transversales	
Largeur de la base, b	61.0 m
Pente transversale, 1 : m	2

$$Q_{solide}[tonnes/jour] = 1.95\left(Q_{liquide}[m^3/s]\right)^{0.853} \qquad \text{Équation 4.1}$$

Le tableau 4.6 présente l'accumulation des dépôts désirée et le tableau 4.7, les résultats obtenus pour l'ensemble des combinaisons identifiées entre l'équation de transport et le nombre de tubes de courant. Ces résultats représentent la valeur de la fonction objective associée à chaque combinaison, soit la somme des écarts élevés au carré entre l'accumulation des dépôts calculée et l'accumulation des dépôts désirée pour chaque section. Il est possible de constater qu'une seule combinaison mène à une fonction

objective nulle, soit celle de l'équation de transport révisée de Ackers et White (1990) avec trois tubes de courant. OptiMHYSER détermine correctement que ceci est la configuration optimale du modèle. Le temps de calcul est considérablement plus long que celui observé avec le modèle à fond fixe, car la modélisation de la phase solide est beaucoup plus complexe que celle de la phase liquide.

Tableau 4.6 – Accumulation des dépôts désirés pour le modèle du canal trapézoïdal à fond mobile.

Sections		Accumulations des dépôts désirés (tonnes/jour)
No.	PK	
1	1.524	13.85
2	1.448	-4.62
3	1.372	2.74
4	1.295	1.20
5	1.219	0.69
6	1.143	0.39
7	1.067	0.28
8	0.991	0.24
9	0.914	0.23
10	0.838	0.23
11	0.762	0.23
12	0.686	0.23
13	0.610	0.24
14	0.533	0.24
15	0.457	0.24
16	0.381	0.24
17	0.305	0.25
18	0.229	0.25
19	0.152	0.25
20	0.076	0.26
21	0.000	0.16

Tableau 4.7 – Résultats de la 1ère analyse avec le modèle du canal trapézoïdal à fond mobile.

Temps de calcul : 36 minutes (Intel ® Core ™ 2 Quad CPU Q9450 @ 2.66 GHz, 4.0 GB RAM)					
Nombre de lancements MHYSER : 66					
Équation de transport	**Fonction objective [tonnes]^2**				
	Nombre de tubes de courants				
	1	2	3	4	5
1 – Meyer-Peter	3 815 060	3 815 060	3 832 149	3 845 167	3 860 330
2 – Laursen	10 601 254	10 601 254	10 619 236	10 630 440	10 647 530
3 – Toffaleti	5 358 452	5 358 452	5 358 829	5 354 703	5 357 773
4 – Engelund et Hansen	11 591 624	11 591 605	11 678 239	11 687 349	11 754 142
5 – Ackers et White (1973)	674	674	566	705	625
6 – Yang, sable (1973) et gravier (1984)	374 625	374 625	367 360	360 080	354 165
7 – Yang, sable (1979) et gravier (1984)	1 242 084	1 242 084	1 226 250	1 208 133	1 194 846
8 – Parker	148 003 625	148 004 957	148 385 399	148 265 426	148 773 175
9 – Yang modifiée (1996)	2 452 597	2 452 600	2 433 037	2 407 247	2 390 741
10 – Ackers et White modifiée (1990)	209	209	**0**	273	144
11 – Duboys	86 637 498	86 638 206	87 173 999	87 129 600	87 559 178
12 – Laursen modifiée	10 130 710	10 130 721	10 140 070	10 138 677	10 148 231
13 – Ashida et Michiue	17 381 795	17 382 330	39 523 853	22 122 053	21 017 416

Même à l'aide d'une procédure conviviale automatisée, le calage de modèles numériques demeure un processus qui exige beaucoup de jugement et qui doit être surveillé de près. Le choix des paramètres d'optimisation, de leur estimation initiale et de leurs bornes de variation ne peut se faire au hasard. Une seconde analyse effectuée avec le modèle à fond mobile illustre bien cette mise en garde. Cette fois-ci, le débit solide entrant est choisi comme paramètre d'optimisation. L'objectif vise à retrouver les valeurs initiales des coefficients α et β de la courbe de tarage décrite par l'équation 4.1. Les valeurs de départ inscrites dans OptiMHYSER sont $\alpha = 1.5$ et $\beta = 0.5$. Les limites inférieures et supérieures des paramètres sont fixées respectivement à $\alpha_{inf} = 1.25$, $\alpha_{inf} = 2.50$, $\beta_{inf} = 0.40$ et $\beta_{sup} = 1.25$. L'accumulation des dépôts (poids) est conservée comme paramètre d'observation. Les tableaux 4.8 et 4.9 présentent les résultats de l'analyse.

OptiMHYSER arrive rapidement à un ajustement plus que satisfaisant pour l'accumulation des dépôts observée à chaque section. De plus, le débit solide entrant calculé équivaut au débit solide entrant désiré. Toutefois, les coefficients de la courbe de tarage sont très loin des valeurs ciblées. Avec un peu de recul, il est possible de constater qu'il s'agit ici d'un problème mathématiquement mal posé, où il n'existe qu'une équation pour deux inconnus. Un deuxième couple débit liquide/débit solide serait nécessaire pour établir une solution unique au système. La structure d'OptiMHYSER exige cependant que les données d'observation désirées ne soient liées qu'à un seul pas de temps, et donc à un seul débit liquide. Il est donc impossible d'utiliser le logiciel pour résoudre ce problème.

Tableau 4.8 – Résultats de la 2e analyse avec le modèle du canal trapézoïdal à fond mobile.

Temps de calcul : < 10 secondes (Intel ® Core ™ 2 Quad CPU Q9450 @ 2.66 GHz, 4.0 GB RAM)			
Nombre de lancements MHYSER : 20			
$Q_{solide} = \alpha(Q_{liquide})^{\beta}$			
	α	β	**Débit solide entrant (tonnes/jour)** ($Q_{liquide}$ = 84.95 m^3/s)
Coefficients désirés	1.95	0.853	86.23
Coefficients calculés	1.56	0.903	86.23

Tableau 4.9 – Résultats de l'analyse effectuée avec le modèle du canal trapézoïdal à fond mobile (calage des coefficients de la courbe de tarage du débit solide entrant) : ajustement final de l'accumulation des dépôts (poids).

Sections		Accumulations des dépôts désirés (tonnes/jour)	Accumulations des dépôts calculés (tonnes/jour)	Écart (tonnes/jour)
No.	PK			
1	1.524	13.85	13.85	0.00
2	1.448	-4.62	-4.62	0.00
3	1.372	2.74	2.74	0.00
4	1.295	1.20	1.20	0.00
5	1.219	0.69	0.69	0.00
6	1.143	0.39	0.39	0.00
7	1.067	0.28	0.28	0.00
8	0.991	0.24	0.24	0.00
9	0.914	0.23	0.23	0.00
10	0.838	0.23	0.23	0.00
11	0.762	0.23	0.23	0.00
12	0.686	0.23	0.23	0.00
13	0.610	0.24	0.24	0.00
14	0.533	0.24	0.24	0.00
15	0.457	0.24	0.24	0.00
16	0.381	0.24	0.24	0.00
17	0.305	0.25	0.25	0.00
18	0.229	0.25	0.25	0.00
19	0.152	0.25	0.25	0.00
20	0.076	0.26	0.26	0.00
21	0.000	0.16	0.16	0.00

4.2 Application

L'étape de l'application fait usage d'un modèle élaboré lors d'une étude sur la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Romaine (GENIVAR, 2004 & 2006). Au moment de l'étude, le modèle a été calé manuellement. Il est maintenant soumis à la procédure automatisée développée dans le cadre de ce projet de maîtrise. Cette section fait un résumé de la méthodologie employée et présente une comparaison des résultats obtenus à la suite des simulations effectuées avec le modèle original et le modèle nouvellement calé. Il est important de préciser que l'analyse effectuée ne vise pas à reproduire l'étude réalisée par GENIVAR, mais porte plutôt sur l'efficacité du calage automatisé et de la fiabilité des résultats.

4.2.1 Description du modèle

Le tronçon modélisé se situe entre les points kilométriques (PK) 0.70 et 51.75 de la rivière Romaine. En amont se trouve la Grande Chute (PK52.5) et en aval les rapides à Brillant (PK0.70). La rivière se jette dans le fleuve St-Laurent à environ 15 km à l'ouest de Havre-Saint-Pierre, sur la Côte-Nord (voir figure 4.2). La bathymétrie du cours d'eau est schématisée à l'aide de 143 sections. L'hydrogramme d'entrée du modèle correspond aux débits relevés sur la rivière en 2003, au PK3.80. La discrétisation de cet hydrogramme mène à l'utilisation d'un pas de temps journalier pour la modélisation de la phase liquide. La relation entre le niveau et le débit au PK0.70 est décrite par l'équation 4.2. Finalement, le rapport observé entre le débit solide et le débit liquide au PK51.75 permet d'estimer l'apport sédimentaire au modèle (équation 4.3).

$$Niveau[m] = 0.6598\left(Q_{liquide}[m^3/s]\right)^{0.3116} + 100 \qquad \text{Équation 4.2}$$

$$Q_{solide}[tonnes/jour] = \left(6.0\times10^{-6}\right)\left(Q_{liquide}[m^3/s]\right)^{2.6} \qquad \text{Équation 4.3}$$

La granulométrie du lit de la rivière est composée principalement de sable et de gravier, mais certaines sections présentent des obstacles rocheux importants et sont qualifiées de zones non érodables. Les particules fines de taille inférieure à 125 µm sont négligées. Ceci inclut donc les sédiments cohésifs. Un pas de temps horaire est utilisé pour la modélisation du transport solide.

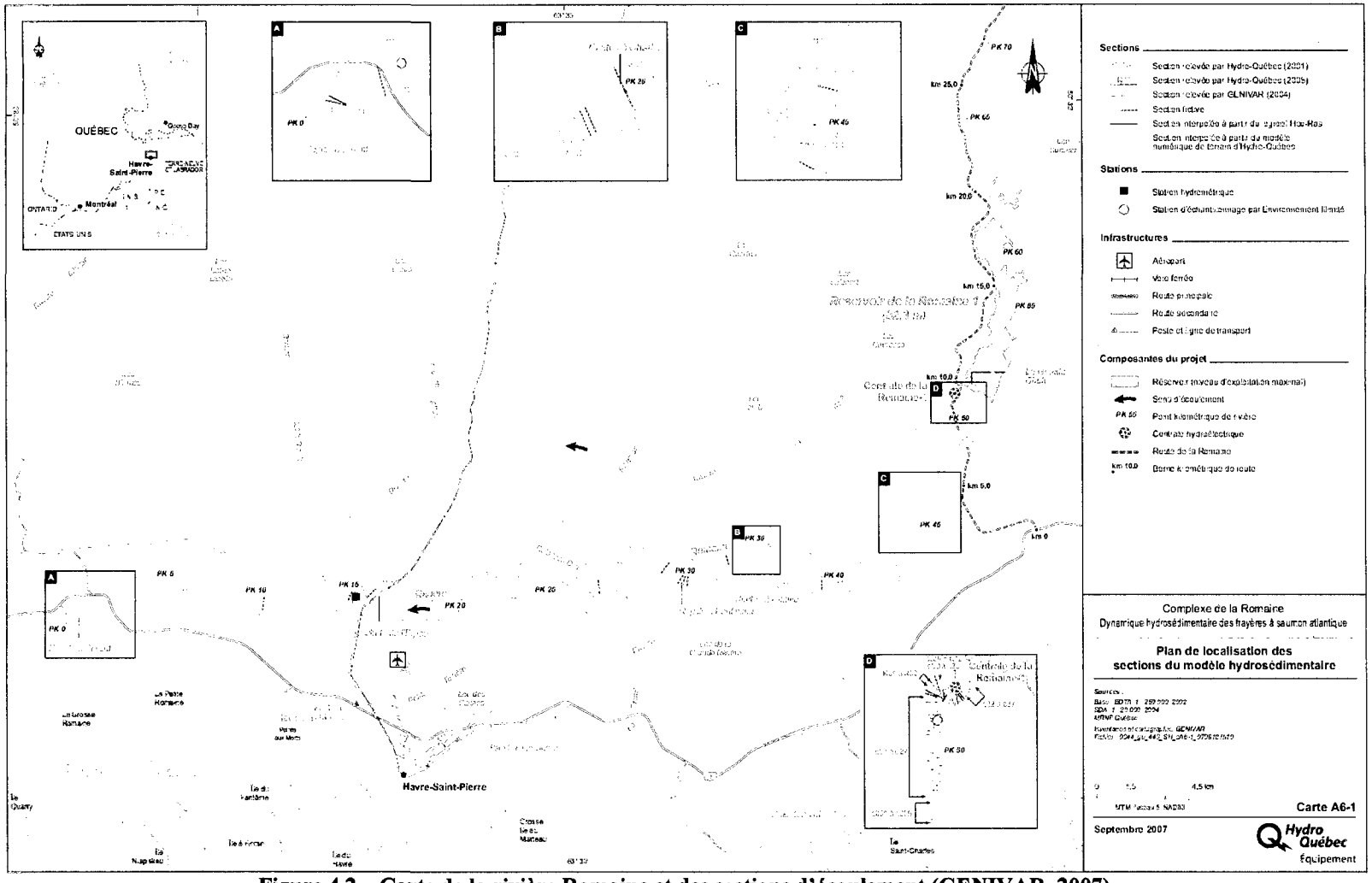


Figure 4.2 – Carte de la rivière Romaine et des sections d'écoulement (GENIVAR, 2007).

4.2.2 Calage du modèle

Lors de l'étude originale, deux modèles ont été créés : un pour les débits faibles et moyens de la rivière et un pour les débits forts. Le calage et la validation des modèles ont été effectués suivant les données d'observation recueillies pour chaque condition d'hydraulicité en 2001 et en 2003 (GENIVAR, 2004). En ce qui concerne l'application en cours, seul le modèle pour les débits faibles et moyens est utilisé. L'étude réalisée par les ingénieurs de chez GENIVAR comprend déjà une analyse de la qualité des données. Il n'ait donc pas nécessaire de refaire ce prétraitement pour l'étude en cours.

Une version simplifiée permet d'abord d'effectuer un ajustement rapide de la ligne d'eau. Les coefficients de Manning sont désignés comme les paramètres d'optimisation et l'élévation de la surface libre comme le paramètre d'observation. Une fois le calage terminé, le modèle est restitué à sa forme complète en conservant les valeurs optimisées des coefficients de Manning. L'ajustement du débit solide est ensuite effectué en utilisant différentes équations de transport et un nombre variable de tubes de courant.

4.2.2.1 Ligne d'eau

Sous sa version simplifiée, le modèle ne possède qu'un seul pas de temps pour la phase liquide et les composantes associées au transport solide sont toutes négligées. Un débit moyen de 390 m^3/s est imposé. Les coefficients de Manning sont choisis comme les paramètres d'optimisation et l'élévation de la surface libre comme le paramètre d'observation. L'utilisation de PEST exige que les données d'observation désirées soient liées directement aux sections inscrites dans le modèle. Or, les points de mesures où a été relevée la ligne d'eau pendant la période du 11 et 12 juin 2001 (GENIVAR, 2004) ne coïncident pas tous avec les PK des sections. Les données d'observation désirées sont donc estimées à partir d'une interpolation linéaire entre ces points. Les tronçons en amont du premier point de mesure, en aval du dernier point et aux endroits présentant des discontinuités majeurs dans la surface libre sont négligés. Au total, 433 paramètres d'optimisation sont identifiés pour 125 données d'observation désirées. Les

tableaux 4.10 et 4.11 présentent les données d'observation originales, provenant de la campagne de relevés, et les données d'observation finales, issus de l'interpolation linaire entre les données originales.

Tableau 4.10 – Élévations de la surface libre désirées et calculées issues des modèles original et optimisé pour débits faibles et moyens de la rivière Romaine (Q = 390 m3/s).

PK	Élévations de la surface libre désirées[1] (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle optimisé)	Écart (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle original)	Écart (m)
51.54	119.970	120.026	0.056	119.972	0.002
49.84	119.460	119.533	0.073	119.440	-0.020
48.72	119.270	119.320	0.050	119.336	0.066
47.94	119.180	119.205	0.025	119.207	0.027
45.77	119.000	119.001	0.001	118.967	-0.033
44.68	118.880	118.826	-0.054	118.805	-0.075
43.67	118.640	118.641	0.001	118.601	-0.039
42.75	118.620	118.632	0.012	118.586	-0.034
41.27	118.600	118.592	-0.008	118.534	-0.066
39.96	118.540	118.554	0.014	118.500	-0.040
39.09	118.530	118.534	0.004	118.479	-0.051
38.33	118.520	118.518	-0.002	118.457	-0.063
36.92	118.490	118.489	-0.001	118.435	-0.055
36.00	118.490	118.481	-0.009	118.430	-0.060
34.81	111.540	111.944	0.404	112.123	0.583
34.30	111.500	111.624	0.124	111.616	0.116
33.40	111.450	111.334	-0.116	111.234	-0.216
32.78	111.070	111.167	0.097	111.077	0.007
32.33	110.930	111.048	0.118	111.046	0.116
31.25	110.920	110.747	-0.173	110.999	0.079
30.24	110.280	110.287	0.007	110.508	0.228
29.00	110.240	110.231	-0.009	110.436	0.196
28.08	110.200	110.207	0.007	110.402	0.202
27.58	110.170	110.189	0.019	110.390	0.220
26.47	110.140	110.147	0.007	110.369	0.229
25.99	110.150	110.129	-0.021	110.353	0.203
25.29	110.120	110.103	-0.017	110.316	0.196
23.08	109.990	109.999	0.009	110.196	0.206
22.50	109.950	109.961	0.011	110.172	0.222
21.85	109.900	109.914	0.014	110.146	0.246
20.68	109.780	109.823	0.043	110.102	0.322
17.61	109.660	109.737	0.077	109.996	0.336
16.60	109.640	109.735	0.095	109.979	0.339
16.16	109.620	109.711	0.091	109.951	0.331
15.90	105.840	106.056	0.216	105.582	-0.258
14.48	105.590	105.554	-0.036	105.543	-0.047
14.39	105.490	105.522	0.032	105.540	0.050
13.18	105.470	105.464	-0.006	105.512	0.042
11.28	105.360	105.359	-0.001	105.409	0.049
9.83	105.300	105.298	-0.002	105.345	0.045
8.04	105.190	105.189	-0.001	105.258	0.068
6.72	105.110	105.124	0.014	105.213	0.103
6.06	105.130	105.109	-0.021	105.197	0.067
5.24	105.070	105.079	0.009	105.163	0.093
4.43	105.050	105.046	-0.004	105.124	0.074
3.23	104.970	104.972	0.002	105.049	0.079
2.38	104.970	104.907	-0.063	104.985	0.015
2.00	104.410	104.648	0.238	104.705	0.295
1.25	104.380	104.325	-0.055	104.280	-0.100
0.82	104.380	104.301	-0.079	104.258	-0.122
50 points de mesures			0.001	**Minimum**	0.002
			0.404	**Maximum**	0.583
			0.051	**Moyenne**	0.135

[1] Données tirées de GENIVAR (2004)

Tableau 4.11 – Données d'observation désirées, employées lors du calage du modèle pour débits faibles et moyens de la rivière Romaine ($Q = 390$ m^3/s), et données d'observation calculées finales.

PK	Élévations de la surface libre désirées[1] (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle optimisé)	Écart (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle original)	Écart (m)
51.45	119.943	119.950	0.007	119.902	-0.041
51.36	119.916	119.965	0.049	119.928	0.012
51.35	119.912	119.966	0.054	119.928	0.016
51.33	119.908	119.966	0.058	119.898	-0.010
51.32	119.904	119.966	0.062	119.867	-0.037
51.31	119.900	119.964	0.064	119.837	-0.063
51.29	119.895	119.934	0.039	119.806	-0.089
51.26	119.886	119.935	0.049	119.808	-0.078
51.23	119.877	119.933	0.056	119.805	-0.072
51.21	119.871	119.923	0.052	119.794	-0.077
51.18	119.862	119.878	0.016	119.760	-0.102
51.17	119.859	119.867	0.008	119.730	-0.129
51.15	119.853	119.830	-0.023	119.682	-0.171
51.13	119.847	119.767	-0.080	119.569	-0.278
51.11	119.841	119.784	-0.057	119.572	-0.269
51.10	119.838	119.758	-0.080	119.506	-0.332
51.09	119.835	119.763	-0.072	119.513	-0.322
51.07	119.829	119.793	-0.036	119.573	-0.256
51.06	119.826	119.814	-0.012	119.598	-0.228
51.04	119.820	119.817	-0.003	119.600	-0.220
51.00	119.807	119.806	-0.001	119.588	-0.219
50.95	119.794	119.776	-0.018	119.561	-0.233
50.91	119.781	119.710	-0.071	119.498	-0.283
50.84	119.760	119.658	-0.102	119.503	-0.257
50.79	119.745	119.647	-0.098	119.514	-0.231
50.71	119.721	119.649	-0.072	119.532	-0.189
50.67	119.709	119.651	-0.058	119.534	-0.175
50.60	119.688	119.652	-0.036	119.534	-0.154
50.54	119.670	119.621	-0.049	119.504	-0.166
50.49	119.655	119.618	-0.037	119.501	-0.154
50.43	119.637	119.615	-0.022	119.498	-0.139
50.40	119.628	119.584	-0.044	119.467	-0.161
50.37	119.619	119.577	-0.042	119.459	-0.160
50.35	119.613	119.569	-0.044	119.452	-0.161
50.30	119.598	119.576	-0.022	119.460	-0.138
50.21	119.571	119.576	0.005	119.461	-0.110
50.13	119.547	119.567	0.020	119.454	-0.093
50.06	119.526	119.565	0.039	119.456	-0.070
49.97	119.499	119.556	0.057	119.450	-0.049
49.88	119.472	119.543	0.071	119.445	-0.027
49.78	119.450	119.517	0.067	119.432	-0.018
49.72	119.440	119.523	0.083	119.443	0.003
49.64	119.426	119.519	0.093	119.440	0.014
49.60	119.419	119.519	0.100	119.440	0.021
49.46	119.396	119.512	0.116	119.436	0.040
49.35	119.377	119.503	0.126	119.430	0.053
49.23	119.357	119.420	0.063	119.384	0.027
49.12	119.338	119.359	0.021	119.360	0.022
49.00	119.318	119.351	0.034	119.362	0.044
48.95	119.309	119.350	0.041	119.361	0.052
48.90	119.301	119.326	0.025	119.335	0.034
48.84	119.290	119.310	0.020	119.321	0.031
48.77	119.278	119.320	0.042	119.337	0.059

[1] Données issues d'une interpolation linéaire entre les mesures tirées de GENIVAR (2004)

Tableau 4.11 – Données d'observation désirées, employées lors du calage du modèle pour débits faibles et moyens de la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s), et données d'observation calculées finales (suite).

PK	Élévations de la surface libre désirées (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle optimisé)	Écart (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle original)	Écart (m)
48.70	119.268	119.320	0.052	119.335	0.067
48.66	119.263	119.308	0.045	119.322	0.059
48.65	119.262	119.299	0.037	119.312	0.050
48.59	119.254	119.204	-0.050	119.179	-0.075
48.56	119.252	119.246	-0.006	119.214	-0.038
48.50	119.245	119.247	0.002	119.219	-0.026
48.46	119.240	119.253	0.013	119.223	-0.017
48.20	119.210	119.228	0.018	119.212	0.002
47.40	119.135	119.157	0.022	119.196	0.061
47.05	119.106	119.122	0.016	119.120	0.014
46.63	119.071	119.078	0.007	119.028	-0.043
46.40	119.052	119.065	0.013	119.016	-0.036
46.18	119.034	119.039	0.005	118.989	-0.045
45.90	119.011	119.017	0.006	118.975	-0.036
45.80	119.002	119.003	0.001	118.968	-0.034
45.24	118.942	118.959	0.017	118.953	0.011
45.14	118.931	118.951	0.020	118.939	0.008
44.80	118.893	118.942	0.049	118.936	0.043
44.68	118.880	118.826	-0.054	118.805	-0.075
42.48	118.616	118.629	0.013	118.582	-0.034
41.49	118.603	118.599	-0.004	118.541	-0.062
40.18	118.550	118.559	0.009	118.502	-0.048
39.65	118.537	118.547	0.010	118.497	-0.040
38.50	118.522	118.520	-0.002	118.460	-0.062
38.00	118.513	118.514	0.001	118.451	-0.062
37.00	118.492	118.490	-0.002	118.435	-0.057
36.05	118.490	118.482	-0.008	118.431	-0.059
34.80	111.539	111.672	0.133	111.860	0.321
34.75	111.535	111.634	0.099	111.646	0.111
34.65	111.527	111.625	0.098	111.635	0.108
34.60	111.524	111.627	0.103	111.635	0.111
34.50	111.516	111.629	0.113	111.630	0.114
34.40	111.508	111.625	0.117	111.621	0.113
34.22	111.496	111.624	0.128	111.612	0.116
34.00	111.483	111.609	0.126	111.587	0.104
33.70	111.467	111.618	0.151	111.586	0.119
33.64	111.463	111.609	0.146	111.574	0.111
33.00	111.205	110.876	-0.329	110.667	-0.538
32.85	111.113	111.186	0.073	111.082	-0.031
32.00	110.927	110.961	0.034	111.023	0.096
30.20	110.279	110.295	0.016	110.502	0.223
29.80	110.266	110.287	0.021	110.493	0.227
29.00	110.240	110.231	-0.009	110.436	0.196
28.00	110.195	110.205	0.010	110.399	0.204
27.00	110.154	110.166	0.012	110.377	0.223
26.45	110.140	110.146	0.006	110.369	0.229
26.25	110.145	110.138	-0.007	110.367	0.222
25.00	110.103	110.093	-0.010	110.301	0.198
24.35	110.065	110.059	-0.006	110.256	0.191
22.90	109.978	109.990	0.012	110.188	0.210
21.45	109.869	109.885	0.016	110.130	0.261
20.25	109.763	109.788	0.025	110.087	0.324
18.90	109.710	109.744	0.034	110.035	0.325
17.83	109.664	109.737	0.073	110.000	0.336
16.40	109.631	109.735	0.104	109.976	0.345
14.30	105.489	105.490	0.001	105.538	0.049

Tableau 4.11 – Données d'observation désirées, employées lors du calage du modèle pour débits faibles et moyens de la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s), et données d'observation calculées finales (suite).

PK	Élévations de la surface libre désirées (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle optimisé)	Écart (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle original)	Écart (m)
13.00	105.460	105.460	0.000	105.508	0.048
12.00	105.402	105.409	0.007	105.461	0.059
11.25	105.359	105.357	-0.002	105.407	0.048
10.57	105.331	105.332	0.001	105.380	0.049
9.60	105.286	105.288	0.002	105.334	0.048
8.00	105.188	105.186	-0.002	105.256	0.068
6.75	105.112	105.125	0.013	105.214	0.102
5.82	105.112	105.103	-0.009	105.191	0.079
4.38	105.047	105.044	-0.003	105.122	0.075
3.80	105.008	105.011	0.003	105.079	0.071
3.21	104.970	104.971	0.001	105.048	0.078
1.40	104.386	104.334	-0.052	104.284	-0.102
1.00	104.380	104.311	-0.069	104.273	-0.107
0.90	104.380	104.307	-0.073	104.268	-0.112
0.80	104.378	104.300	-0.078	104.256	-0.122
0.70	104.369	104.234	-0.135	104.234	-0.135
125 données d'observation			0.000	**Minimum**	0.002
433 paramètres d'optimisation au total			0.329	**Maximum**	0.538
256 paramètres insensibles			0.044	**Moyenne**	0.117

La valeur initiale donnée aux coefficients de Manning est de $n_{initial}$ = 0.030, ce qui est représentatif du coefficient moyen imposé au lit de la rivière dans le modèle original. Les limites inférieure et supérieure des paramètres sont fixées respectivement à n_{inf} = 0.010 et n_{sup} = 0.070. Ceci correspond approximativement aux valeurs extrêmes pouvant être observées en rivière naturelle. Le tableau 4.12 résume les résultats du calage.

Tableau 4.12 – Résultats du calage de la ligne d'eau pour le modèle à débits faibles et moyens de la rivière Romaine (Q = 390 m^3/s)

Durée de l'optimisation : 45 min (Intel ® Core ™ 2 Quad CPU Q9450 @ 2.66 GHz, 4.0 GB RAM)				
Nombre de lancements MHYSER effectués : 5 689				
Paramètres d'optimisation – Coefficients de Manning finaux				
		Valeur minimale	**Valeur maximale**	**Valeur moyenne**
Modèle original	**Rive gauche**	0.033	0.200	0.083
	Lit	0.010	0.060	0.030
	Rive droite	0.033	0.200	0.083
Modèle optimisé	**Rive gauche**	0.017	0.056	0.030
	Lit	0.010	0.070	0.031
	Rive droite	0.010	0.064	0.030
Paramètre d'observation – Élévation de la surface libre finale (Données d'observation calculées vs données d'observation désirées)				
		Écart maximal (m)	**Écart minimal** (m)	**Écart moyen** (m)
Modèle original		0.583	0.002	0.135
Modèle optimisé		0.404	0.001	0.051

L'optimisation est effectuée en peu de temps et mène à des résultats satisfaisants. L'écart maximal entre les données d'observation calculées et les données d'observation désirées est réduit de près de 20 cm. De plus, l'écart moyen subit une diminution marquée d'environ 265 %. Un raffinement des paramètres de contrôle PEST permettrait de le réduire davantage. Les figures 4.3, 4.4 et 4.5 présentent la ligne d'eau finale des modèles. La figure 4.6 compare les valeurs finales des coefficients de Manning de la rivière.

Dans les deux cas, les coefficients de Manning associés au lit de la rivière possèdent approximativement les mêmes valeurs moyennes et extrêmes. Les coefficients associés aux rives ne peuvent cependant bénéficier du même constat. Les différences observées sont causées principalement par l'insensibilité d'une importante quantité de paramètres d'optimisation. En effet, PEST détecte que pas moins de 256 coefficients de Manning n'ont aucune influence sur l'élévation de la surface libre. Une analyse des résultats de simulation révèle que la ligne d'eau est simplement trop basse pour submerger les segments de sections auxquels sont associés ces paramètres.

Chaque modèle est ensuite validé à l'aide de données relevées pendant la période du 28, 30 août et 1er septembre 2003 (GENIVAR, 2004). Les résultats sont de qualité semblable. Le modèle optimisé fournit un meilleur ajustement de la ligne d'eau que le modèle original pour un débit de 139 m^3/s, mais ne donne pas un aussi bon rendement pour un débit de 118 m^3/s.

Tableau 4.13 – Résultats de validation pour le modèle à débits faibles et moyens de la rivière Romaine.

Élévations de la surface libre (Calculées vs Observées)				
		28 août 2003 (Q = 118 m^3/s)	**30 août 2003** (Q = 131 m^3/s)	**1er septembre 2003** (Q = 139 m^3/s)
Modèle original	**Écart maximal (m)**	0.058	0.081	0.291
	Écart minimal (m)	0.032	0.026	0.243
	Écart moyen (m)	0.047	0.058	0.265
Modèle optimisé	**Écart maximal (m)**	0.181	0.113	0.241
	Écart minimal (m)	0.049	0.033	0.158
	Écart moyen (m)	0.101	0.069	0.198

Tableau 4.14 – Validation du modèle pour débits faibles et moyens de la rivière Romaine (calage effectué avec $Q = 390$ m³/s) : Élévations de la surface libre mesurées et calculées.

Modèle optimisé									
	$Q = 118$ m³/s			$Q = 131$ m³/s			$Q = 139$ m³/s		
PK	Mesurée (m)	Calculée (m)	Écart (m)	Mesurée (m)	Calculée (m)	Écart (m)	Mesurée (m)	Calculée (m)	Écart (m)
49.5	117.920	118.101	-0.181						
49.2	117.890	118.013	-0.123						
48.9	117.870	117.990	-0.120						
48.8	117.860	117.983	-0.123						
48.7	117.860	117.920	-0.060						
48.5	117.850	117.900	-0.050						
48.2	117.840	117.889	-0.049						
47.1		**Moyenne =**	**0.101**	117.790	117.899	-0.109			
46.4				117.690	117.803	-0.113			
45.9				117.630	117.663	-0.033			
45.2				117.560	117.526	0.034			
44.8				117.560	117.502	0.058			
34.8					**Moyenne =**	**0.069**	109.790	109.951	-0.161
34.7							109.790	109.948	-0.158
34.4							109.750	109.940	-0.190
34.2							109.730	109.940	-0.210
34.0							109.710	109.937	-0.227
33.7							109.700	109.941	-0.241
								Moyenne =	**0.198**

Modèle original									
	$Q = 118$ m³/s			$Q = 131$ m³/s			$Q = 139$ m³/s		
PK	Mesurée (m)	Calculée (m)	Écart (m)	Mesurée (m)	Calculée (m)	Écart (m)	Mesurée (m)	Calculée (m)	Écart (m)
49.5	117.920	117.971	-0.051						
49.2	117.890	117.935	-0.045						
48.9	117.870	117.923	-0.053						
48.8	117.860	117.918	-0.058						
48.7	117.860	117.914	-0.054						
48.5	117.850	117.882	-0.032						
48.2	117.840	117.878	-0.038						
47.1		**Moyenne =**	**0.047**	117.790	117.871	-0.081			
46.4				117.690	117.716	-0.026			
45.9				117.630	117.568	0.062			
45.2				117.560	117.507	0.053			
44.8				117.560	117.490	0.070			
34.8					**Moyenne =**	**0.058**	109.790	110.038	-0.248
34.7							109.790	110.033	-0.243
34.4							109.750	110.010	-0.260
34.2							109.730	109.999	-0.269
34.0							109.710	109.992	-0.282
33.7							109.700	109.991	-0.291
								Moyenne =	**0.265**

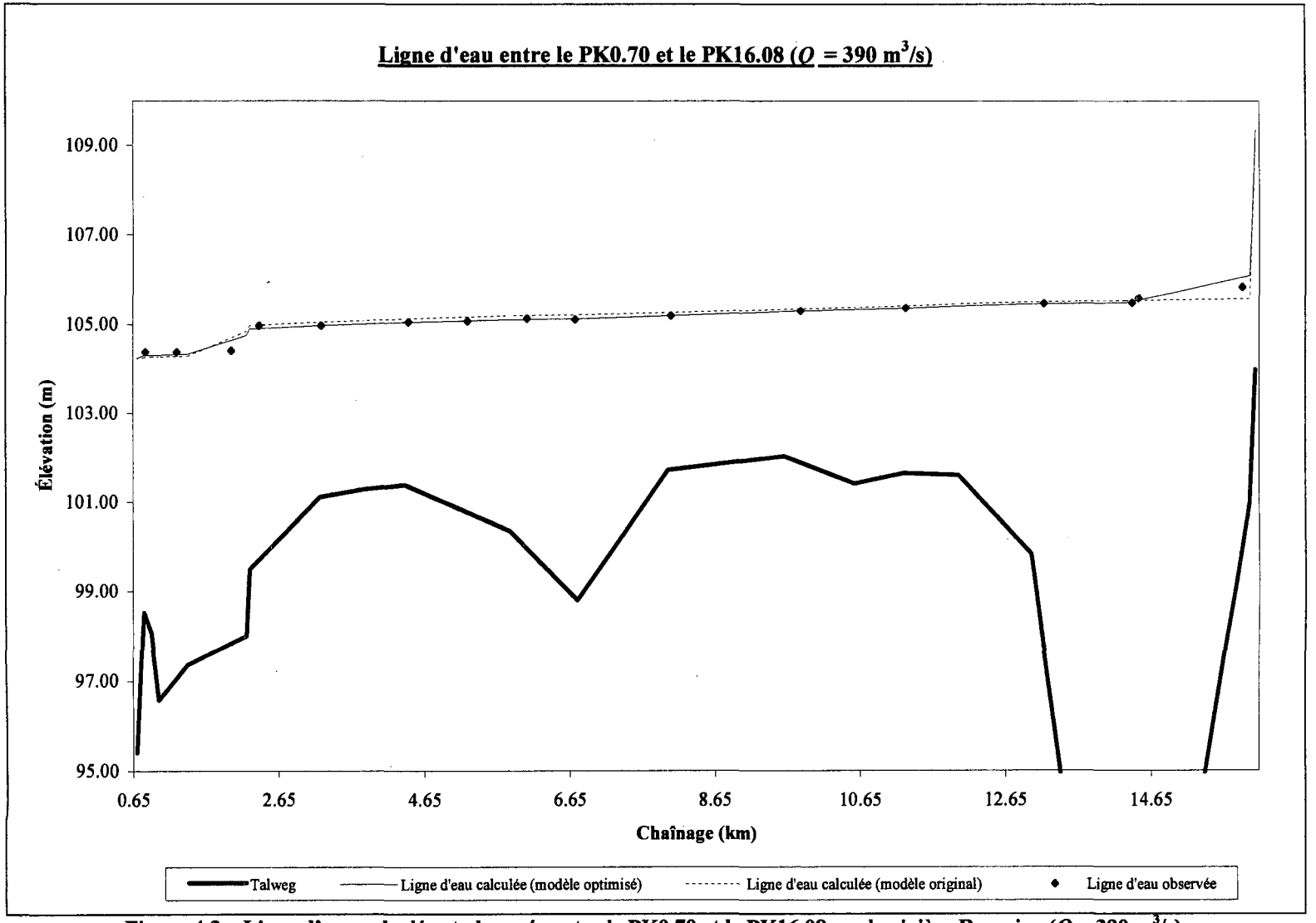


Figure 4.3 – Ligne d'eau calculée et observée entre le PK0.70 et le PK16.08 sur la rivière Romaine (Q = 390 m³/s).

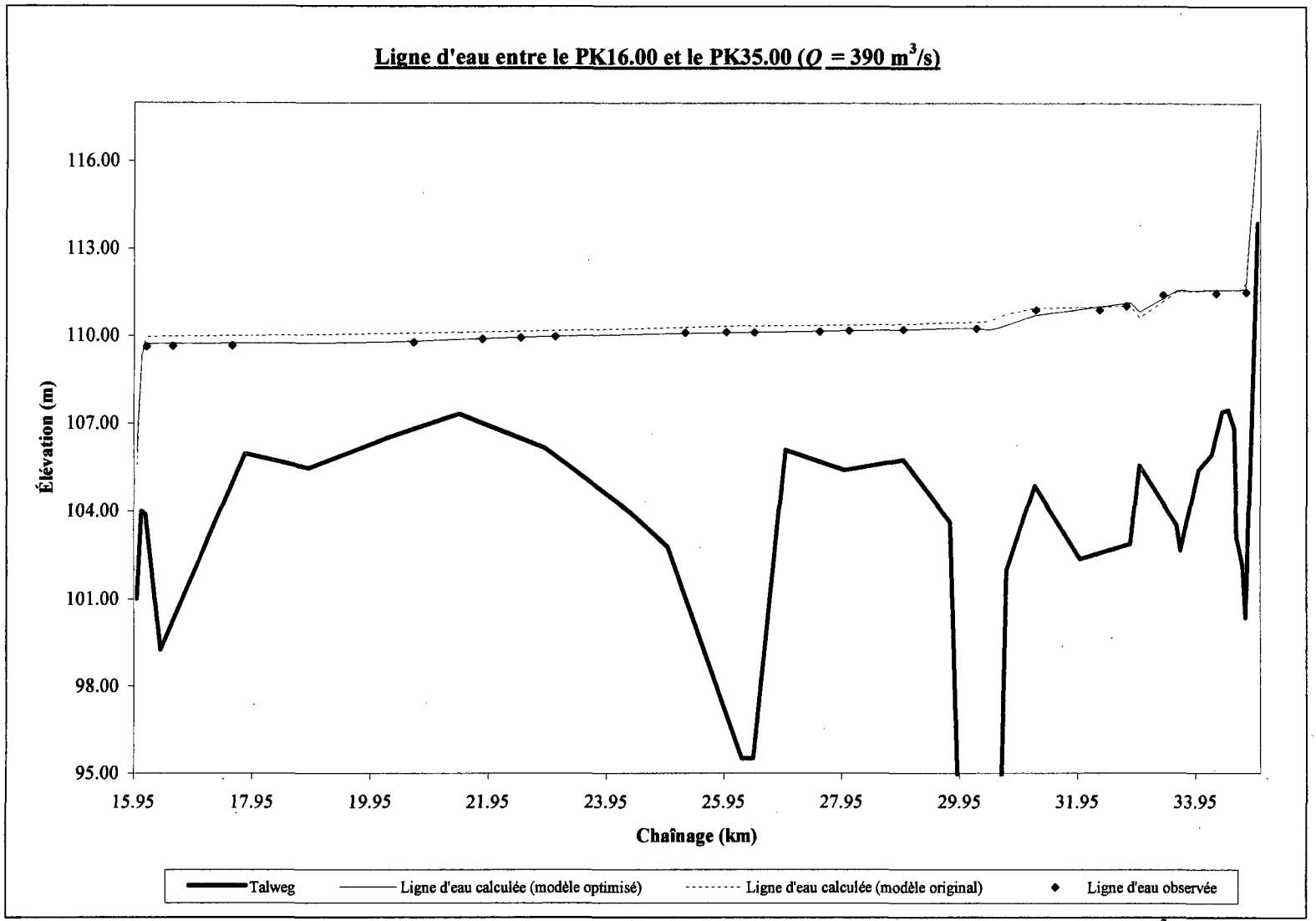


Figure 4.4 – Ligne d'eau calculée et observée entre le PK16.00 et le PK35.00 sur la rivière Romaine (Q = 390 m³/s).

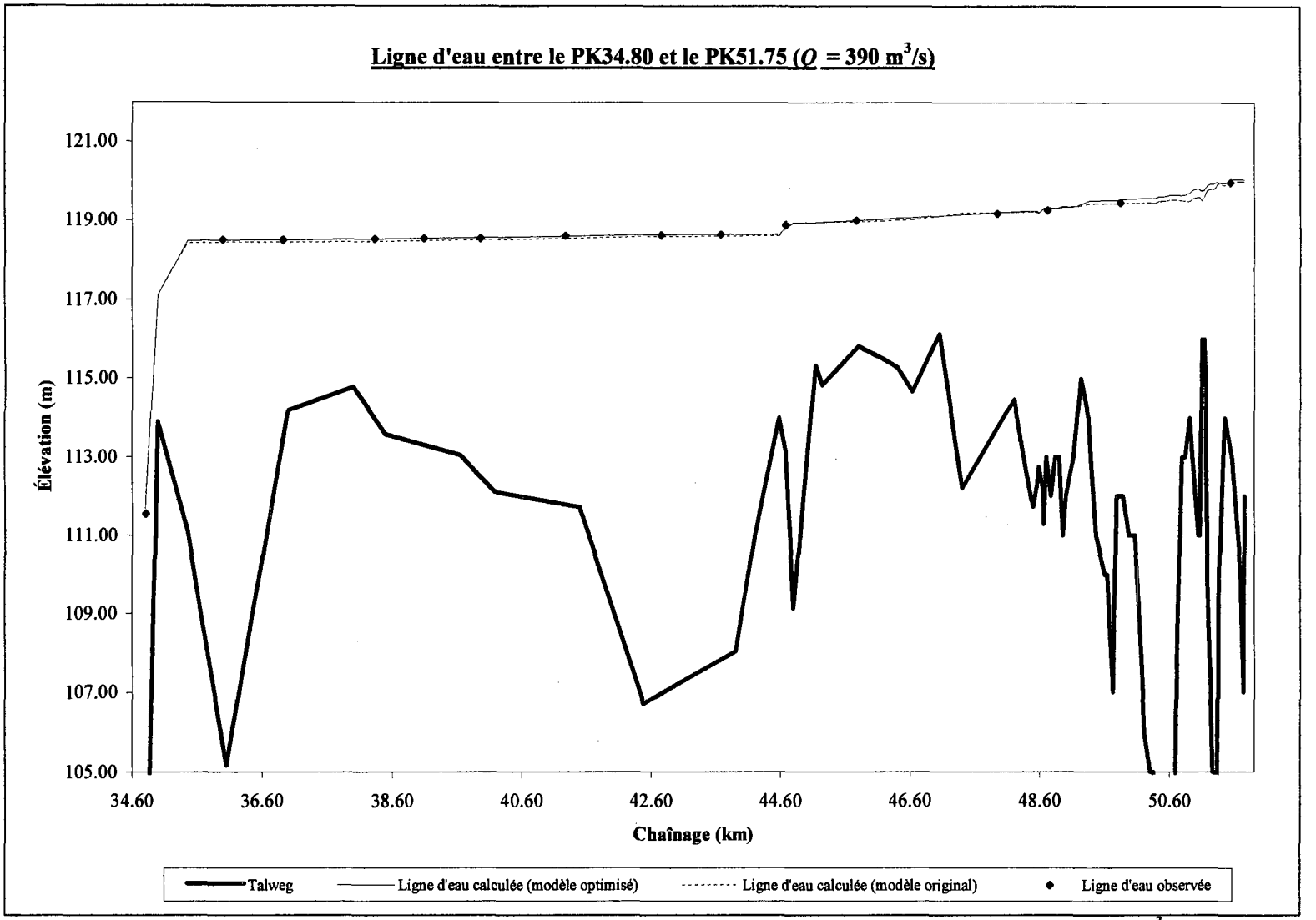


Figure 4.5 – Ligne d'eau calculée et observée entre le PK34.80 et le PK51.75 sur la rivière Romaine (Q = 390 m³/s).

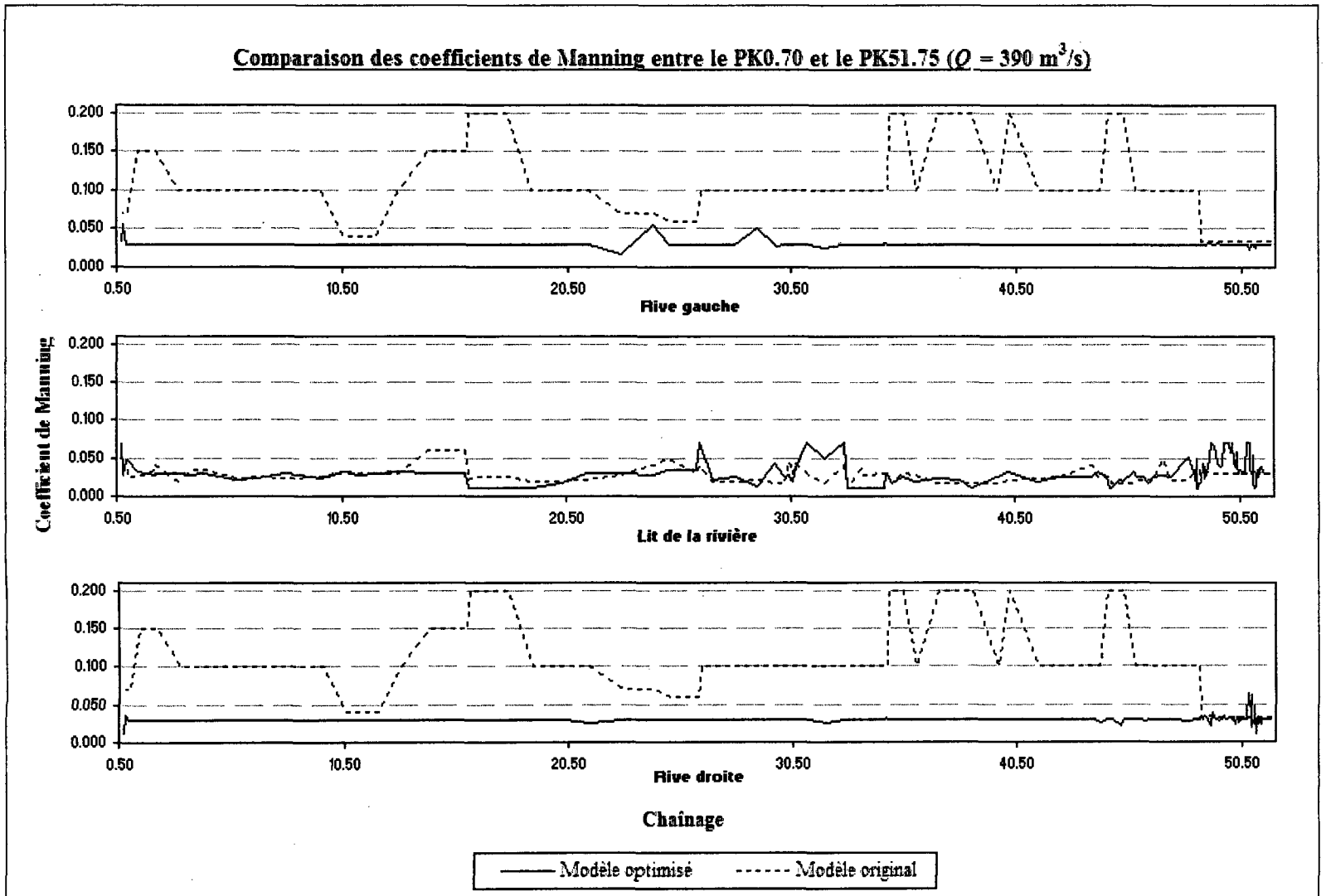


Figure 4.6 – Comparaison des coefficients de Manning optimisés pour débits faibles et moyens du modèle de la rivière Romaine (Q = 390 m3/s).

Un deuxième calage, avec un débit plus élevé (Q = 1317 m^3/s), est effectué pour tenter de réduire le nombre de paramètres d'optimisation insensibles. Cependant, la faible quantité de points de mesures relevés en période de crue (28 mai 2003 (GENIVAR, 2004)) ne permet pas de schématiser adéquatement la ligne d'eau et plusieurs tronçons de la rivière doivent être négligés lors de l'interpolation des données d'observation désirées. Seulement 55 observations sont utilisées. Sous cette condition, PEST détermine que 298 coefficients de Manning n'ont aucune influence sur l'élévation de la surface libre.

Cette situation démontre que, même avec une procédure automatisée, un ajustement fiable de la ligne d'eau est difficilement accompli avec une seule série de données. La configuration finale du modèle doit être assemblée manuellement en combinant les résultats de différentes optimisations, effectuées avec divers débits.

Tableau 4.15 – Élévations de la surface libre désirées et calculées, issues du modèle optimisé pour débits forts de la rivière Romaine (Q = 1317 m^3/s).

PK	Élévations de la surface libre désirées[1] (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle optimisé)	Écart (m)
47.92	121.751	121.723	-0.028
44.72	121.228	120.840	-0.388
44.11	120.631	120.644	0.013
41.28	120.342	120.338	-0.004
35.30	119.677	119.383	-0.294
34.85	114.325	115.480	1.155
34.28	114.365	114.340	-0.025
30.47	113.660	112.908	-0.752
29.37	112.396	112.522	0.126
25.99	112.006	112.020	0.014
22.60	112.487	111.769	-0.718
15.49	108.033	108.197	0.164
9.80	107.564	107.580	0.016
2.24	107.212	107.180	-0.032
1.88	106.473	106.827	0.354
15 points de mesures		**Minimum**	0.004
		Maximum	1.155
		Moyenne	0.272

[1] Données tirées de GENIVAR (2004)

Tableau 4.16 – Données d'observation désirées, employées lors du calage du modèle pour débits forts de la rivière Romaine (Q = 1317 m^3/s), et données d'observation calculées finales (modèle original non disponible).

PK	Élévations de la surface libre désirées[1] (m)	Élévations de la surface libre calculées (m) (modèle optimisé)	Écart (m)
47.40	121.666	121.661	-0.005
47.05	121.609	121.614	0.005
46.63	121.540	121.540	0.000
46.40	121.503	121.507	0.004
46.18	121.467	121.459	-0.008
45.90	121.421	121.421	0.000
45.80	121.405	121.401	-0.004
45.24	121.313	121.333	0.020
45.14	121.297	121.312	0.015
44.80	121.241	121.215	-0.026
43.90	120.610	120.605	-0.005
42.48	120.465	120.470	0.005
41.49	120.363	120.363	0.000
40.18	120.220	120.210	-0.010
39.65	120.161	120.168	0.007
38.50	120.033	120.034	0.001
38.00	119.977	119.981	0.004
37.00	119.866	119.855	-0.011
36.05	119.760	119.772	0.012
35.45	119.694	119.689	-0.005
34.80	114.329	114.383	0.054
34.75	114.332	114.355	0.023
34.65	114.339	114.350	0.011
34.60	114.343	114.354	0.011
34.50	114.350	114.355	0.005
34.40	114.357	114.344	-0.013
34.22	114.354	114.338	-0.016
34.00	114.313	114.271	-0.042
33.70	114.258	114.291	0.033
33.64	114.247	114.268	0.021
33.00	114.128	114.024	-0.104
32.85	114.100	114.111	0.011
32.00	113.943	113.956	0.013
31.23	113.801	113.929	0.128
30.75	113.712	113.804	0.092
30.60	113.684	113.435	-0.249
29.00	112.353	112.441	0.088
28.00	112.238	112.212	-0.026
27.00	112.123	112.118	-0.005
26.45	112.059	112.053	-0.006
26.25	112.036	112.046	0.010
14.30	107.935	107.907	-0.028
13.00	107.828	107.855	0.027
12.00	107.745	107.748	0.003
11.25	107.684	107.665	-0.019
10.57	107.627	107.626	-0.001
9.60	107.555	107.568	0.013
8.00	107.480	107.475	-0.005
6.75	107.422	107.419	-0.003
5.82	107.379	107.381	0.002
4.38	107.312	107.318	0.006
3.80	107.285	107.293	0.008
3.21	107.257	107.274	0.017
2.25	107.212	107.196	-0.016
2.20	107.130	107.118	-0.012
55 données d'observation		**Minimum**	0.000
433 paramètres d'optimisation au total		**Maximum**	0.249
298 paramètres insensibles		**Moyenne**	0.023

[1] Données issues d'une interpolation linéaire entre les mesures tirées de GENIVAR (2004)

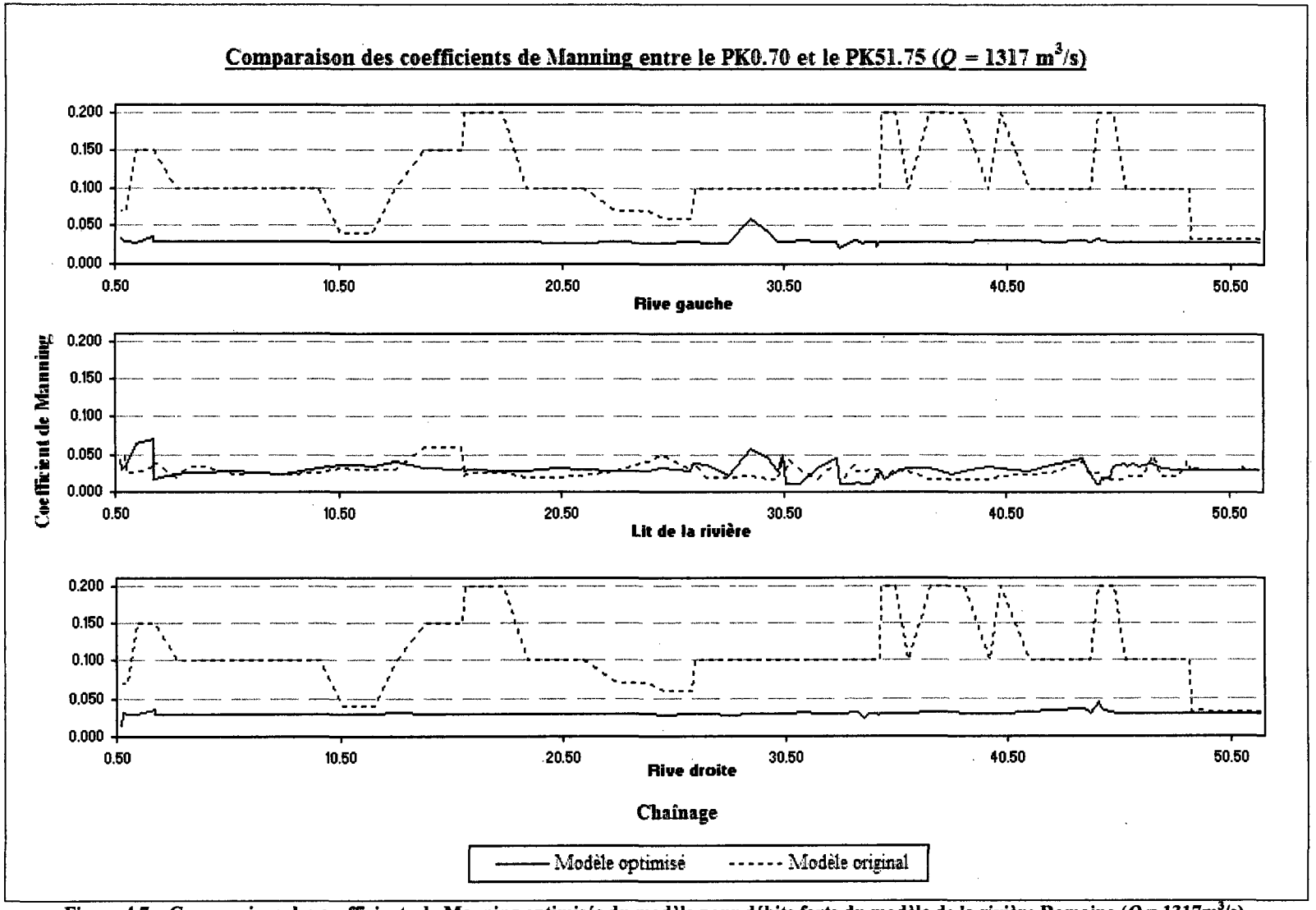


Figure 4.7 – Comparaison des coefficients de Manning optimisés du modèle pour débits forts du modèle de la rivière Romaine (Q = 1317m³/s).

4.2.2.2 Transport solide

Le modèle pour débits faibles et moyens est restitué à sa forme complète en conservant les valeurs optimisées des coefficients de Manning. L'équation de transport et le nombre de tubes de courant sont désignés comme les paramètres d'optimisation. Un total de 11 équations sont mises à l'essai, avec un nombre de tubes variant entre 1 et 5. L'étude sur la dynamique hydrosédimentaire de la rivière Romaine conclut que le poids annuel de sédiments transportés au PK3.80 pour l'année 2003 était de 38 300 tonnes (GENIVAR, 2006). L'objectif de l'analyse est donc de déterminer quelle configuration des paramètres d'optimisation permet de reproduire le plus fidèlement cette observation, tant pour le modèle original que pour le modèle optimisé.

Le poids annuel de sédiments transportés est déterminé en faisant la somme des débits solides journaliers au PK3.80 pendant toute la période de modélisation, qui est de 365 jours. Les données d'observation calculées sont donc liées à une seule section et plusieurs pas de temps. Or, OptiMHYSER ne peut accepter que des données liées à plusieurs sections et un seul pas de temps. Une deuxième procédure de calage automatisé a donc été développée sur mesure pour l'analyse en cours. L'algorithme d'optimisation est très semblable à celui qu'utilise OptiMHYSER. Le tableau 4.17 et les figures 4.8 et 4.9 présentent les résultats des simulations.

Les deux modèles ont un comportement très distinct l'un de l'autre. L'estimation du poids annuel de sédiments transportés faite par le modèle original est largement supérieure à celle faite par le modèle optimisé, et ce, pour l'ensemble des équations mises à l'essai. Cette constatation est attribuable aux configurations dissemblables des coefficients de Manning. Les valeurs élevées inscrites pour les berges dans le modèle original causent une augmentation de la rugosité des sections lorsque le niveau d'eau atteint les segments concernés. Ceci mène alors à une surestimation du débit solide. Inversement, l'insensibilité de plusieurs paramètres d'optimisation appartenant au modèle optimisé provoque une diminution de la rugosité des sections, ce qui entraîne

une sous-estimation du débit solide. Un raffinement des coefficients serait donc nécessaire pour améliorer la fiabilité du calage. Malgré tout, l'analyse effectuée démontre que le modèle optimisé est celui qui s'approche le plus du poids ciblé avec l'équation de Ackers et White (1990) et 4 tubes de courants. Le tableau 4.18 présente un résumé des meilleurs résultats obtenus avec chaque modèle.

Tableau 4.17 – Poids annuel de sédiments transportés selon les différentes combinaisons de l'équation de transport et du nombre de tubes de courant mises à l'essai pour le modèle de la rivière Romaine.

Durée de l'optimisation : 2 h 30 min (Intel ® Core ™ 2 Quad CPU Q9450 @ 2.66 GHz, 4.0 GB RAM)						
Nombre de lancements MHYSER : 56						
Poids annuel de sédiments transportés au PK3.80 pour l'année 2003 (tonnes)						
	Équation de transport	**Nombre de tubes de courants**				
		1 Tube	**2 Tubes**	**3 Tubes**	**4 Tubes**	**5 Tubes**
Modèle Optimisé	Meyer-Peter et Müller	76 334	71 898	69 577	67 595	67 197
	Laursen	8 125	8 158	8 371	8 031	8 048
	Engelund et Hansen	88 476	91 857	94 409	91 965	93 135
	Ackers et White 1973	38 828	40 751	42 765	42 078	42 643
	Yang 1973 sable et 1984 gravier	40 569	43 539	44 666	43 955	45 260
	Yang 1979 sable et 1984 gravier	26 749	29 292	30 084	29 621	30 716
	Yang 1996	18 663	20 760	21 343	20 953	21 740
	Ackers et White 1990	35 049	37 332	39 359	38 565	39 017
	DuBoys	167 686	169 961	169 621	169 196	169 517
	Laursen modifiée	8 494	8 408	9 022	8 648	8 517
	Ashida et Michiue	11 134	19 568	22 953	21 271	22 110
Modèle Original	Meyer-Peter et Müller	115 486	108 644	103 229	100 367	99 308
	Laursen	11 337	11 314	11 563	11 552	11 291
	Engelund et Hansen	161 476	162 742	162 108	161 082	157 746
	Ackers et White 1973	64 203	64 370	65 364	66 053	66 202
	Yang 1973 sable et 1984 gravier	85 190	87 908	88 749	87 751	86 918
	Yang 1979 sable et 1984 gravier	65 373	69 028	69 653	68 843	68 174
	Yang 1996	46 780	50 314	50 475	52 173	50 466
	Ackers et White 1990	59 867	60 663	61 855	62 498	62 379
	DuBoys	298 733	292 453	291 393	292 703	287 460
	Laursen modifiée	12 596	13 168	13 334	13 696	12 729
	Ashida et Michiue	74 332	96 985	101 209	99 138	93 655

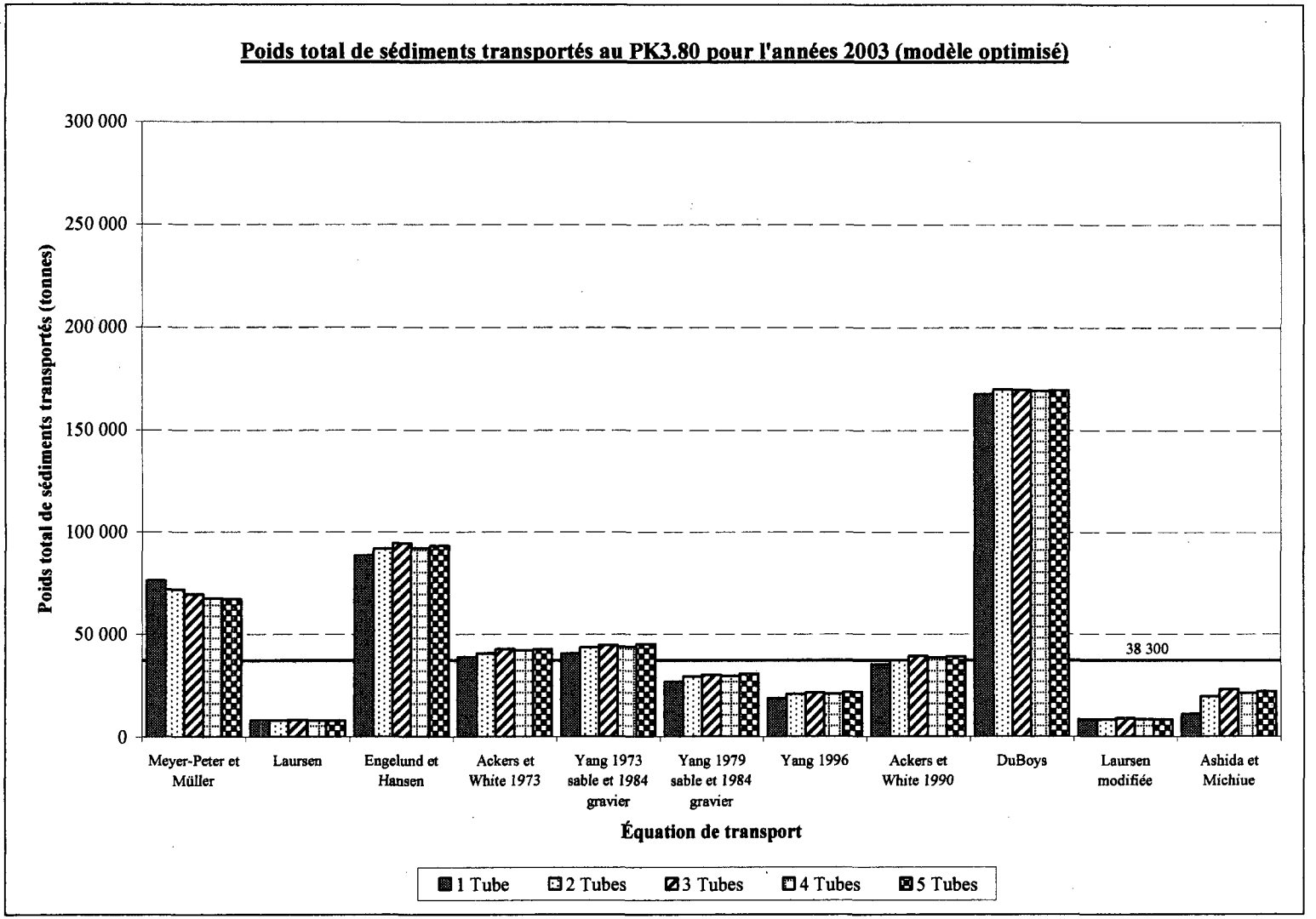


Figure 4.8 – Poids total de sédiments transportés au PK3.80 pour l'année 2003 selon les différentes combinaisons de l'équation de transport et du nombre de tubes de courant mises à l'essai (modèle optimisé).

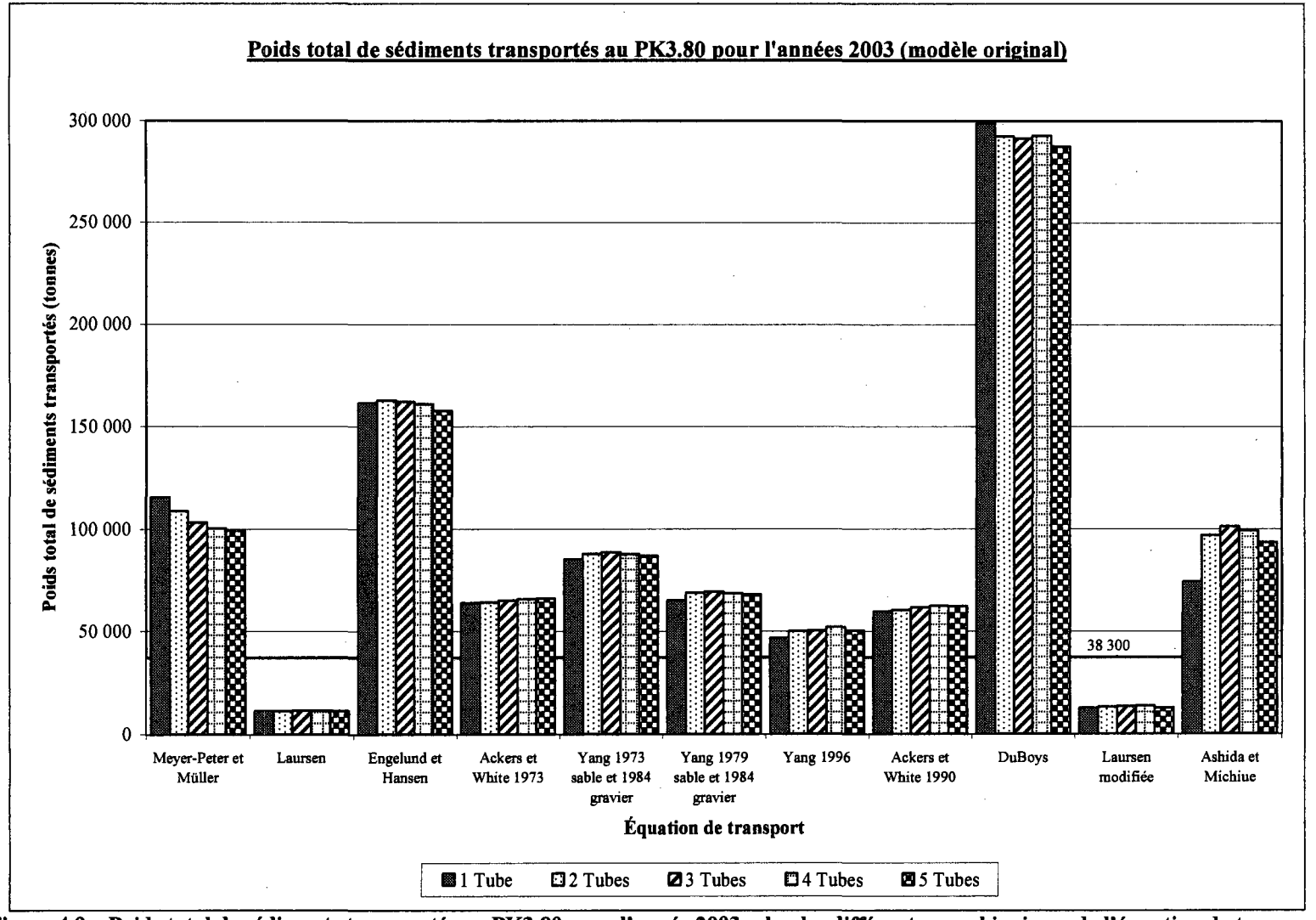


Figure 4.9 – Poids total de sédiments transportés au PK3.80 pour l'année 2003 selon les différentes combinaisons de l'équation de transport et du nombre de tubes de courant mises à l'essai (modèle original).

Tableau 4.18 – Équation de transport et nombre de tubes de courant offrant le meilleur ajustement selon le poids annuel de sédiments transportés.

Ajustement par rapport au poids annuel de sédiments transporté au PK3.80 (38 300 tonnes)			
	Équation de transport	**Nombre de tubes de courant**	**Poids annuel de sédiments transportés au PK3.80** (tonnes)
Modèle original	Yang (1996)	1	46 780
Modèle optimisé	Ackers et White (1990)	4	38 565

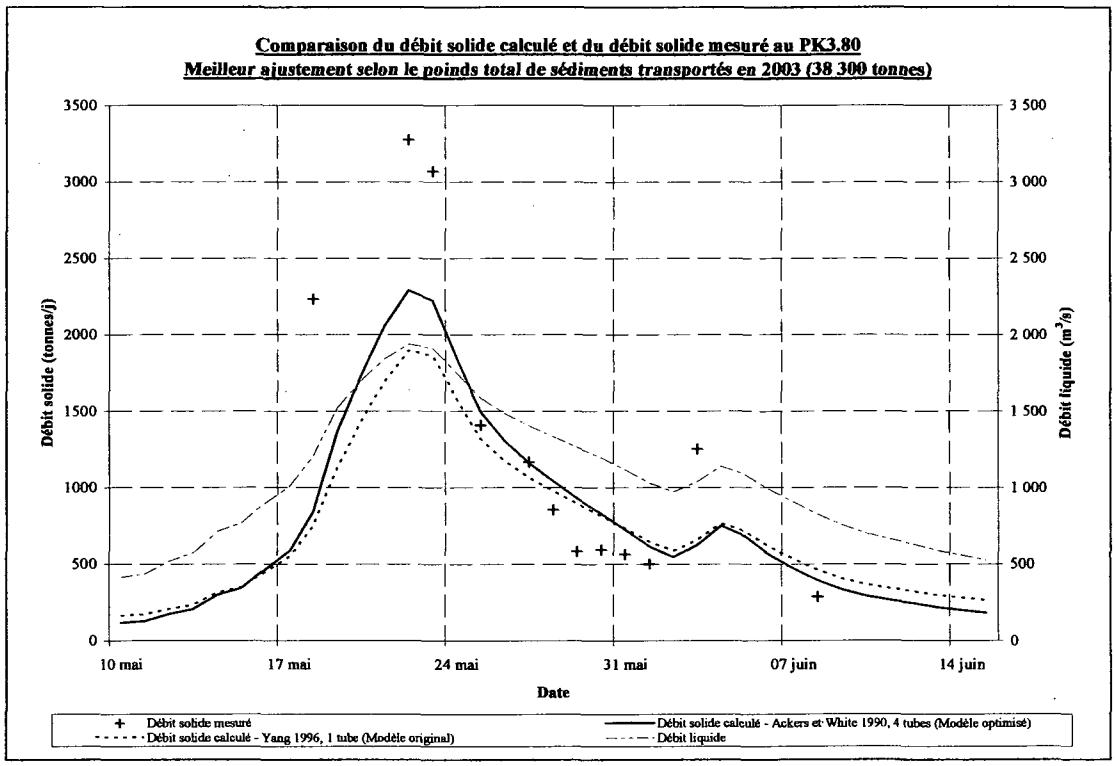


Figure 4.10 – Débit solide journalier au PK3.80, selon le meilleur ajustement du poids annuel de sédiments transportés (38 300 tonnes).

En poursuivant l'analyse, il est possible de constater que la combinaison qui offre le meilleur ajustement du poids annuel de sédiments transportés n'est pas nécessairement celle qui fournit le meilleur ajustement des débits solides journaliers observés au PK3.80 pendant la période du 18 mai 2003 au 8 juin 2003 (GENIVAR, 2006). À cet égard, le plus faible écart entre les données d'observation calculées et les données d'observation désirées est atteint avec l'équation de Yang (1979 & 1984) et 5 tubes de courant pour le modèle original et l'équation de Ackers et White (1973) avec 2 tubes de

courant pour le modèle optimisé. Le modèle original offre le meilleur ajustement hors tout, mais le modèle optimisé reproduit plus fidèlement les débits solides faibles et moyens observés (Q_{sol} < 1 500 tonnes/jour). Les tableaux 4.19 et 4.20 mettent en évidence cette comparaison.

Tableau 4.19 – Débit solide journalier (tonnes/jour) : meilleur ajustement selon le poids annuel de sédiments transportés au PK3.80 pour l'année 2003 (38 300 tonnes).

		Modèle optimisé Ackers et White 1990, 4 tubes (38 565 tonnes annuelles)		Modèle original Yang 1996, 1 tube (46 780 tonnes annuelles)	
Date	**Débit solide désiré** (tonnes/jour)	**Débit solide calculé** (tonnes/jour)	**Écart** (tonnes/jour)	**Débit solide calculé** (tonnes/jour)	**Écart** (tonnes/jour)
18 mai	2 237	843	-1 394	751	-1 486
22 mai	3 275	2 292	-983	1 896	-1 379
23 mai	3 068	2 225	-843	1 863	-1 205
25 mai	1 408	1 496	87	1 319	-90
27 mai	1 167	1 163	-4	1 066	-102
28 mai	855	1 043	188	978	124
29 mai	584	929	344	893	308
30 mai	594	828	234	815	221
31 mai	565	723	159	733	169
01 juin	503	614	111	645	142
03 juin	1 254	627	-627	659	-595
08 juin	288	394	106	463	174
			4 277 800	**Fonction objective**	6 173 487

Tableau 4.20 – Débit solide journalier (tonnes/jour) : meilleur ajustement selon le débit solide observé au PK3.80 entre le 18 mai 2003 et le 8 juin 2003 (fonction objective minimum).

		Modèle optimisé Ackers et White 1973, 2 tubes (40 751 tonnes annuelles)		Modèle original Yang (sable 1979, gravier 1984), 5 tubes (68 174 tonnes annuelles)	
Date	**Débit solide désiré** (tonnes/jour)	**Débit solide calculé** (tonnes/jour)	**Écart** (tonnes/jour)	**Débit solide calculé** (tonnes/jour)	**Écart** (tonnes/jour)
18 mai	2 237	917	-1 320	1 156	-1 081
22 mai	3 275	2 469	-806	2 818	-457
23 mai	3 068	2 398	-670	2 740	-328
25 mai	1 408	1 624	216	1 912	504
27 mai	1 167	1 272	105	1 518	351
28 mai	855	1 144	289	1 382	527
29 mai	584	1 021	436	1 252	667
30 mai	594	913	319	1 139	545
31 mai	565	797	233	1 023	459
01 juin	503	675	172	901	398
03 juin	1 254	689	-565	918	-335
08 juin	288	431	143	644	356
			3 700 050	**Fonction objective**	3 491 135

Tableau 4.21 – Équation de transport et nombre de tubes de courant offrant le meilleur ajustement selon le débit solide journalier observé.

Meilleur ajustement par rapport au débit solide journalier observé au PK3.80 pendant la période du 18 mai au 8 juin 2003			
	Équation de transport	**Nombre de tubes de courant**	**Poids annuel de sédiments transportés au PK3.80** (tonnes)
Modèle original	Yang (1979 & 1984)	5	68 174
Modèle optimisé	Ackers et White (1973)	2	40 751

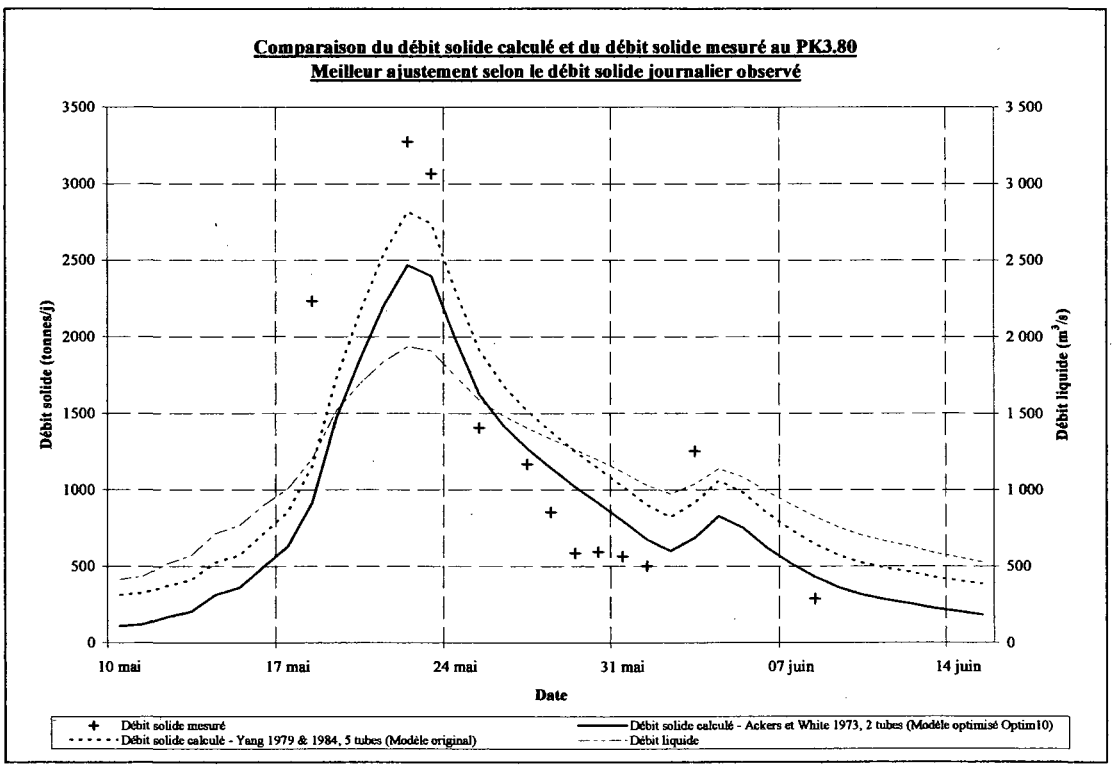


Figure 4.11 – Débit solide journalier au PK3.80, selon le meilleur ajustement par rapport aux observations effectuées pendant la période du 18 mai 2003 au 8 juin 2003.

En raison de l'incertitude élevée associée aux données d'observation désirées et au modèle de transport solide utilisé, il est difficile de statuer sur la configuration optimale pour l'équation de transport et le nombre de tubes de courant. Une étude de plus grande envergure et de plus longue haleine serait nécessaire pour dégager les combinaisons qui ont le plus de potentiel. Pour l'instant, les équations de Ackers et White (1973), Ackers et White (1990), Yang (1973 sable et 1984 gravier), Yang (1979 sable et 1984 gravier) et Yang (1996), avec un nombre variable de tubes de courant, semblent être les pistes les plus prometteuses.

CONCLUSION

L'objectif de ce projet était de développer une méthodologie de calage automatisé pour tout modèle de rivière basé sur le logiciel hydrosédimentaire MHYSER1.0. La procédure mise au point devait pouvoir s'exécuter de façon autonome et permettre l'utilisation du logiciel d'optimisation PEST. Un outil simple et convivial serait conçu pour faciliter la configuration de la procédure et permettre son usage, peu importe le niveau d'expertise que possède le modélisateur avec PEST.

Le logiciel OptiMHYSER répond de façon satisfaisante à ces critères. La structure de son interface graphique permet de spécifier rapidement l'emplacement du fichier de données du modèle et de choisir les paramètres d'optimisation et d'observation désirés pour effectuer le calage. L'architecture flexible du logiciel offre la possibilité d'adapter la procédure d'optimisation aux données d'observation disponibles. La méthode de calibration est entièrement autonome et, lorsque terminée, retourne le modèle avec la valeur finale des paramètres d'optimisation donnant lieu au plus faible écart entre les données d'observation calculées et les données d'observation désirées.

OptiMHYSER fait appel au logiciel PEST pour caler les paramètres d'optimisation continus du modèle MHYSER. Il effectue la configuration du logiciel automatiquement et génère tous les fichiers de données nécessaires pour son exécution. Un formulaire de saisie convivial permet de facilement modifier les paramètres de contrôle afin d'améliorer l'efficacité de l'optimisation.

Le calage des paramètres discontinus est effectué directement par OptiMHYSER. Un algorithme ingénieux établit toutes les combinaisons devant être mises à l'essai et détermine laquelle mène au plus faible écart entre les résultats de simulation et les mesures relevées sur le terrain. La qualité de l'ajustement est mesurée par l'entremise d'une fonction objective identique à celle utilisée par PEST. Un couplage entre cet

algorithme et le logiciel PEST coordonne l'optimisation simultanée des paramètres continus et discontinus.

Les étapes de validation et d'application démontrent que l'outil développé permet d'obtenir un ajustement rapide et précis des modèles de rivières. La commodité d'une méthodologie de calage automatisé se fait surtout sentir lors de l'ajustement de la ligne d'eau. Un algorithme d'optimisation efficace effectue en peu de temps un grand nombre de simulations, raffinant ainsi les coefficients de Manning jusqu'à ce qu'une précision millimétrique puisse être atteinte sur l'élévation finale de la surface libre.

En ce qui concerne le calage des paramètres associés au transport solide, l'avantage principal qu'offre OptiMHYSER est son autonomie d'exécution. Bien qu'une certaine économie de temps puisse être observée, il est avant tout intéressant de pouvoir entrer initialement la plage de paramètres d'optimisation désirés et ensuite laisser le logiciel effectuer les modifications et les vérifications nécessaires afin d'établir la combinaison optimale.

Malgré tout, quelques lacunes ont été constatées lors de l'application du logiciel. Certaines d'entre elles sont intrinsèques aux composantes de la méthodologie tandis que d'autres pourraient être corrigées lors du développement de versions ultérieures d'OptiMHYSER. D'abord, l'utilisation de PEST exige que les données d'observation désirées soient toujours fournies en fonction des sections inscrites dans le modèle. Dans le cas du calage de la ligne d'eau, ceci mène à l'estimation des niveaux de la surface libre à partir d'une interpolation linéaire entre les élévations relevées aux différents points de mesures. Cette procédure peut être une source d'erreur importante si une attention particulière n'est pas accordée aux tronçons présentant des discontinuités majeures dans la ligne d'eau.

Deuxièmement, en dépit des efforts déployés, il s'avère très difficile d'accomplir un calage adéquat sans avoir une bonne connaissance du fonctionnement de PEST. La non-linéarité des modèles exige l'ajustement fréquent des paramètres de contrôles. Il

est donc important de connaître le rôle que joue chacun d'entre eux en plus de pouvoir interpréter correctement l'information contenue dans les fichiers de sortie du logiciel.

Dans la catégorie des lacunes corrigibles, il est possible d'inclure l'ajout d'un paramètre d'observation, soit le poids total de sédiments transportés, et l'aménagement d'une plus grande souplesse au niveau des pas de temps auxquels sont liées les données d'observation désirées. Ces deux améliorations auraient permis l'utilisation d'OptiMHYSER lors du calage des paramètres associés au transport solide du modèle de la rivière Romaine (voir section 4.2.2.2). D'autres parts, une flexibilité accrue dans le choix des sections auxquelles sont associés les paramètres d'optimisation serait aussi bénéfique, principalement lors du calage de la ligne d'eau. Il serait ainsi possible d'exclure les paramètres insensibles de la procédure d'optimisation et de réduire le temps d'exécution du logiciel.

En conclusion, OptiMHYSER est un outil pratique pour le calage automatisé des modèles de rivières, mais la complexité associée au développement d'une méthodologie généralisée surpasse les bénéfices que procure son utilisation. Une procédure fondée sur l'algorithme qu'utilise le logiciel, mais ajustée sur mesure aux caractéristiques de chaque modèle serait plus efficace et moins problématique à programmer.

BIBLIOGRAPHIE

Ackers, P., et White, W.R. (1973). Sediment transport : new approach and analysis. *Journal of th Hydraulics Division ASCE*. HY11, 99.

Anastasiadou-Partheniou, L., & Samuels, P. G. (1998). Automatic calibration of computations river models. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Water Maritime and Energy*. 130 (3), 154-162.

Bennett, J.P. et Nordin, C.F. (1977) Simulation of sediment transport and armouring. *Hydrological Scineces Bulletin*. XXII.

Cunge, J.A., Holly, F.M. et Verwey, A. (1980). Practical aspects of computational river hydraulics. *Pitman Publishing, Inc*. Marshfield, MA.

Doherty, John (2004). PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual. *Watermark Numerical Computing*, 5th ed. 362 pages.

DuBoys, M.P. (1879). Le Rhône et les rivières à lit affouillable. *Annals de Ponts et Chaussée*, 18 (5), 141-195.

Engelund, F. et Hansen, E. (1972) A monograph on sediment transport in alluvial streams. *Teknish Forlag, Technical Press*. Copenhagen, Denmark.

GENIVAR (2004). *Rivière Romaine – Modélisation hydrodynamique 1D entre les PK 0 et 192*. Rapport du Groupe conseil GENIVAR inc. à Hydro-Québec Production, Direction Aménagement de production, Hydraulique et Géotechnique. 95 p. et annexes.

GENIVAR (2006). *Complexe de la rivière Romaine – Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique*. Rapport sectoriel. Pelletier, P., Levasseur, M., Bouazza, Z., Delage, P.-L. et Hamdi, S. GENIVAR Société en commandite pour Hydro-Québec Équipement, Unité Environnement. Version préliminaire.

GENIVAR (2007). *Complexe de la rivière Romaine – Dynamique hydrosédimentaire des frayères à saumon atlantique*. Rapport sectoriel. Pelletier, P., Levasseur, M., Bouazza, Z., Delage, P.-L. et Hamdi, S. GENIVAR Société en commandite pour Hydro-Québec Équipement, Unité Environnement. 84 p. et annexes.

Graf, W.H. (1971). *Hydraulics of Sediment Transport*. Montreal : McGraw-Hill

Graf, W.H., Altinakar, M.S. (1998). *Hydrodynamique* (2e éd.). Traité de Génie Civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, Volume 14. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne.

Graf, W.H., Altinakar, M.S. (2000). *Hydraulique Fluviale* (2e éd.). Traité de Génie Civil de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, Volume 16. Presses polytechniques et universitaires romandes, CH-1015 Lausanne. Suisse : Jordi AG.

Han, Q. et He, M. (1990) A mathematical model for reservoir sedimentation and fluvial processes. *International Journal of Sediment Research*, 5 (2), 43-84.

Hill, M.C. (1998). Methods and Guidelines for Effective Model Calibration. *U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report* 98-4005.

Laursen, E.M. (1958). The total sediment load of streams. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE.* 84 (HY1).

Madden, E. (1993). Modified Laursen method for estimating bed-material sediment load. *USACE-WES*, Contract Report, HL-93-3.

Mahdi, T. (2009). Semi-two-dimensional numerical model for river morphological change prediction: theory and concepts. *Journal of Natural Hazards*, 49 (3), 577-589.

Marquardt, D.W. (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics*, 11 (2), 431-441.

Meyer-Peter, E. et Müller, R. (1948). Formula for bed-load transport. *Procedings of the International Association for Hydraulic Research*, 2nd Meeting, Stockholm.

Molinas, A. et Yang, C.T. (1985). Generalized water surface profile computations. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 111 (HY3).

Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain nonlinear probles in leats-squares. *Q. Appl. Math.*, (2), 164-168.

Parker, G. (1990). Surface based bedload transport relationship for gravel riviers. *Journal of Hydraulic Research*, 28 (4), 417-436.

Rubey, W. (1933). Setting velocities of gravel, sand and silt particles. *American Journal of Science*, 25.

Termium Plus (2009), Calage. Définition 1, fiche 16. *Banque de données terminologiques et linguistiques du Canada, Travaux publics et services gouvernementaux Canada*. Consulté le 25 avril 2009, tiré de http://www.btb.termiumplus.gc.ca/tpv2alpha/alpha-fra.html?lang=fra&i=1&index=frt&__index=frt&srchtxt=calage

Toffaleti, F.B. (1968). Definative computations of sand discharge in rivers, *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 95 (HY1).

Vidal, J.-P., Moisan, S., Faure, J.-B., & Dartus, D. (2007). River model calibration, from guidelines to operational support tools. *Environmental Modelling and Software*. 22 (11), 1628-1640.

Yang, C.T. (1973). Incipient motion and sediment transport. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 99 (HY10), 1679-1704.

Yang, C.T. (1976). Minimum unit stream power and fluvial hydraulics. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 102 (HY7), 919-934.

Yang, C.T. (1979). Unit stream power equations for total load. *Journal of hydrology*, 40.

Yang, C.T. (1984). Unit stream power equation for gravel. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 110 (HY12).

Yang, C.T., Molinas, A. et Wu, B. (1996). Sediment transport in the Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 122 (5).

Yang, C. T. & Simões F. J. M. (2002). User's Manual for GSTARS3 (Generalized Sediment Transport model for Alluvial River Simulation version 3.0). *U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation Technical Service Center*. 310 pages.

Yang C.T. (2003). *Sediment Transport – Theory and Practice* (2e éd.) Malabar, Fl : Krieger Publishing Company.

ANNEXE A

CARTE – RIVIÈRE ROMAINE

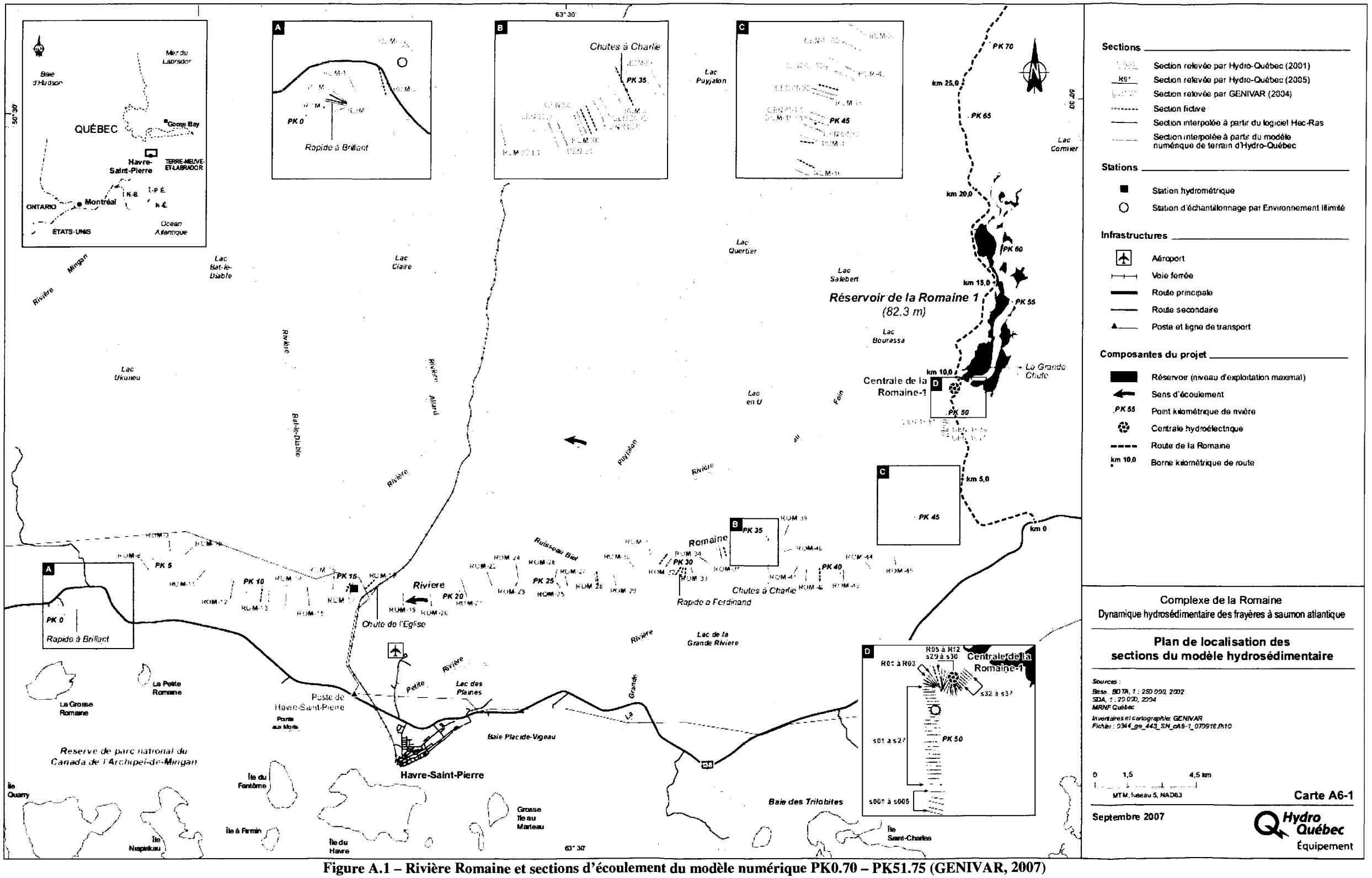


Figure A.1 – Rivière Romaine et sections d'écoulement du modèle numérique PK0.70 – PK51.75 (GENIVAR, 2007)

ANNEXE B

MODÈLE HYDROSÉDIMENTAIRE MHYSER1.0

Le logiciel hydrosédimentaire MHYSER1.0 (Model for the HYdraulics of SEdiments in Rivers, version 1.0), développé par le professeur Mahdi (Mahdi, 2009), permet de modéliser les écoulements en rivières et le transport de sédiments. Il est parmi l'un des plus sophistiqués de son domaine. Il est essentiellement un prolongement de la série populaire GSTARS (Generalized Sediment Tranport model for Alluvial River Simulation), développée au U.S. Bureau of Reclamations par les professeurs Chih Ted Yang, Albert Molinas et Fransico J. M. Simões (Yang et Simões, 2002), avec deux améliorations importantes : l'élimination des erreurs numériques générées par GSTARS3.0 et l'implémentation d'une méthode plus rigoureuse pour analyser la stabilité des berges (Mahdi, 2009).

Malgré ces différences, les logiciels GSTARS3.0 et MHYSER1.0 ont plusieurs points en communs (Mahdi, 2009). Premièrement, ils utilisent une approche découplée pour résoudre le problème du transport solide. Ils effectuent d'abord le calcul de la ligne d'eau, pour ensuite résoudre les équations de transport en conservant les propriétés hydrauliques de l'écoulement constantes. Les deux logiciels permettent aussi de procéder à une simulation quasi non permanente, en approximant l'hydrogramme d'entrée par des bonds successifs de débits constants, et quasi bidimensionnelle, grâce au concept des tubes de courants. Finalement, ils intègrent à leurs algorithmes la théorie sur la minimisation de la puissance totale de l'écoulement, développée par Yang (1992), leur permettant d'estimer simultanément les variations latérales et verticales du fond.

Cette annexe résume le fonctionnement de MHYSER1.0. La description, les théories et les équations présentées suivent cependant la documentation qui accompagne le logiciel GSTARS3.0 (Yang et Simões, 2002).

B.1 Structure du modèle

B.1.1 Schématisation des canaux

La schématisation des canaux est effectuée à l'aide de sections d'écoulements positionnées stratégiquement le long de la rivière et ordonnancées de l'amont vers l'aval. La bathymétrie des sections est décrite par une série de points de discrétisations. Une interpolation linéaire est utilisée pour relier les points ensemble.

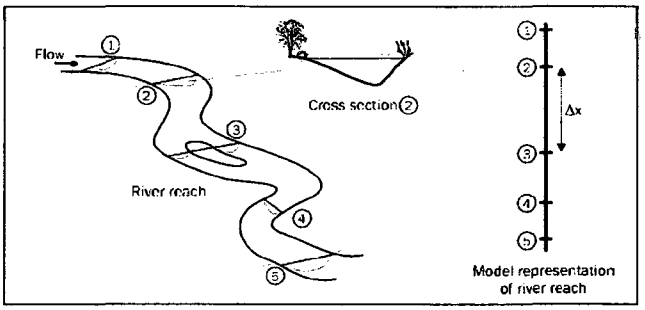


Figure B.1 – Schématisation des canaux (Yang et Simões, 2002).

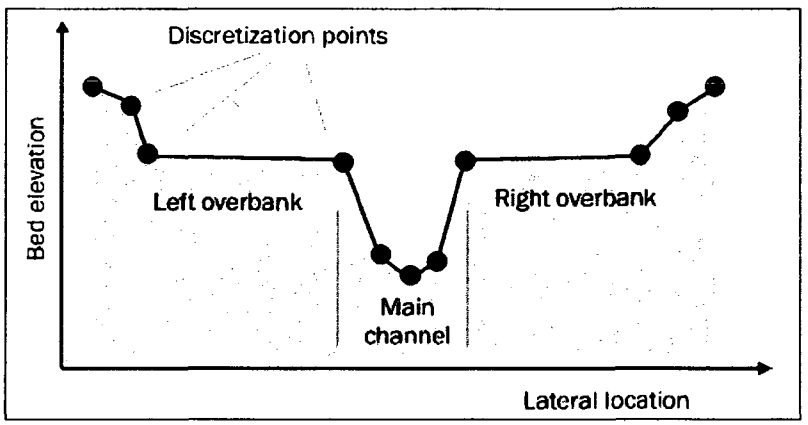


Figure B.2 – Discrétisation des sections d'écoulement (Yang et Simões, 2002)

B.1.2 Simulation quasi non permanente

Fondamentalement, MHYSER1.0 est un logiciel qui ne simule que les écoulements permanents. Or, son domaine d'utilisation peut être épanoui en approximant l'hydrogramme d'entrée d'un écoulement non permanent par un hydrogramme en forme d'escalier, caractérisé par des bonds successifs de débits constants.

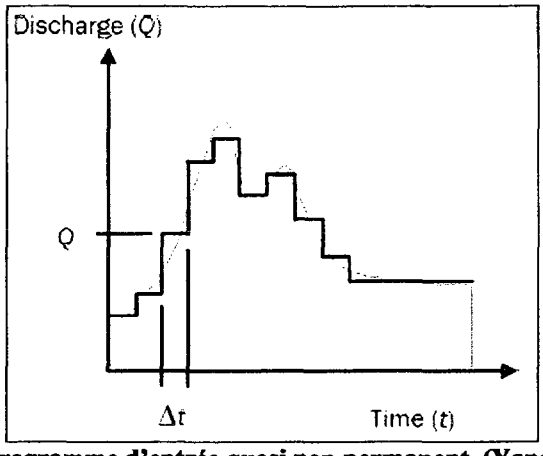


Figure B.3 – Hydrogramme d'entrée quasi non permanent. (Yang et Simões, 2002)

B.1.3 Simulation quasi bidimensionnelle

La simulation quasi bidimensionnelle qu'emploie MHYSER1.0 est un compromis ingénieux entre les méthodes d'analyses unidimensionnelles et bidimensionnelles. Une fois le calcul de la ligne d'eau terminé, chaque tronçon du canal est divisé en travées parallèles de débitance équivalente, nommées tubes de courants. Ces tubes sont ensuite traités comme des sections d'écoulement unidimensionnelles. Ceci permet alors de modéliser simultanément l'érosion et l'aggradation sur une même section tout en conservant la simplicité de résolution des équations unidimensionnelles.

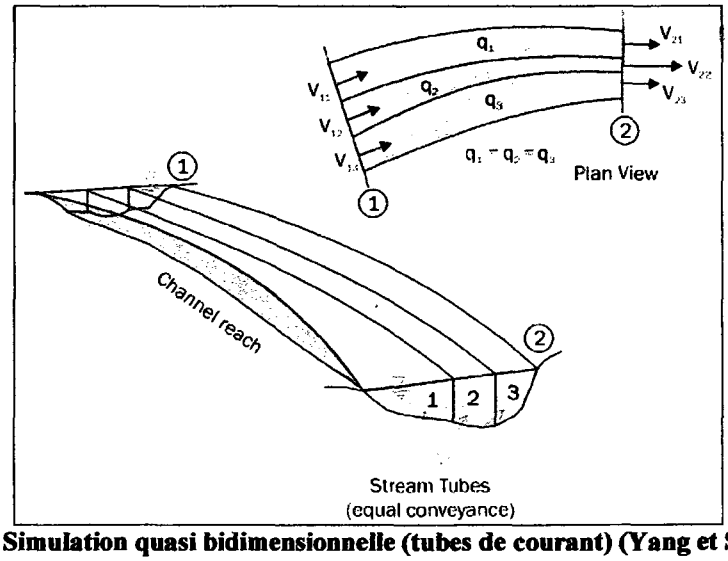


Figure B.4 – Simulation quasi bidimensionnelle (tubes de courant) (Yang et Simões, 2002)

Les tubes de courants sont délimités par des lignes de courants. Ces dernières sont des lignes auxquelles les vecteurs d'écoulement sont tangents en tous points et à tout instant. Aucun échange liquide à travers les frontières des tubes n'est donc possible. Chacun est traité comme un canal unidimensionnel aux paramètres hydrauliques connus. Le débit solide est évalué en considérant les tubes indépendants les uns des autres. La position des frontières est ajustée automatiquement à chaque pas de temps de manière à conserver une débitance équivalente pour l'ensemble des tubes.

L'approche quasi bidimensionnelle possède cependant certaines limites. Premièrement, l'analyse unidimensionnelle de la ligne d'eau aboutie à une surface libre horizontale. Cette simplification peut donc générer des erreurs d'extrapolation lors du positionnement des tubes de courants. D'autres parts, les algorithmes de calculs étant basés sur des équations unidimensionnelles, le logiciel n'est pas en mesure de simuler les phénomènes d'écoulement plus complexes que sont les tourbillons, les remous, les écoulements inversés, les variations latérales de la surface d'eau et l'atténuation hydrographique.

L'adoption d'une méthode de résolution découplée impose, elle aussi, certaines conditions sur l'utilisation du logiciel. Tout d'abord, la variation des propriétés sédimentaires du cours d'eau doit être très faible lorsque comparée à celle des paramètres hydrauliques. D'autre part, le régime d'écoulement doit demeurer à l'extérieur du domaine critique ($0.8 < F_r < 1.2$). Finalement, il est important d'avoir une variation lente des conditions aux frontières. Par chance, les modèles de rivières élaborés dans le cadre d'études hydrosédimentaires tombent rarement dans les zones grises de cette méthode de résolution.

B.2 Ligne d'eau

B.2.1 Modèle généralisé

Le profil de la surface libre est estimé à l'aide du modèle généralisé développé par Molinas et Yang (1985) (Yang et Simões, 2002). Celui-ci combine l'équation de l'énergie (équation B.1) et l'équation de la quantité de mouvement (équation B.2) afin de pouvoir effectuer le calcul de la ligne d'eau sans interruption, même en présence de régimes d'écoulement rapidement variés, tels que les ressauts hydrauliques.

$$H = z + Y + \alpha \frac{V^2}{2g} \qquad \text{Équation B.1}$$

$$M = \frac{Q^2}{Ag} + A\bar{y} \qquad \text{Équation B.2}$$

où H est l'énergie totale, M la quantité de mouvement, z l'élévation du fond par rapport à un niveau de référence, Y la profondeur d'eau, V la vitesse d'écoulement moyenne, α un coefficient de distribution de vitesse, Q le débit liquide, A l'aire de la section mouillée et $\bar{y}$ la profondeur du centroïde de la section, mesurée à partir de la surface libre.

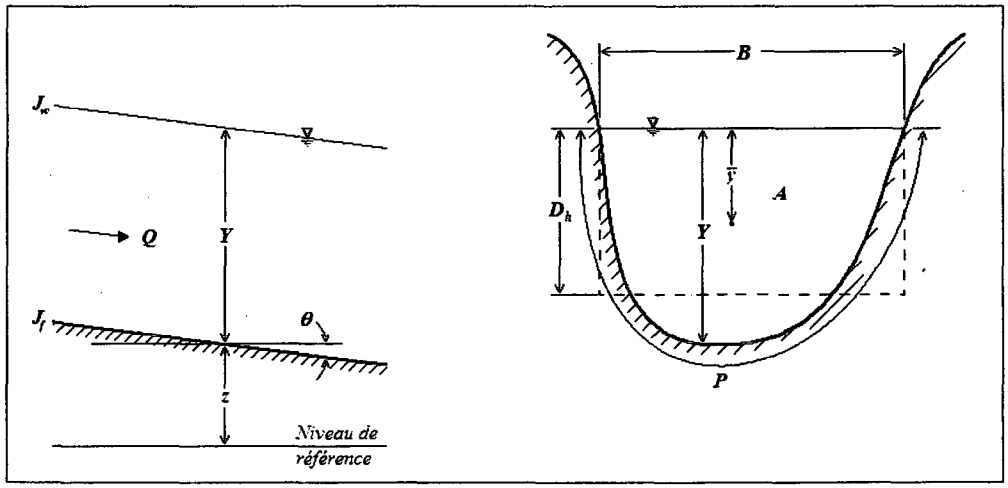


Figure B.5 – Propriétés géométriques d'un écoulement

La méthode itérative de Henderson (1966) permet de converger rapidement vers l'élévation de la surface libre pour chaque section du modèle.

$$Z = \widetilde{Z} - \frac{H - \widetilde{H}}{1 - \widetilde{F}_r^2\left(1 \mp 0.5C_L\right) \mp \frac{3\widetilde{h}_f}{2\widetilde{R}_h}} \qquad \text{Équation B.3}$$

où Z est l'élévation de la surface libre ($Z = z + Y$), F_r le nombre de Froude, C_L un coefficient de perte d'énergie, h_f les pertes de charge, R_h le rayon hydraulique et le tilde ($\widetilde{\ }$) dénote les propriétés estimées à partir de l'élévation obtenue lors de l'itération précédente.

La valeur de $\widetilde{H}$ est évaluée selon l'équation B.1 tandis que celle de H provient de l'addition ou la soustraction des pertes de charge à l'énergie totale d'une section adjacente, aux propriétés hydrauliques connues. Le processus se termine lorsque la valeur de $\left|H - \widetilde{H}\right|$ est inférieure à une limite établie par défaut ou dictée par l'usager. Le calcul de la ligne d'eau procède de l'aval vers l'amont pour les écoulements subcritiques et de l'amont vers l'aval pour les écoulements supercritiques.

L'équation de l'énergie satisfait aux besoins de ce calcul pourvu qu'il n'y ait pas apparence de régime transitoire. Lorsqu'une transition supercritique → subcritique ou critique → subcritique est détectée entre deux sections successives, le logiciel procède à la recherche d'un ressaut hydraulique sur le tronçon visé. Il utilise l'équation de la quantité de mouvement (équation B.2) pour positionner le phénomène et estimer ces hauteurs conjuguées.

B.2.2 Pertes de charge

Les pertes de charge linéaires, h_L, résultent du produit entre la pente énergétique moyenne de l'écoulement et la longueur du tronçon.

$$h_L = S_{f,moy}\Delta x \qquad \text{Équation B.4}$$

où $S_{f,moy}$ est la pente énergétique moyenne et Δx la longueur du tronçon.

Le logiciel admet que ces pertes peuvent être évaluées à partir d'une formule développée pour un écoulement uniforme. La pente énergétique, S_f, peut alors être estimée à partir de la relation suivante :

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \qquad \text{Équation B.5}$$

où Q est le débit liquide et K la débitance d'une section.

MHYSER1.0 met à la disposition de l'usager les formules de Manning, Chézy et Darcy-Weisbach pour résoudre l'équation B.5.

Manning : $K = \frac{1.49}{n} A R_h^{2/3}$ Équation B.6

Chézy : $K = C A R_h^{1/2}$ Équation B.7

Darcy-Weisbach : $K = \left(\frac{8gR_h}{f}\right)^{1/2} A$ Équation B.8

où n, C et f sont respectivement les coefficients de rugosité de Manning, Chézy et Dary-Weisbach, A l'aire de la section mouillée et R_h le rayon hydraulique.

La pente énergétique d'un tronçon est représentée par la moyenne entre les pentes énergétiques ponctuelles des sections qui le bornent. Quatre équations sont offertes pour calculer cette moyenne.

Moyenne algébrique : $S_{f,moy} = \frac{S_{f,1} + S_{f,2}}{2}$ Équation B.9

Moyenne géométrique : $S_{f,moy} = \sqrt{S_{f,1} S_{f,2}}$ Équation B.10

Moyenne harmonique : $S_{f,moy} = \frac{2 S_{f,1} S_{f,2}}{S_{f,1} + S_{f,2}}$ Équation B.11

Débitance moyenne : $S_{f,moy} = \left(\frac{2Q}{K_1 + K_2}\right)^2$ Équation B.12

Aux pertes de charge linéaires doivent être ajoutées les pertes de charge causées par l'expansion ou la contraction du canal, h_E, et les pertes de charge singulières, h_B, générées par un coude ou une structure artificielle.

$$h_E = C_E \left| \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right| \qquad \text{Équation B.13}$$

$$h_B = C_B \frac{V_2^2}{2g} \qquad \text{Équation B.14}$$

B.3 Transport solide

B.3.1 Équations fondamentales

Le système d'équations de Saint-Venant – Exner gouverne les écoulements sur fond mobile. Les équations de Saint-Venant (équations de continuité et de dynamique) décrivent le mouvement de la phase liquide tandis que l'équation d'Exner (équation de continuité) régit le déplacement des particules solides.

L'équation de continuité appliquée à la phase solide qu'utilise MHYSER1.0 exprime la conservation de la masse pour un écoulement unidimensionnel et non permanent.

$$\eta \frac{\partial A_d}{\partial t} + \frac{dQ_s}{dx} = q_{lat} \qquad \text{Équation B.15}$$

où Q_s est le débit solide volumétrique, A_d l'aire de section pour une couche unitaire du lit, η le volume de sédiments contenu dans cette couche (η = 1 – porosité) et q_{lat} l'apport solide latéral.

Cette formulation admet que la variation de la concentration de sédiments en suspension est beaucoup plus faible que la variation du niveau du lit et que, pour un pas de temps fini, le débit solide peut être considéré comme étant permanent.

$$\frac{\partial A_s}{\partial t} << \eta \frac{\partial A_d}{\partial t} \qquad \text{Équation B.16}$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial t} = 0 \qquad \text{Équation B.17}$$

$$\frac{\partial Q_s}{\partial x} = \frac{dQ_s}{dx} \qquad \text{Équation B.18}$$

où A_s le volume de sédiments en suspension par unité de longueur au sein de la section d'écoulement.

Une discrétisation des termes de l'équation B.15 permet d'estimer la variation de l'élévation du lit de la rivière.

$$\frac{\partial A_d}{\partial t} \approx \frac{(aT_{i-1} + bT_i + cT_{i+1})\Delta Z_i}{\Delta t} \qquad \text{Équation B.19}$$

$$\frac{dQ_s}{dx} \approx \frac{2(Q_{s,i} - Q_{s,i-1})}{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}} \qquad \text{Équation B.20}$$

$$\Delta Z_{i,k} = \frac{\Delta t}{\eta_i} \frac{q_{lat}(\Delta x_i + \Delta x_{i-1}) + 2(Q_{s,i-1,k} - Q_{s,i,k})}{(aT_{i-1} + bT_i + cT_{i+1})(\Delta x_i + \Delta x_{i-1})} \qquad \text{Équation B.21}$$

$$\Delta Z_i = \sum_{k=1}^{N} \Delta Z_{i,k} \qquad \text{Équation B.22}$$

où a, b, et c sont des constantes dont la somme doit être égale à 1.0, k représente l'indice des fractions granulométriques présentes dans le lit, i est l'indexe des sections, T le périmètre mouillé, ΔZ la variation de l'élévation du fond, Δx la distance entre les sections, Δt le pas de temps et N est le nombre total de fractions granulométriques.

La stabilité numérique de l'algorithme est assurée par le critère de Courant-Friedrichs-Lewy (condition CFL).

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{c_s} \qquad \text{Équation B.23}$$

où c_s est la vitesse de propagation de la vague cinématique représentant la variation du lit.

B.3.2 Modèles de transport solide

B.3.2.1 Capacité de transport

Le logiciel offre 19 formules permettant d'estimer la capacité de transport des écoulements, soit 15 pour les matériaux non cohésifs et 4 pour les matériaux cohésifs. Les théories sur lesquelles s'appuient ces équations ont été discutées au chapitre 1,

section 1.5. Les formules associées au transport de matériaux non cohésifs sont regroupées en deux catégories, selon le mode de transport auquel elles s'appliquent (par charriage ou transport total), et les équations liées aux matériaux cohésifs sont séparées selon que le régime d'écoulement soit en déposition ou en érosion.

Tableau B.1 – Équations de transport incluses dans MHYSER1.0 pour les matériaux non cohésifs

Matériaux non cohésifs	
1 – DuBoys (1897)	Transport par charriage
2 – Meyer-Peter et Müller (1948)	Transport par charriage
3 – Parker (1990)	Transport par charriage
4 – Laursen (1958)	Transport total
5 – Laursen modifiée (1993)	Transport total
6 – Toffaleti (1969)	Transport total
7 – Engelund et Hansen (1972)	Transport total
8 – Ackers et White (1973)	Transport total
9 – Ackers et White révisée (1990)	Transport total
10 – Yang sable (1973)	Transport total
11 – Yang sable (1979)	Transport total
12 – Yang gravier (1984)	Transport total
13 – Yang sable modifiée (1996)	Transport total
14 – Ashida et Michiue (1972)	Transport total
15 – Université de Tsinghua (1985)	Transport total

Tableau B.2 – Équations de transport incluses dans MHYSER1.0 pour les matériaux cohésifs

Matériaux cohésifs
1 – Déposition (chute libre)
2 – Déposition (chute restreinte)
3 – Érosion de surface
4 – Érosion de masse

B.3.2.2 Érosion et aggradation

Outre la capacité de transport de l'écoulement, la modélisation hydrosédimentaire doit tenir compte de la quantité de sédiments présents sur le fond et étant disponibles pour le transport. Le débit solide ne peut emporter des particules inexistantes. Afin de gérer la logistique entre le débit solide théorique et le débit solide réel, MHYSER1.0

applique le modèle de transport développé par Bennett et Nordin (1977) (Mahdi, 2009). Ce dernier sépare astucieusement le lit du canal en un maximum de trois couches (voir figure B.6).

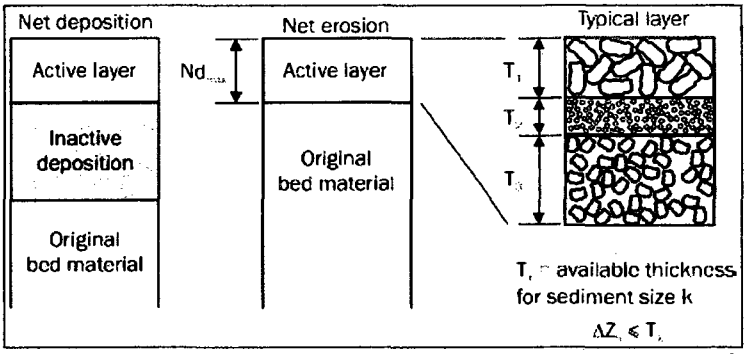


Figure B.6 – Modèle de Bennett et Nordin (1977). (Yang et Simões, 2002)

La couche active contient l'ensemble des sédiments disponibles pour le transport. Son épaisseur est réglementée par un coefficient multiplicateur appliqué au diamètre représentatif de la plus grosse fraction granulométrique contenant au moins 1% des particules. Le modèle divise cette couche en différentes sous-couches à granulométrie uniforme. Leur épaisseur est proportionnelle à la quantité de matériel contenu dans chaque fraction granulométrique du lit. En régime d'érosion, la variation de l'élévation du fond est limitée par l'épaisseur de ces sous-couches.

$$\Delta Z_k \leq T_k \qquad \text{Équation B.24}$$

où T_k est l'épaisseur de la sous-couche associée à la fraction granulométrique k.

L'épaisseur de la couche active est étroitement liée avec le pas de temps sédimentaire. Plus le pas de temps est long, plus l'épaisseur doit être grande afin de ne pas artificiellement limiter l'érosion. La couche inactive n'est utilisée qu'en présence d'une aggradation nette du fond. Elle enregistre l'accumulation des dépôts et ajuste la granulométrie de la couche active en conséquence. La dernière couche est caractérisée par la granulométrie originale du lit, soit celle fournie lors de l'élaboration du modèle. Elle possède une profondeur infinie et alimente la couche active lorsqu'en présence d'un régime d'érosion nette.

L'information granulométrique est conservée à chaque point de discrétisation des sections et est mise à jour à tous les pas de temps. Au début de chaque itération, une fois les frontières des tubes de courant repositionnées, cette information sert à régénérer l'épaisseur des différentes couches du modèle.

B.3.2.3 Transport latéral

Les particules solides se déplacent généralement selon une trajectoire qui diffère de celle de l'écoulement et de la contrainte de cisaillement. La déviation résulte des phénomènes de transport locaux, causés par les cellules d'écoulements secondaires et les pentes transversales non nulles. En présence d'un écoulement en courbe, il est possible d'observer un certain lessivage des sédiments, où les grosses particules sont projetées vers l'extérieure et les petites vers l'intérieure.

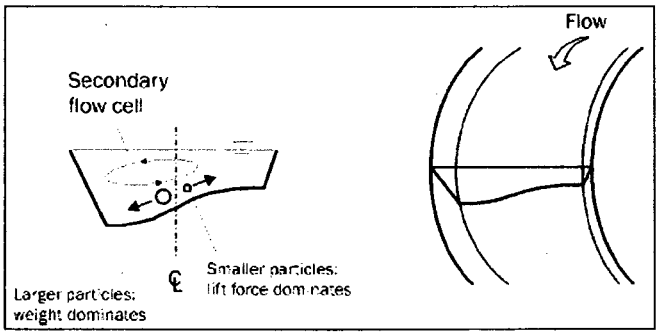


Figure B.7 – Modèles de Kikkawa et coll. (1976) et Ikeda et coll. (1987) (Yang et Simões, 2002).

Le logiciel adopte alors les modèles proposés par Kikkawa *et coll.* (1976) et Ikeda *et coll.* (1987) pour décrire ce mouvement. La direction de transport est obtenue à partir de la relation suivante :

$$\frac{q_r}{q_s} = \tan(\sigma) = \tan(\beta) + \frac{1+\alpha\mu}{\lambda\mu}\sqrt{\frac{\tau_0^*}{\tau^*}}\tan(\delta) \qquad \text{Équation B.25}$$

où q_r et q_s sont obtenus à partir des équations B.26 et B.27 respectivement, σ est l'angle entre la direction de transport et la direction de l'écoulement, β l'angle entre la contrainte de cisaillement et la direction de l'écoulement, α le rapport entre la force de soulèvement et celle de traînée (fixé empiriquement à 0,85), μ le coefficient de friction dynamique de Coulomb (μ = 0,43), λ le coefficient de protection (λ = 0,59), τ_0^* et τ^* les forces de cisaillement adimensionnelles critiques et nominales, respectivement, et δ la pente de fond transversale.

$$q_r = q_t \sin(\sigma)$$ Équation B.26

$$q_s = q_t \cos(\sigma)$$ Équation B.27

où q_t est le débit solide.

Le modèle de transport latéral n'est appliqué qu'aux sédiments en transport par charriage. Il est possible de constater que les équations B.25, B.26 et B.27 permettent aux particules solides de traverser les frontières des tubes de courants. Puisque ces particules possèdent une trajectoire qui diffère de celle de l'écoulement ainsi que celle de la contrainte de cisaillement, les conditions établies pour l'utilisation des tubes sont respectées (voir section B.1.3).

B.3.2.4 Transport par charriage et en suspension

MHYSER1.0 effectue le clivage entre le transport par charriage et le transport en suspension à l'aide du critère de van Rijn (1984), basé sur les vitesses de frottement nominale et critique des sédiments. Lorsque la vitesse nominale est plus élevée que la vitesse critique, le logiciel considère que les particules sont en suspension.

$$u^*_{cr,s} = \begin{cases} \dfrac{4\omega_s}{D^*} & 1 < D^* \leq 10 \\ 0{,}4\omega_s & D^* > 10 \end{cases}$$ Équation B.28

$$D^* = d\left[\frac{(s-1)g}{\nu^2}\right]^{1/3}$$ Équation B.29

où $u^*_{cr,s}$ est la vitesse de frottement critique, ω_s la vitesse de chute, d est le diamètre de la particule, s son poids spécifique et ν la viscosité dynamique de l'eau.

B.4 Minimisation de la puissance totale de l'écoulement

La puissance totale, Φ_T, peut être obtenue en intégrant la puissance de l'écoulement sur l'ensemble de la section.

$$\Phi_T = \int \gamma Q S dx$$ Équation B.30

où γ est le poids volumique de l'eau, Q le débit liquide et S la pente énergétique.

L'équation B.30 peut être discrétisée selon la méthode proposée par Chang (1982a).

$$\Phi_T = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \gamma (Q_i S_i + Q_{i+1} S_{i+1}) \Delta x \qquad \text{Équation B.31}$$

où N est le nombre de sections d'écoulement et Δx la distance entre les sections i et $i+1$.

La variation de la section s'effectue selon la direction (latérale ou verticale) pour laquelle l'équation B.31 est minimum. Seuls les tubes de courants adjacents aux berges du canal peuvent subir un élargissement.

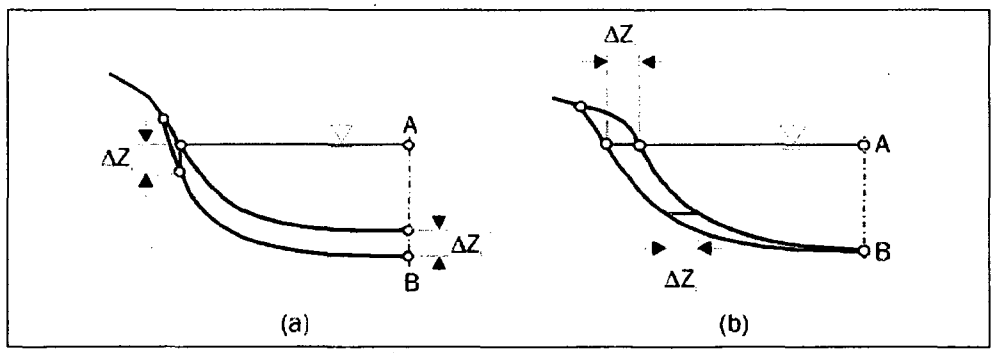


Figure B.8 – Variation verticale ou latérale du lit selon la minimisation de la puissance totale de l'écoulement (Yang et Simões, 2002).

ANNEXE C

GUIDE D'UTILISATION DU LOGICIEL OPTIMHYSER

Le logiciel OptiMHYSER offre une méthode de calage automatisé pour tout modèle de rivière basé sur le logiciel hydrosédimentaire MHYSER. Une interface graphique simple et conviviale permet de choisir les paramètres d'optimisation et d'observation désirés pour caler le modèle. La procédure de calibration est entièrement autonome et une fois lancée ne nécessite aucune intervention supplémentaire de la part de l'usager. Lorsque terminée, elle retourne le modèle avec la valeur finale des paramètres d'optimisation donnant lieu au plus faible écart entre les données d'observation calculées et les données d'observation désirées.

OptiMHYSER intègre à son algorithme le logiciel PEST, développé spécifiquement pour le calage automatique de modèles numériques. Ce logiciel est utilisé pour optimiser les paramètres continus du modèle MHYSER. OptiMHYSER configure automatiquement PEST et génère tous les fichiers de données nécessaires à son exécution. Le logiciel est structuré de manière à permettre son utilisation, peu importe le niveau d'expertise que possède l'usager avec PEST.

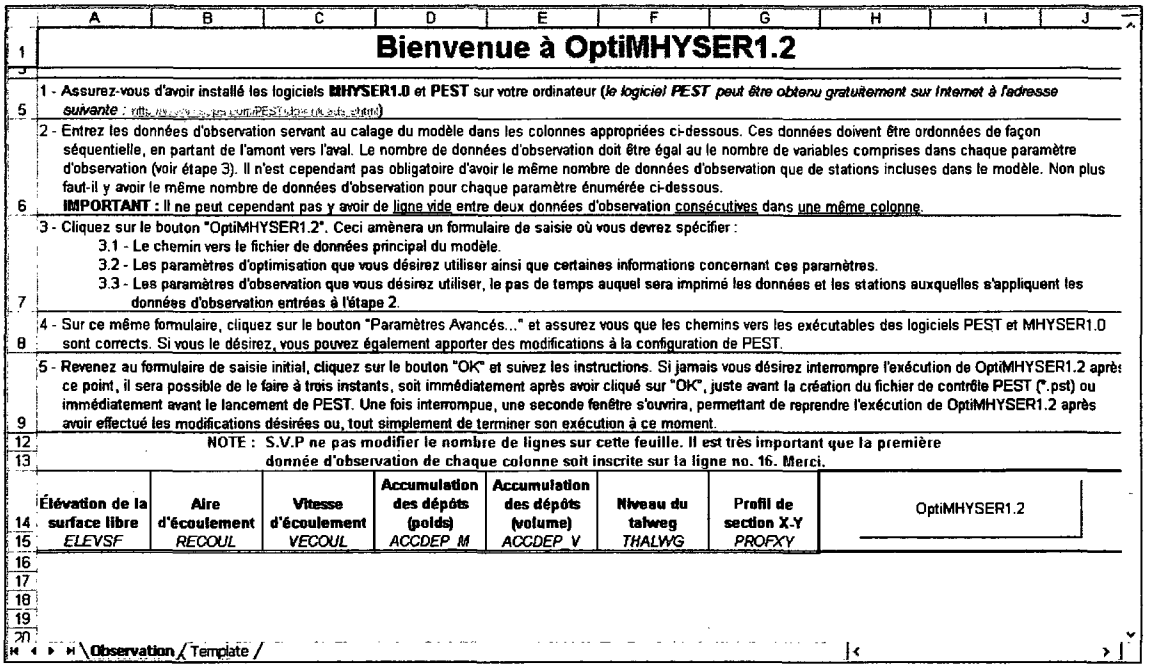
Cette annexe présente en détail le fonctionnement d'OptiMHYSER. Elle décrit les diverses interfaces du logiciel et discute de l'information qui doit y être inscrite.

C.1 Classeur "OptiMHYSER1.2.xls"

À l'ouverture du classeur "*OptiMHYSER1.2.xls*" s'affiche la première de deux feuilles de calculs (figure C.1). Elle possède une version abrégée du mode d'emploi du logiciel, un espace réservé pour l'inscription des données d'observations désirées et un bouton de commande permettant de lancer OptiMHYSER.

La deuxième feuille du classeur, intitulée « Template », est utilisée lors de l'importation du fichier de données du modèle MHYSER. Elle facilite l'identification des paramètres d'optimisation et l'attribution des noms de variables en plus de servir à

la création du fichier gabarit principal, requis pour l'exécution de PEST. Cette feuille peut être consultée, mais aucune modification ne devrait lui être apportée.



Bienvenue à OptiMHYSER1.2

1 - Assurez-vous d'avoir installé les logiciels **MHYSER1.0** et **PEST** sur votre ordinateur (*le logiciel PEST peut être obtenu gratuitement sur Internet à l'adresse suivante :* http://www.sspa.com/PEST/pest.html)

2 - Entrez les données d'observation servant au calage du modèle dans les colonnes appropriées ci-dessous. Ces données doivent être ordonnées de façon séquentielle, en partant de l'amont vers l'aval. Le nombre de données d'observation doit être égal au le nombre de variables comprises dans chaque paramètre d'observation (voir étape 3). Il n'est cependant pas obligatoire d'avoir le même nombre de données d'observation que de stations incluses dans le modèle. Non plus faut-il y avoir le même nombre de données d'observation pour chaque paramètre énumérée ci-dessous.
IMPORTANT : Il ne peut cependant pas y avoir de ligne vide entre deux données d'observation consécutives dans une même colonne.

3 - Cliquez sur le bouton "OptiMHYSER1.2". Ceci amènera un formulaire de saisie où vous devrez spécifier :
3.1 - Le chemin vers le fichier de données principal du modèle.
3.2 - Les paramètres d'optimisation que vous désirez utiliser ainsi que certaines informations concernant ces paramètres.
3.3 - Les paramètres d'observation que vous désirez utiliser, le pas de temps auquel sera imprimé les données et les stations auxquelles s'appliquent les données d'observation entrées à l'étape 2.

4 - Sur ce même formulaire, cliquez sur le bouton "Paramètres Avancés..." et assurez vous que les chemins vers les exécutables des logiciels PEST et MHYSER1.0 sont corrects. Si vous le désirez, vous pouvez également apporter des modifications à la configuration de PEST.

5 - Revenez au formulaire de saisie initial, cliquez sur le bouton "OK" et suivez les instructions. Si jamais vous désirez interrompre l'exécution de OptiMHYSER1.2 après ce point, il sera possible de le faire à trois instants, soit immédiatement après avoir cliqué sur "OK", juste avant la création du fichier de contrôle PEST (*.pst) ou immédiatement avant le lancement de PEST. Une fois interrompue, une seconde fenêtre s'ouvrira, permettant de reprendre l'exécution de OptiMHYSER1.2 après avoir effectué les modifications désirées ou, tout simplement de terminer son exécution à ce moment.

NOTE : S.V.P ne pas modifier le nombre de lignes sur cette feuille. Il est très important que la première donnée d'observation de chaque colonne soit inscrite sur la ligne no. 16. Merci.

Élévation de la surface libre *ELEVSF*	Aire d'écoulement *RECOUL*	Vitesse d'écoulement *VECOUL*	Accumulation des dépôts (poids) *ACCDEP_M*	Accumulation des dépôts (volume) *ACCDEP_V*	Niveau du talweg *THALWG*	Profil de section X-Y *PROFXY*	OptiMHYSER1.2

\Observation / Template /

Figure C.1 – Page d'accueil du classeur *Microsoft Excel* auquel s'intègre le logiciel OptiMHYSER.

C.2 Mode d'emploi d'OptiMHYSER

C.2.1 Installation des logiciels PEST et MHYSER

Il est d'abord important d'avoir installé les logiciels PEST et MHYSER sur le même ordinateur qu'est exécuté OptiMHYSER. Le fichier de données du modèle doit aussi être présent et dûment complété. Il doit contenir tous les paramètres nécessaires pour accomplir une simulation MHYSER avec succès. L'ensemble de ces fichiers peut se retrouver sous le même répertoire ou être séparé dans trois répertoires distincts. Le chemin vers chaque fichier d'importance devra être spécifié ultérieurement dans l'exécution d'OptiMHYSER.

C.2.2 Inscription des données d'observation désirées

Ensuite vient l'inscription des données d'observation désirées sur la feuille « Observation » du classeur *Excel*. Elles doivent être entrées en ordre séquentiel, en partant de l'amont vers l'aval, sous leurs colonnes respectives. Chaque colonne est associée à un paramètre d'observation spécifique. La première donnée doit toujours être inscrite sur la ligne n° 16 et il ne peut jamais y avoir de cellule vide entre deux données d'observation consécutives sous une même colonne. Le nombre de données inscrites pour chaque paramètre doit être inférieur ou égal au nombre de sections que contient le modèle (exception faite du paramètre « PROFXY »). Il n'est cependant pas obligatoire d'avoir le même nombre de données pour chaque paramètre utilisé. La liaison entre les données d'observation et les sections du modèle est effectuée lors de la sélection des paramètres d'observation dans OptiMHYSER (voir section C.3.1.3).

En ce qui concerne le paramètre « PROFXY », le nombre de données d'observation utilisées doit correspondre à la somme des points de discrétisation qui décrivent chaque section choisie. Les données doivent représenter l'élévation finale observée pour les points inscrits au fichier de d'entrée du modèle (nouvelle coordonnée 'y' pour même coordonnée 'x'). Ceci fait donc abstraction des points intermédiaires, ajoutés automatiquement par MHYSER au cours de son exécution. De la même façon que pour les autres paramètres, il n'est pas nécessaire d'avoir des données pour toutes les sections.

C.2.3 Activation d'OptiMHYSER

OptiMHYSER est maintenant prêt à être activé en appuyant sur le bouton « OptiMHYSER1.2 ». Le formulaire de saisie principal du logiciel s'affiche (figure C.8). Ici doit être inscrite l'information d'usage relative au fichier de données du modèle MHYSER ainsi qu'aux paramètres d'optimisation et d'observation utilisés. Le fonctionnement du formulaire est détaillé à la section C.3.1 de cette annexe.

C.2.4 Vérification des paramètres avancés

Le bouton « Paramètres Avancés ... » permet de faire afficher le formulaire de saisie contenant les paramètres avancés d'OptiMHYSER (figure C.9). Ces paramètres regroupent les chemins vers les fichiers exécutables de PEST et de MHYSER ainsi que certains paramètres de contrôles PEST. Le fonctionnement de ce formulaire est détaillé à la section C.3.2 de cette annexe.

C.2.5 Lancement d'OptiMHYSER

OptiMHYSER est maintenant prêt à être lancé. Une série d'interrogations initialisent le logiciel et permettent de s'assurer qu'il est bien configuré, après quoi ce dernier prend le contrôle du processus de calage. Si jamais l'exécution d'OptiMHYSER doit être interrompue, il est possible de le faire à trois occasions : une première fois immédiatement après avoir appuyé sur le bouton « OK » du formulaire de saisie principal, une seconde fois juste avant la création du fichier de contrôle PEST (*.*pst*) puis une dernière fois juste avant le lancement de PEST. Lorsqu'interrompu, le logiciel affiche une fenêtre permettant de reprendre ou cesser définitivement son exécution (figure C.2).

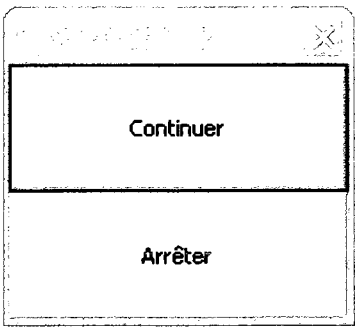


Figure C.2 – Fenêtre permettant de reprendre ou cesser définitivement l'exécution d'OptiMHYSER lorsqu'interrompue.

C.2.5.1 Interrogation no. 1

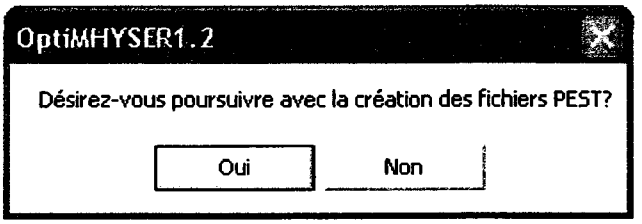


Figure C.3 – Première interrogation après avoir lancé OptiMHYSER.

Ceci est la première occasion pour interrompre l'exécution d'OptiMHYSER. Jusqu'ici, l'information inscrite aux formulaires de saisies a été enregistrée, mais aucune action n'a été entreprise par le logiciel pour créer les fichiers nécessaires au lancement de PEST (fichiers portant les extensions **.tpl*, **.inp*, **.ins* et **.pst*). Une réponse négative permet d'arrêter l'exécution d'OptiMHYSER et peut s'avérer une manière efficace de sauvegarder la configuration avant de quitter logiciel.

C.2.5.2 Interrogation no. 2

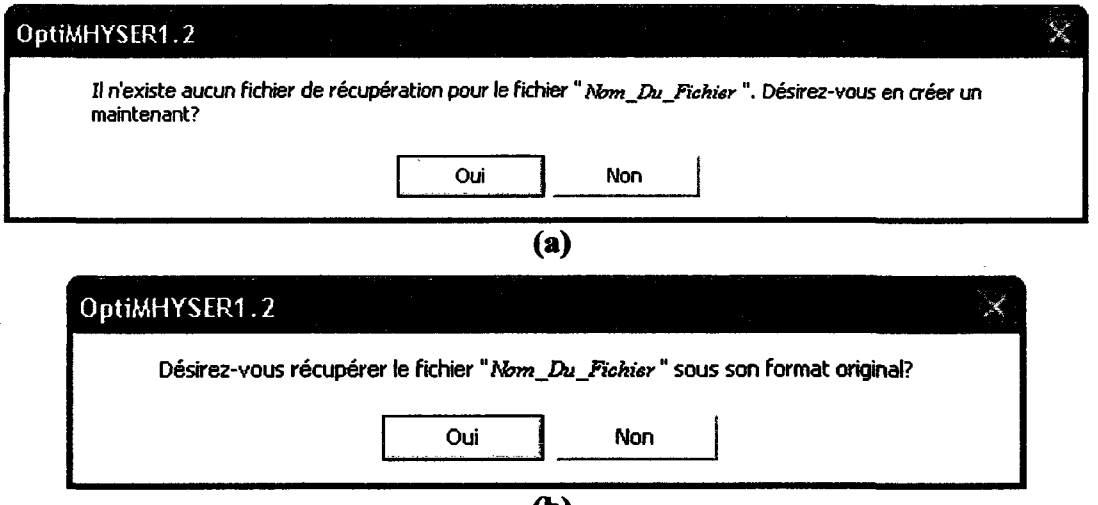


Figure C.4 – Deuxième interrogation après avoir lancé OptiMHYSER; (a) s'il n'existe aucun fichier de récupération pour le fichier de données du modèle, (b) si un fichier de récupération est détecté.

OptiMHYSER vérifie maintenant s'il existe un fichier de récupération pour le fichier de données du modèle. S'il n'en existe aucun, l'interrogation 2a est affichée. Celle-ci

permet de faire une copie exacte du fichier de données, tel qu'il est à cet instant. La copie est sauvegardée sous le même répertoire que le fichier de données et possède le même nom, suivi de l'expression "[BackUp]".

Si un fichier de récupération est déjà présent, l'interrogation 2b est affichée. Celle-ci permet de restaurer le fichier de données sous son format original, selon les informations contenues dans ce fichier.

Il est fortement recommandé d'avoir un fichier de récupération, car le fichier de données est soumis à des modifications permanentes au cours du processus de calage. De cette manière, si des calages successifs utilisant différentes configurations de paramètres d'optimisation sont requis, le fichier de données du modèle peut être récupéré sous son format original avant chaque opération.

C.2.5.3 Interrogation no. 3

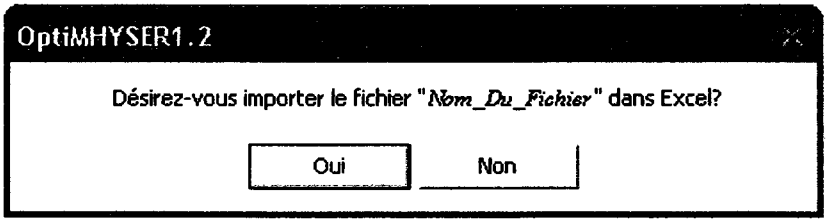


Figure C.5 – Troisième interrogation après avoir lancé OptiMHYSER.

Une réponse positive à cette troisième interrogation permet d'importer automatiquement le fichier de données du modèle sur la feuille « Template » du classeur *Excel*. S'il s'agit du premier lancement d'OptiMHYSER avec le modèle en question, cette étape est incontournable. Sinon, cette opération est seulement nécessaire lorsque différentes configurations des paramètres d'optimisation sont utilisées.

C.2.5.4 Interrogation no. 4

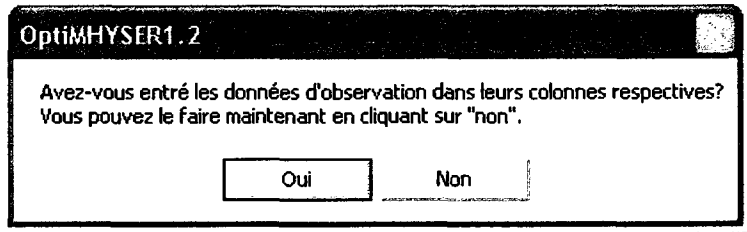
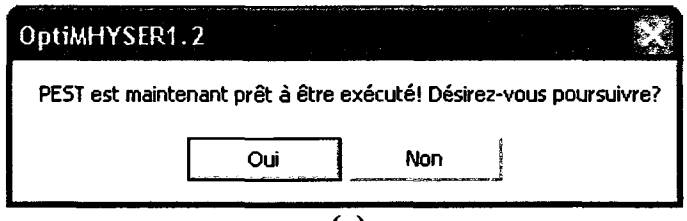


Figure C.6 – Quatrième interrogation après avoir lancé OptiMHYSER.

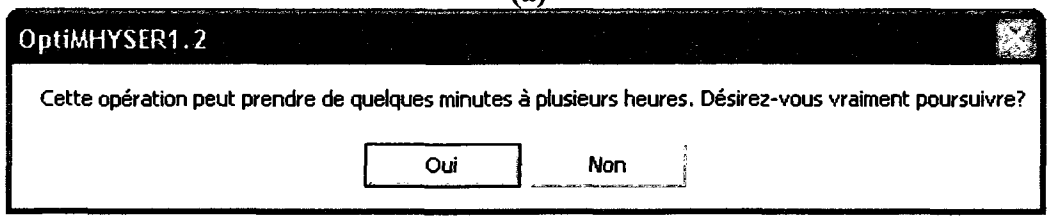
Ici se présente la deuxième occasion pour interrompre l'exécution d'OptiMHYSER. Le logiciel s'apprête à créer le fichier de contrôle PEST (*.*pst*) et y intégrer les données d'observations désirées. Si jamais celles-ci n'ont pas été inscrites au bon endroit sur la feuille « Observation », le logiciel peut être mis en veille afin d'apporter les corrections nécessaires.

Lors de la création du fichier de contrôle, OptiMHYSER vérifie continuellement si le nombre de données d'observation désirées correspond au nombre de variables d'observation identifiées pour chaque paramètre. Cette condition est essentielle pour le bon fonctionnement de PEST. Si jamais ces deux nombres ne coïncident pas, le logiciel affiche un avertissement et cesse son exécution.

C.2.5.5 Interrogation no. 5 et no. 6



(a)



(b)

Figure C.7 – (a) Cinquième et (b) sixième interrogation après avoir lancé OptiMHYSER

Ces deux interrogations successives constituent l'occasion finale pour interrompre l'exécution d'OptiMHYSER. Les fichiers requis pour le lancement de PEST ont tous été créés et le logiciel est sur le point d'amorcer le calage du modèle. Une réponse négative à l'une de ces deux interrogations met OptiMHYSER en veille et permet de vérifier si les fichiers concernés ne contiennent pas d'erreurs. Ces derniers sont sauvegardés sous le même répertoire que le fichier de données.

Le temps d'exécution de PEST est étroitement lié au temps requis pour compléter une simulation MHYSER. Pour chaque itération, l'algorithme de calcul nécessite quelques lancements préliminaires du logiciel pour ajuster le lambda de Marquardt, puis autant de lancements qu'il y a de variables d'optimisation pour évaluer les dérivées partielles (le double de ce nombre si la méthode des différences finies centrées est utilisée). Il est donc possible de constater que le nombre de simulations MHYSER effectuées augmente de façon exponentielle. Plus le temps requis pour compléter une simulation est élevé, plus le temps d'exécution de PEST sera long. Malheureusement, il est impossible d'interrompre l'exécution de ce logiciel sans générer une erreur fatale pour OptiMHYSER.

C.3 Formulaires de saisies

C.3.1 Formulaire « OptiMHYSER1.2 »

Le formulaire de saisie « OptiMHYSER1.2 » est l'interface principale du logiciel. Il peut être séparé en quatre sections élémentaires (figure C.8). Lors de son lancement, le formulaire affiche toujours la dernière configuration d'OptiMHYSER sauvegardée.

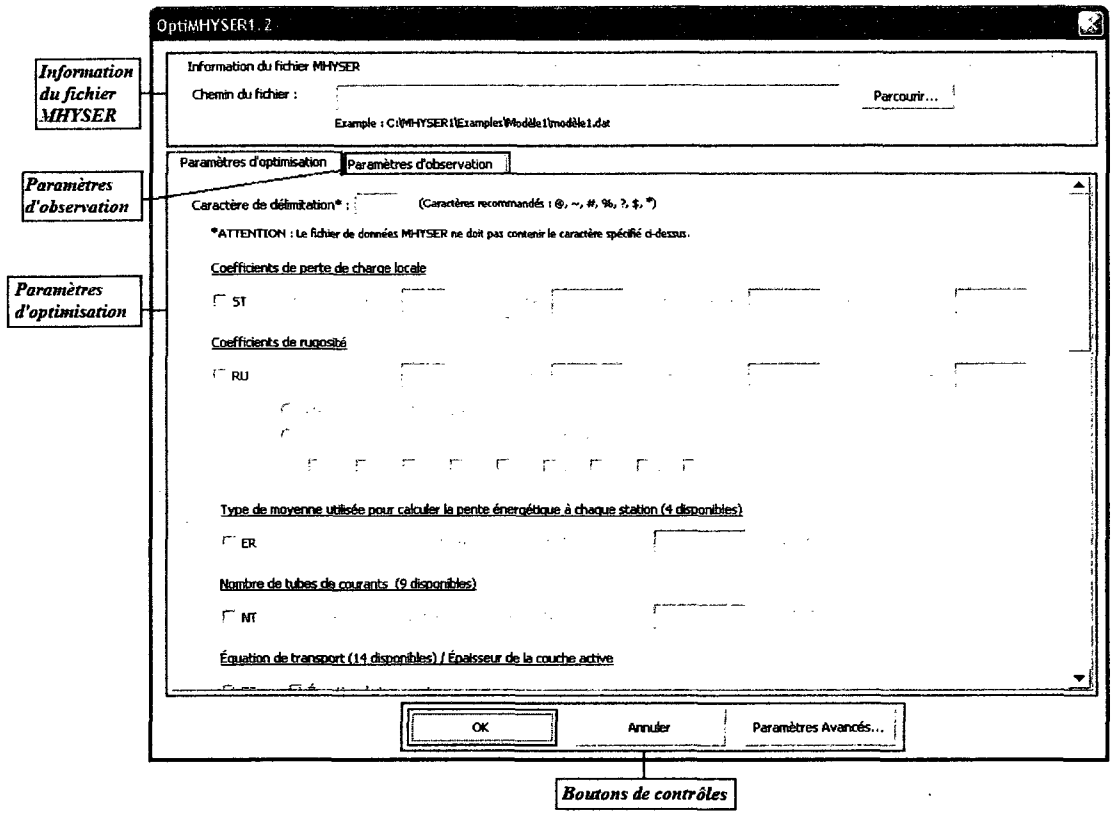


Figure C.8 – Formulaire de saisie « OptiMHYSER1.2 ».

C.3.1.1 Information du fichier MHYSER

Sous la section « Information du fichier MHYSER » doit être entré le chemin vers le fichier de données du modèle. Le bouton « Parcourir… » permet de naviguer parmi les répertoires de l'ordinateur afin d'atteindre le fichier désiré. L'outil de recherche filtre par défaut les fichiers ayant l'extension **.dat*. Cependant, une fois lancé, il est possible de modifier le filtre appliqué.

C.3.1.2 Onglet « Paramètres d'optimisation »

L'onglet « Paramètres d'optimisation » sert à spécifier le caractère de délimitation et choisir les paramètres d'optimisation. Le caractère de délimitation est utilisé lors de la création du fichier gabarit principal. Il démarque l'espace réservé aux paramètres dans le fichier de données. La sélection doit être faite parmi les caractères recommandés à la

droite de la case d'entrée. Le fichier de données ne doit cependant pas contenir au départ le caractère choisi.

Ensuite défilent les huit paramètres d'optimisation. Chacun d'entre eux est identifié par un court titre et porte le même nom que le paramètre MHYSER auquel se rattache l'information. Les paramètres désirés doivent être cochés. Lorsqu'un paramètre est sélectionné, la région à sa droite s'active, permettant de modifier l'information s'y trouvant. Les paramètres d'optimisation continus nécessitent tous un nom de variable, une valeur initiale ainsi qu'une limite inférieure et une limite supérieure pour cette valeur. Les paramètres discontinus ne requièrent quant à eux qu'une sélection chiffrée, identifiant les combinaisons devant être mises à l'essai. Le tableau C.1 présente plus en détail l'information requise pour chaque paramètre.

Tableau C.1 – Description des paramètres d'optimisation du logiciel OptiMHYSER

Paramètre	Description
ST	Coefficients de perte de charge locale Le coefficient de perte de charge locale se situe au septième champ du paramètre ST de MHYSER. Comme paramètre d'optimisation, OptiMHYSER remplace l'information contenue dans ce champ par une chaîne de caractères composée du nom de variable et d'un nombre d'indexation, encadrée de deux caractères de délimitation. Le nombre d'indexation débute toujours à un et incrémente d'une unité chaque fois que le logiciel fait une écriture. Il est ajouté de façon automatique et sert à rendre les paramètres d'optimisation indépendants les uns des autres. Le logiciel vérifie continuellement si la combinaison entre le nom de variable, le numéro d'index et les caractères de délimitation respecte l'espace alloué au paramètre dans le fichier de données (c.-à-d. 8 caractères maximum). Lorsque la combinaison excède cet espace, OptiMHYSER exige un autre nom de variable. Ce paramètre est appliqué sans discrétion à toutes les sections du modèle.
RU	Coefficients de rugosité Les coefficients de rugosité sont inscrits dans les champs 1 à 10 des paramètres RU de MHYSER, selon le nombre de divisions que possède une section. Comme paramètre d'optimisation, OptiMHYSER procède de façon semblable au paramètre ST. Il remplace chaque coefficient identifié par une chaîne de caractères composée du nom de variable et d'un nombre d'indexation, encadrée de deux caractères de délimitation. L'astuce est que le paramètre RU peut avoir plusieurs variables inscrites sur une même ligne de commande, l'espace leur étant alloué n'est pas constant et le nombre de coefficients peut varier d'une section à l'autre. Il est donc essentiel de spécifier pour quelles divisions les coefficients de rugosité doivent être calés. L'option « Sélectionner toutes les divisions » permet de cibler l'ensemble des coefficients de rugosité du modèle. Lors de la création du fichier gabarit, OptiMHYSER utilise les paramètres ND des sections pour déterminer le nombre de variables nécessaires. Cette option est très flexible, car elle s'adapte elle-même au nombre de divisions que possèdent les sections et ajuste automatiquement le nombre de variables en conséquence. Une seconde option permet de restreindre l'attribution des variables

	d'optimisation à certaines divisions spécifiques. Les divisions concernées doivent être activées en cochant les cases prévues à cet effet. Seuls les coefficients de rugosité associés à ces divisions seront calés. Cette option est cependant moins flexible que la précédente. Elle fonctionne bien lorsque les sections du modèle ont toutes le même nombre de divisions, mais quelques complications peuvent survenir si ce nombre n'est pas constant. Seules les divisions communes à l'ensemble des sections peuvent être sélectionnées.
ER	<u>Équation pour calculer la pente énergétique moyenne de chaque bief</u> L'équation utilisée pour calculer la pente énergétique moyenne de chaque bief est le premier paramètre d'optimisation discontinu d'OptiMHYSER. Quatre types de moyennes sont disponibles : 1. Moyenne algébrique des pentes énergétiques $S_f = \frac{1}{2}\left(S_{f,1} + S_{f,2}\right)$ Équation C.1 2. Moyenne géométrique des pentes énergétiques $S_f = \sqrt{S_{f,1} S_{f,2}}$ Équation C.2 3. Débitance moyenne $S_f = \left(\frac{2Q}{K_1 + K_2}\right)^2$ Équation C.3 4. Moyenne harmonique des pentes énergétiques $S_f = \frac{2S_{f,1}S_{f,2}}{S_{f,1} + S_{f,2}}$ Équation C.4 où S_f est la pente énergétique du bief, $S_{f,1}$ la pente énergétique de la section amont, $S_{f,2}$ la pente énergétique de la section aval, Q le débit liquide, K_1 la débitance de la section amont et K_2 la débitance de la section aval. L'information complémentaire requise pour ce paramètre est le choix du type de moyenne devant être mis à l'essai. Une sélection chiffrée permet de spécifier individuellement les équations désirées, tandis que l'expression « ALL » choisit automatiquement et sans discrétion l'ensemble des équations.

NT	Nombre de tubes de courants Le nombre de tubes de courants le deuxième paramètre d'optimisation discontinu que possède OptiMHYSER. Son fonctionnement est identique au paramètre ER. Une sélection chiffrée permet de spécifier individuellement les nombres de tubes devant être mis à l'essai, tandis que l'expression « ALL » choisit automatiquement l'ensemble des combinaisons possibles. MHYSER permet un maximum de cinq tubes de courants.
TS	Équation de transport L'équation de transport est le dernier paramètre d'optimisation discontinu inclus dans OptiMHYSER. Le logiciel MHYSER offre les 14 options suivantes : 1. Meyer-Peter et Müller 2. Laursen 3. Toffaleti 4. Engelund et Hansen 5. Ackers et White (1973) 6. Yang : sable (1973) et gravier (1984) 7. Yang : sable (1979) et gravier (1984) 8. Parker 9. Yang modifiée (1996) 10. Ackers et White (coefficients révisés, 1990) 11. DuBoys 12. Laursen (modifiée par Madden) 13. Ashida et Michiue 14. Université de Tsinghua De la même façon que pour les paramètres ER et NT, une sélection chiffrée ou l'expression « ALL » permet de spécifier les équations désirées. OptiMHYSER teint compte automatiquement des caractéristiques particulières associées aux équations 9 (Yang modifiée, 1996) et 14 (Université de Tsinghua). Il ajoute le paramètre PY au fichier de données, spécifiant le pourcentage de particules en suspension intrinsèque dans l'écoulement, lorsque l'équation 9 est activée et modifie le coefficient OMEGA, inscrit au quatrième champ 4 du paramètre TS, lorsque l'équation 14 est sélectionnée. La valeur de ce coefficient doit être choisie conformément aux critères spécifiés dans le tableau C.1.1.

Tableau C.1.1 – Valeurs du coefficient Ω pour l'équation de l'Université de Tsinghua (1985)

Valeur de Ω	Type de sédiments
1600	Sédiments loess
650	Autre type de sédiments fins (d_{50} < 0.1 mm)
300	Sédiments avec d_{50} > 0.1 mm
180	Chasse à faible débit
0	Utiliser la valeur par défaut pour ce paramètre (valeur par défaut = 300)

Si ces équations font partie de la sélection désirée, le logiciel les détecte et exige que la valeur des paramètres concernés soit fournie avant le début du processus de calage.

Épaisseur de la couche active

L'épaisseur de la couche active est ajustée à l'aide d'un facteur de multiplicatif appliqué au diamètre moyen de la plus grosse fraction granulométrique contenant au moins un pourcent des sédiments. MHYSER utilise par défaut un facteur de 14. Un nombre plus élevé rendra accessible une plus grande quantité de sédiments disponibles pour être transportés, augmentant ainsi le taux d'érosion si les conditions hydrauliques le permettent. Un nombre plus faible aura l'effet inverse.

Comme paramètre d'optimisation, OptiMHYSER procède de la même façon que pour le paramètre ST. Il remplace l'information contenue dans le deuxième champ du paramètre TS par le nom de variable encadré de deux caractères de délimitation. Aucun nombre d'indexation n'est ajouté, car il n'y a toujours qu'une seule variable d'optimisation.

DS

Débit sédimentaire entrant (hydrogramme discrétisé)

Le débit sédimentaire entrant est le dernier élément du modèle pouvant servir au calage. Cette condition frontière est essentielle au fichier de données principal ainsi que tous les fichiers de données des sources tributaires. MHYSER permet d'entrer cette information par le biais d'un hydrogramme discrétisé (paramètre DS) ou d'une courbe de tarage (paramètre QR). OptiMHYSER permet l'optimisation de ces deux paramètres. De plus, il offre la possibilité d'incorporer les sources tributaires au processus de calage.

Le paramètre DS représente le débit solide imposé au modèle sous forme d'hydrogramme discrétisé. Lors de la création du fichier gabarit, OptiMHYSER remplace l'information contenue dans le deuxième champ de ce paramètre par une chaîne de caractères semblable à celle

	utilisée pour les paramètres ST et RU. Si les sources tributaires sont incluses, une seconde suite de valeur initiale, limite inférieure et limite supérieure doit être fournie en guise d'information complémentaire. Cette information n'est cependant appliquée qu'aux variables d'optimisation décelées dans les fichiers de données tributaires. Le nom de variable demeure le même, mais est automatiquement allongé du suffixe "t". Lorsque cette option est activée, OptiMHYSER utilise le fichier de données principal du modèle pour récupérer le nom et l'emplacement des fichiers concernés (paramètre DL). Il effectue ensuite les modifications nécessaires pour les transformer en fichiers gabarits secondaires.
QR	<u>Débit sédimentaire entrant (courbe de tarage)</u> Le paramètre QR représente le débit solide imposé au modèle sous forme de courbe de tarage de type puissance. $Q_{solide} = AQ_{liquide}^{B}$ Équation C.5 où Q_{solide} et $Q_{liquide}$ sont respectivement le débit solide (tonnes/jour) et le débit liquide (ft^3/s) et A et B des coefficients réels. Le fonctionnement de ce paramètre d'optimisation est identique au paramètre DS. Les coefficients A et B possèdent cependant chacun leurs propres suites de valeur initiale, limite inférieure et limite supérieure. Le nom de variable générique inscrit au formulaire de saisie est allongé automatiquement du suffixe "A" pour le coefficient A et du suffixe "B" pour le coefficient B. De plus, seules les variables d'optimisations décelées dans les fichiers de données tributaires possèdent des nombre d'indexation afin de les distinguer des variables décelées dans le fichier principal. Aucun suffixe "t" n'est requis, car MHYSER ne permet qu'une seule courbe de tarage par fichier de données. Bien qu'un seul type de paramètre de débit sédimentaire entrant (DS ou QR) ne peut être utilisé dans <u>un</u> fichier de données particulier, il n'est pas nécessaire d'avoir le même paramètre pour <u>tous</u> les fichiers (sources tributaires incluses). OptiMHYSER peut effectuer la gestion des deux types de paramètres de façon indépendante et effectuer les modifications requises en fonction du paramètre trouvé dans les fichiers de données concernés.

C.3.1.3 Onglet « Paramètres d'observation »

L'onglet « Paramètres d'observation » permet de choisir un deuxième caractère de délimitation et de sélectionner les paramètres d'observation devant être utilisés pour caler le modèle. Le caractère de délimitation inscrit sur cet onglet est employé lors de la création des fichiers d'instructions PEST. Un caractère différent de celui spécifié sur l'onglet « Paramètres d'optimisation » peut être choisi ou le même peut être conservé. Seuls les caractères recommandés à la droite de la case de sélection peuvent être utilisés.

Sept paramètres d'observation sont inclus dans OptiMHYSER : l'élévation de la surface libre (ELEVSF), l'aire de la section mouillée (RECOUL), la vitesse d'écoulement (VECOUL), l'accumulation des dépôts, poids (ACCDEP_M) et volume (ACCDEP_V), le niveau du talweg (THALWG) et le profile de la section (PROFXY). Ils sont activés en cochant les cases appropriées. Chacun nécessite l'inscription d'un nom de variable unique ainsi que du pas de temps et des sections auxquels sont associées les données d'observation désirées. La liaison entre les sections du modèle et les données d'observation est effectuée à l'aide d'une sélection chiffrée semblable à celle utilisée pour les paramètres d'optimisation ER, NT et TS.

Les paramètres d'observation peuvent être séparés en trois catégories, selon le fichier de sortie MHYSER dans lequel est inscrite l'information concernée. Les paramètres ELEVSF, RECOUL, VECOUL, ACCDEP_M et ACCDEP_V sont liés au fichier **.out*, le paramètre THALWG au fichier **.lng* et le paramètre PROFXY au fichier **.sec*. Les pas de temps imposés aux paramètres de chaque groupe doivent être conformes aux pas de temps d'impression inscrits aux paramètres CI, SL et SO du modèle, respectivement. Il n'est cependant pas nécessaire pour tous les paramètres d'avoir le même pas de temps.

Tous les fichiers d'instructions créés sont sauvegardés sous le même répertoire et portent le même nom que le fichier de données du modèle. Ils se distinguent cependant

par le suffixe [out], [lng], ou [sec] ajouté à leur nom, selon le fichier de sortie auquel ils sont associés.

** Mise en garde **

L'utilisation du paramètre PROFXY doit être effectuée avec grande prudence. Le peu d'information contenue dans le fichier de sortie *.sec peut causer de nombreuses complications. Malheureusement, il est presque impossible de corriger la situation.

Le bon fonctionnement de ce paramètre est conditionné par trois critères importants. D'abord, la distance par rapport à l'exutoire des sections choisies doit être la même dans le fichier de sortie *.sec que dans le fichier de données du modèle. Deuxièmement, le nombre de points de discrétisation que possèdent les sections ne doit pas coïncider avec le pas de temps choisi. Finalement, il est impératif que tous les points de discrétisation présents dans le fichier de données se retrouvent dans le fichier de sortie et que leur coordonnée 'x' ne subisse aucune modification. Bien entendu, il est prévu que MHYSER ajoute, au besoin, des points de discrétisation supplémentaires. Cette action ne crée cependant aucun problème pour l'utilisation du paramètre PROFXY. Il faut simplement que le logiciel ne supprime pas les points existants.

C.3.1.4 Boutons de contrôles

Au bas du formulaire « OptiMHYSER1.2 » se trouvent trois boutons de contrôle. Le tableau C.2 présente leur fonctionnement.

Tableau C.2 – Boutons de contrôle du formulaire de saisie principal du logiciel OptiMHYSER

« OK »	Sauvegarde la configuration d'OptiMHYSER et poursuit l'exécution du logiciel.
« Annuler »	Ferme le formulaire « OptiMHYSER1.2 » sans enregistrer les modifications apportées. Les modifications faites au formulaire « Paramètres Avancés » ne sont cependant pas effacées.
« Paramètres Avancés... »	Affiche le formulaire de saisie « Paramètres Avancés ».

C.3.2 Formulaire « Paramètres Avancés »

Le formulaire de saisie « Paramètres Avancés » regroupe l'information relative aux fichiers exécutables de PEST et de MHYSER ainsi qu'aux paramètres de contrôle PEST. Il peut être séparé en quatre sections élémentaires (figure C.9). Lors de son lancement, le formulaire affiche toujours la dernière configuration sauvegardée.

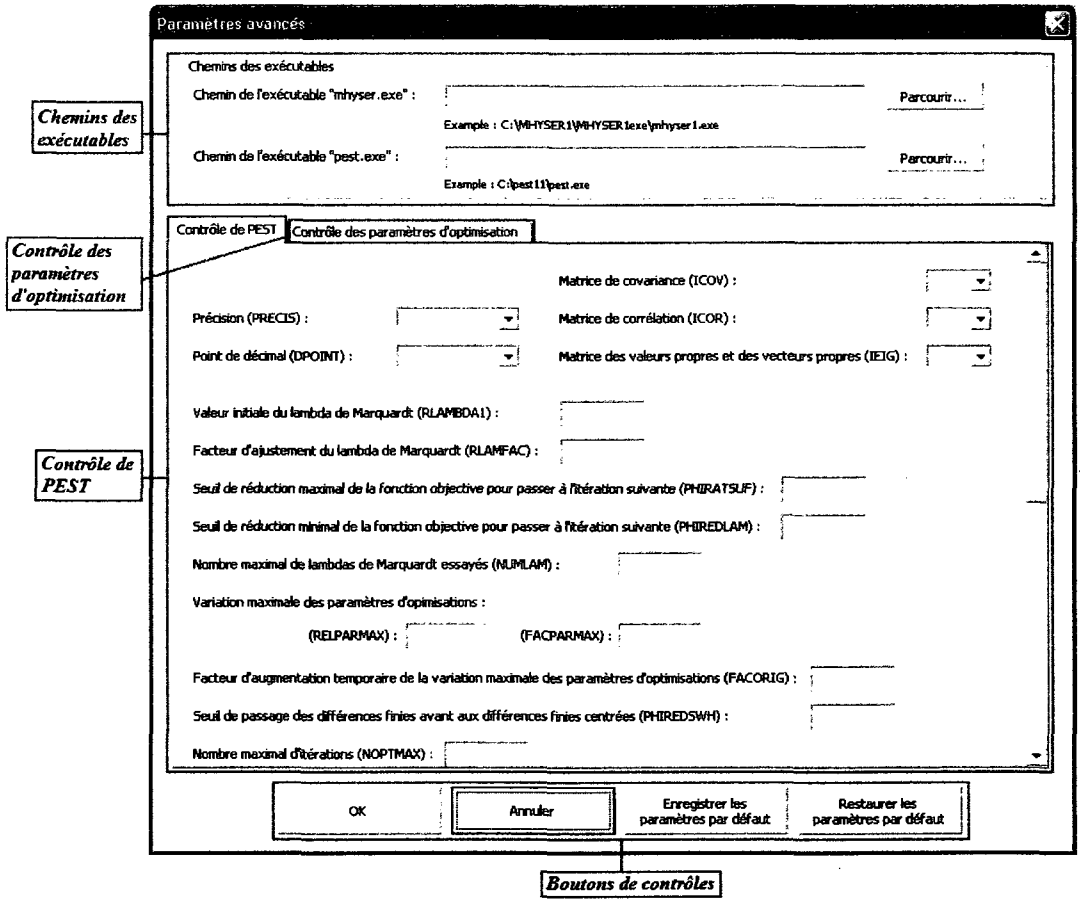


Figure C.9 – Formulaire de saisie « Paramètres Avancés ».

C.3.2.1 Chemins des exécutables

Sous la section « Chemins des exécutables » doit être entré les chemins vers les fichiers exécutables des logiciels MHYSER (mhyser.exe) et PEST (pest.exe). Le bouton « Parcourir... » permet de naviguer parmi les répertoires de l'ordinateur afin d'atteindre les fichiers désirés.

C.3.2.2 Onglet « Contrôle de PEST »

L'onglet « Contrôle de PEST » contient un premier regroupement des paramètres de configuration du logiciel PEST. Il regroupe notamment les exigences relatives à la création de certains fichiers de sorties, le degré de précision du logiciel, le lambda de Marquardt initial, les limites de variation de la fonction objective, les critères d'arrêt ainsi que quelques paramètres supplémentaires nécessaires au bon fonctionnement de PEST. Le tableau C.3 présente en détail l'ensemble de ces paramètres.

Étant donné que chaque modèle possède ces propres particularités, il est difficile de trouver une configuration optimale générique. Il est probable que certains ajustements soient nécessaires pour chaque calage effectué.

Tableau C.3 – Description des paramètres de contrôle du logiciel PEST

Paramètres	Description
Précision (PRECIS)	Le paramètre PRECIS détermine le degré de précision qu'utilise PEST lorsqu'il écrit la valeur des paramètres d'optimisation dans le fichier gabarit. L'option « single » le contraint à employer le protocole de précision simple. Les paramètres possèdent alors une longueur maximale de 13 caractères et l'exposant du format d'écriture scientifique est désigné par la lettre « e ». En revanche, l'option « double » oblige l'utilisation du protocole de précision double. Le maximum de caractères passe donc à 23 et l'exposant est désigné par la lettre « d ». Puisqu'aucun paramètre MHYSER ne peut contenir plus de 8 caractères, il est recommandé de conserver l'option « single » pour ce paramètre.

Point de décimale (DPOINT)	Ce paramètre permet d'optimiser l'espace alloué aux paramètres d'optimisation dans le fichier gabarit en offrant la possibilité d'omettre le point de décimal lorsque celui-ci est redondant. Cette fonctionnalité est activée lorsque l'option « nopoint » est sélectionnée. Le degré de précision du paramètre peut alors être augmenté grâce à l'ajout d'un chiffre significatif à sa valeur. En revanche, l'option « point » oblige PEST à utiliser un point de décimale, peu importe le contexte.
Matrices de covariance, corrélation et valeurs/vecteurs propres (ICOV, ICOR et IEIG)	Suite au calcul de la matrice Jacobienne, trois matrices peuvent être produites. La matrice ICOV contient les coefficients de covariance, la matrice ICOR les coefficients de corrélation et la matrice IEIG les valeurs propres et les vecteurs propres de la matrice de covariance. Lorsque la valeur de ces paramètres est fixée à « 1 », PEST écrit les matrices concernées dans un fichier portant l'extension *.*mtt*. Lorsqu'elle est fixée à « 0 », le logiciel ne fait aucune écriture.
Valeur initiale du lambda de Marquardt (RLAMBDA1)	Le paramètre RLAMBDA1 contient la valeur initiale du lambda de Marquardt qu'utilise PEST. Un lambda élevé permet d'amorcer le processus d'optimisation dans la direction du gradient le plus élevé. Ceci est bénéfique lorsque l'estimation initiale des paramètres d'optimisations n'est pas très bonne.
Facteur d'ajustement du lambda de Marquardt (RLAMFAC)	Au début de chaque itération, PEST augmente ou réduit le lambda de Marquardt d'un facteur RLAMFAC. L'ajustement du lambda permet de déterminer la direction optimale du vecteur de raffinement; c.-à-d. la direction qui mène à la réduction maximale de la fonction objective. La valeur de ce paramètre doit toujours être supérieure à 1.0.
Seuil de réduction maximal de la fonction objective pour passer à l'itération suivante (PHIRATSUF)	Au cours du processus de calage, PEST utilise le critère PHIRATSUF pour déterminer à quel moment il est plus efficace de passer à l'itération suivante que de poursuivre l'ajustement du lambda de Marquardt. Il calcule le ratio entre la valeur de la fonction objective obtenue pour un lambda particulier et la valeur la plus faible obtenue lors de l'itération précédente (valeur initiale utilisée pour l'itération en cours). Lorsque ce ratio est inférieur à PHIRATSUF, le logiciel estime que la fonction objective est suffisamment réduite pour l'itération en cours.

	$\frac{\Phi_i^j}{\Phi_{i-1}} \leq PHIRATSUF$ Équation C.6 où Φ_i^j est la valeur de la fonction objective obtenue pour le j'ième lambda de Marquardt de l'itération i et Φ_{i-1} la valeur de la fonction objective minimum atteinte lors de l'itération i-1.
Seuil de réduction minimal de la fonction objective pour passer à l'itération suivante (PHIREDLAM)	À l'inverse du paramètre PHIRATSUF, il est possible que le moment auquel il est plus efficace de passer à l'itération suivante soit déterminé par une incapacité de réduire de façon satisfaisante la fonction objective (surtout lorsque celle-ci s'approche de son minimum). Le critère PHIREDLAM est alors utilisé. Lorsque le taux de réduction relative de la fonction objective est inférieur à la valeur de ce paramètre, PEST cesse d'ajuster le lambda de Marquardt et passe à l'itération suivante. $\frac{\left(\Phi_i^{j-1} - \Phi_i^j\right)}{\Phi_i^{j-1}} \leq PHIREDLAM$ Équation C.7 où Φ_i^{j-1} et Φ_i^j sont respectivement les valeurs de la fonction objective obtenues pour le lambda de Marquardt j-1 et j de l'itération i.
Nombre maximal de lambdas de Marquardt essayés (NUMLAM)	Finalement, si les critères PHIRATSUF et PHIREDLAM ne peuvent être satisfaits, PEST procède automatiquement la prochaine itération lorsque : 1. Une réduction et une augmentation du lambda de Marquardt mènent tous deux à l'accroissement de la fonction objective. ou 2. NUMLAM lambda de Marquardt ont été essayés.
Variation maximale des paramètres d'optimisation (RELPARMAX et FACPARMAX)	Les paramètres RELPARMAX et FACPARMAX limitent la variation maximale que peuvent subir les paramètres d'optimisation entre deux itérations consécutives. Ceci permet d'éviter le phénomène de sautillement autour du point minimum de la fonction objective. Les bornes imposées peuvent être de natures *relative* (RELPARMAX) ou *factorielle* (FACPARMAX). Chaque paramètre d'optimisation ne peut

	cependant être soumis qu'à une seule condition. Si jamais un paramètre excède la limite à laquelle il est soumis, la longueur du vecteur de raffinement est réduite de manière à ce que le paramètre fautif revienne à l'intérieure des bornes prescrites. Un paramètre soumis à une variation relative maximale doit respecter la condition suivante : $$\left\lvert \frac{(b_i - b_{i-1})}{b_{i-1}} \right\rvert \leq RELPARMAX$$ Équation C.8 où b_i et b_{i-1} sont respectivement les valeurs d'un paramètre d'optimisation observées aux itérations i et i-1. Cette limite doit néanmoins être utilisée avec prudence, car pour des valeurs de RELPARMAX supérieures à l'unité les paramètres d'optimisation peuvent facilement devenir nuls ou négatifs. Un paramètre soumis à une variation factorielle maximale doit quant à lui respecter l'une des conditions suivantes : $$\frac{b_{i-1}}{b_i} \leq FACPARMAX \quad \text{si } |b_{i-1}| > |b_i|$$ Équation C.9a $$\frac{b_i}{b_{i-1}} \leq FACPARMAX \quad \text{si } |b_i| > |b_{i-1}|$$ Équation C.9b La valeur de FACPARMAX doit toujours être supérieure à 1.0. Ce type de limite favorise l'augmentation des paramètres et limite leur diminution.
Facteur d'augmentation temporaire de la variation maximale des paramètres d'optimisations (FACORIG)	Au cours du processus d'optimisation, il est possible que certains paramètres deviennent très petits. Dans ce cas, les conditions RELPARMAX et FACPARMAX peuvent nuire à leur retour à la normale. Le paramètre FACORIG permet de corriger cette situation en réduisant artificiellement la variation maximale perçue par le logiciel. Ce facteur multiplicatif est appliqué à la valeur initiale des paramètres d'optimisation et représente le seuil minimal sous lequel ne peut descendre les dénominateurs des équations C.8, C.9a et C.9b. Ceci permet indirectement d'augmenter la variation maximale que peuvent subir ces paramètres.

Seuil de passage des différences finies avant aux différences finies centrées (PHIREDSWH)	Lors du calcul des dérivées partielles des paramètres d'optimisation, PEST offre la possibilité de passer de la méthode des différences finies avant à la méthode des différences finies centrées lorsqu'une précision accrue est requise. Ce changement est effectué au moment où la variation relative de la fonction objective tombe sous la valeur du paramètre PHIREDSWH. $\frac{(\Phi_{i-1} - \Phi_i)}{\Phi_{i-1}} \leq PHIREDSWH$ Équation C.10 où Φ_{i-1} et Φ_i sont respectivement les valeurs de la fonction objective observées aux itérations i-1 et i.
Nombre maximal d'itérations (NOPTMAX)	Lorsqu'il est impossible d'atteindre une fonction objective nulle, PEST doit utiliser d'autres critères d'arrêt pour déterminer à quel moment cesser son exécution. Le paramètre NOPTMAX est un de ces critères. Il impose simplement une limite maximale sur le nombre d'itérations que peut effectuer le logiciel.
Limite minimale absolue de réduction de la fonction objective (PHIREDSTP et NPHISTP)	Les paramètres PHIREDSTP et NPHISTP forment un deuxième critère d'arrêt. Si, au cours de NPHISTP itérations, la variation relative de la fonction objective par rapport au minimum atteint jusqu'à présent est inférieure à PHIREDSTP, PEST estime qu'il est suffisamment proche du minimum absolu de la fonction. $\frac{(\Phi_i - \Phi_{min})}{\Phi_i} \leq PHIREDSTP$ Équation C.11 où Φ_i est la valeur de la fonction objective observée à l'itération i et Φ_{min} la valeur minimale atteinte jusqu'à présent.
Nombre maximal d'itérations en présence d'une fonction objective croissante (NPHINORED)	De façon semblable aux paramètres PHIREDSTP et NPHISTP, si au cours de NPHINORED itérations consécutives le logiciel ne parvient pas à réduire la valeur de la fonction objective, il estime avoir trouvé le minimum absolu. Il termine alors son exécution.

Seuil minimal de la variation relative des paramètres d'optimisations (RELPARSTP et NRELPAR)	Finalement, l'arrêt du logiciel peut être provoqué si la variation des paramètres d'optimisation devient négligeable. À la fin de chaque itération, PEST évalue la variation relative des paramètres selon l'équation C.8. Si, après NRELPAR itérations, cette variation est inférieure à RELPARSTP, le logiciel estime qu'il ne vaut plus la peine de poursuivre le calage.

C.3.2.3 Onglet « Contrôle des paramètres d'optimisation »

L'onglet « Contrôle des paramètres d'optimisation » contient le regroupement final des paramètres de configuration du logiciel PEST. Ceux-ci sont liés aux paramètres d'optimisation et contrôlent principalement les opérations relatives au calcul des dérivées partielles; à savoir : le type, la grandeur et la limite minimale de l'incrément ajouté aux paramètres, la méthode aux différences finies utilisée ainsi que certains paramètres supplémentaires exigés lorsque les différences finies centrées sont choisies. Chaque groupe de paramètres d'optimisation possède sa propre configuration. Le tableau C.4 présente en détail l'ensemble des paramètres de contrôle.

Tableau C.4 – Paramètres de contrôle PEST liés aux paramètres d'optimisation d'OptiMHYSER

Paramètre	Description
Type et ampleur de l'incrément désirés (INCTYP et DERINC)	Les paramètres INCTYP et DERINC servent à spécifier, respectivement, le type et l'ampleur de l'incrément utilisé lors du calcul des différences finies. Le type d'incrément peut être de nature *relative*, *absolue* ou *relative au maximum*. Lorsque INCTYP est fixé à « relative », PEST évalue l'ampleur de l'incrément comme une fraction DERINC de la valeur actuelle du paramètre. Si l'option « absolute » est sélectionnée, l'ampleur de l'incrément demeure constante et égale à DERINC. Finalement, l'option « rel_to_max » permet d'évaluer l'ampleur de l'incrément comme une fraction DERINC du paramètre d'optimisation ayant la valeur absolue la plus élevée.
Limite inférieure de l'incrément (DERINCLB)	Lorsque l'option « relative » ou « rel_to_max » est sélectionnée pour le paramètre INCTYP, il est possible que l'ampleur de l'incrément devienne trop faible pour calculer des dérivées fiables. Le paramètre DERINCLB fixe donc une limite

	minimale à la valeur de l'incrément. Ce paramètre est ignoré lorsque INCTYP est fixé à « absolute ».
Facteur multiplicatif appliqué à DERINC lors des différences finies centrées (DERINCMUL)	La méthode aux différences finies centrées offre généralement une meilleure stabilité numérique et une plus grande précision que la méthode aux différences finies avant. Il est donc possible d'augmenter l'ampleur de l'incrément utilisé afin de diminuer l'effet des instabilités locales du modèle sur les dérivées. Lorsque cette méthode est activée, le paramètre DERINC est multiplié d'un facteur DERINCMUL. Si une réduction de l'incrément est souhaitée, il est possible d'inscrire une valeur inférieure à l'unité pour ce paramètre. L'incrément est ajouté puis soustrait de la valeur des paramètres d'optimisation pour obtenir le trio de points où seront évaluées les différences finies.
Méthode de différences finies employée (FORCEN)	Le paramètre FORCEN contrôle le choix de la méthode utilisée pour les différences finies. L'option « always_2 » ne permet que l'utilisation des différences finies avant, tandis que l'option « always_3 » ne permet que l'utilisation des différences finies centrées. L'option « switch » offre quant à elle la possibilité d'amorcer le processus de calage avec les différences finies avant et de passer aux différences finies centrées lorsque le critère PHIREDSWH le permet (tableau C.3).
Ajustement désiré pour la méthode des différences finies centrées (DERMTHD)	Lorsque la méthode aux différences finies centrées est utilisée, PEST offre trois types d'ajustements possibles pour évaluer les dérivées : *parabolique*, *moindres carrées*, ou *points extérieurs*. Le paramètre DERMTHD permet de spécifier l'ajustement désiré. Sous l'option « parabolic », le logiciel trace d'abord une courbe parabolique passant par les points que définit la méthode aux différences finies. L'équation de la courbe est ensuite dérivée et est évaluée au point représentant le paramètre d'optimisation. L'option « best_fit » utilise plutôt une régression linéaire de type moindres carrées pour passer la meilleure droite possible au travers les points concernés. La dérivée est calculée à l'aide de la pente de cette droite. Finalement, l'option « outside_pts » utilise le même schéma de calculs que les différences finies avant, mais évalue les dérivées avec les deux points extérieurs plutôt que le point central et le point avant.

Condition limite pour la variation maximale du paramètre d'optimisation (PARCHGLIM)	Le paramètre PARCHGLIM détermine quelle limite de variation maximale doit respecter les paramètres d'optimisation (RELPARMAX / FACPARMAX, tableau C.3). L'option « relative » soumet les paramètres à la condition *relative*, tandis que l'option « factor » les soumet à la condition *factorielle*.

C.3.2.4 Boutons de contrôles

Au bas du formulaire « Paramètres Avancés » se trouvent quatre boutons de contrôle. Le tableau C.5 présente leur fonctionnement.

Tableau C.5– Boutons de contrôle du formulaire de saisie « Paramètres Avancés »

« OK »	Sauvegarde la configuration des paramètres avancés et retourne au formulaire « OptiMHYSER1.2 ».
« Annuler »	Retourne au formulaire « OptiMHYSER1.2 » sans enregistrer les modifications apportées.
« Enregistrer les paramètres par défaut »	Sauvegarde la valeur des paramètres avancés comme configuration par défaut.
« Restaurer les paramètres par défaut »	Restaure les paramètres avancés à leurs valeurs par défaut.