



**HAL**  
open science

# Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale – Apports de l'intelligence artificielle

Jean-Philippe Vidal

► **To cite this version:**

Jean-Philippe Vidal. Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale – Apports de l'intelligence artificielle. Interface homme-machine [cs.HC]. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2005. Français. NNT: . tel-00010185

**HAL Id: tel-00010185**

**<https://theses.hal.science/tel-00010185>**

Submitted on 16 Sep 2005

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : 2209

## THÈSE

présentée pour obtenir le titre de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE**

École doctorale Terre, Univers, Environnement  
Spécialité *Sciences de la Terre et Environnement*

---

# **ASSISTANCE AU CALAGE DE MODÈLES NUMÉRIQUES EN HYDRAULIQUE FLUVIALE**

—

# **APPORTS DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE**

---

Préparée dans l'Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique, *Cemagref*

par

**Jean-Philippe VIDAL**

Soutenue publiquement le 18 mars 2005 devant le jury composé de :

M. Jean-Louis ERMINE	(INT)	Président du jury
M. Denis DARTUS	(IMFT)	Directeur de thèse
M <sup>lle</sup> Sabine MOISAN	(INRIA)	Co-directrice
M. Jean-Baptiste FAURE	( <i>Cemagref</i> )	Co-directeur
M. Jean-Michel TANGUY	(SCHAPI)	Rapporteur
M. Roger MOUSSA	(INRA)	Rapporteur



## Présentation des membres du jury

Denis DARTUS	Professeur à l'IMFT-ENSEEIH (Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse), groupe HYDRE (Hydrodynamique et Environnement)
Sabine MOISAN	Chargée de recherche à l'INRIA Sophia-Antipolis (Institut National de Recherche en Informatique et Automatique), projet ORION (Environnements de résolution de problème pour des systèmes autonomes)
Jean-Baptiste FAURE	Chargé de recherche au <i>Cemagref</i> (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement), Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique
Jean-Michel TANGUY	Directeur du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations)
Roger MOUSSA	Chargé de recherche à l'INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), Unité Mixte de Recherche LISAH (Laboratoire d'étude des Interactions Sol-Agrosystème-Hydrosystème)
Jean-Louis ERMINE	Professeur à l'INT (Institut National des Télécommunications), directeur du département Systèmes d'Information



ទំនាស់នៃ ការស្រាវជ្រាវ លើ ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង និង ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង ទំនាស់នៃ  
ការស្រាវជ្រាវ លើ ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង និង ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង ទំនាស់នៃ  
និង ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង លើ ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង និង ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង ទំនាស់នៃ  
និង ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង លើ ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង និង ប្រព័ន្ធគ្រប់គ្រង ទំនាស់នៃ

Leonardo DA VINCI, *Codex Leicester* (1508-1510), feuillet 14A, folio 14r.

La surface désunie et ridée de l'eau prouve qu'elle est entravée dans son mouvement en direction de son cours. La surface de l'eau lisse comme une peau prouve qu'elle est libre de tout, simplement entraînée par l'eau qui, liée à elle, la précède en descendant. (Traduction de Carlo PEDRETTI et Claire FARAGO) CD-ROM et catalogue de l'Exposition *Codex Leicester – l'Art de la Science*, Musée du Luxembourg, Paris (1997).

Hypoth. I. *Causas rerum naturalium non plures admitti debere, quàm quæ & vera sint & earum Phænomenis explicandis sufficiunt.* [...]

Hypoth. II. *Ideoq̄ue effectuum naturalium eiusdem generis eadem sunt causæ.* [...]

Hypoth. III. *Corpus omne in alterius cujus cunque generis corpus transformari posse, & qualitatum gradus omnes intermedios successivè induere.*

Sir Isaac NEWTON, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (1687), S. Pepys (ed.), Londini, *De Mundi Systemate, Liber tertius*, p. 402.

Règle première: Il ne faut admettre de causes, que celles qui sont nécessaires pour expliquer les Phénomènes. [...]  
Règle II: Les effets du même genre doivent toujours être attribués, autant qu'il est possible, à la même cause. [...]  
Règle III: Les qualités des corps qui ne sont susceptibles ni d'augmentation ni de diminution, & qui appartiennent à tous les corps sur lesquels on peut faire des expériences, doivent être regardés comme appartenant à tous les corps en général. (Traduction de la Marquise du Chastellet) *Principes mathématiques de la philosophie naturelle – Tome second* (1759), Desaint & Saillant, Lambert (eds.), Paris, Livre troisième: *Du système du monde*, p. 2.

**We can only see a short distance ahead, but we can see plenty there that needs to be done.**

Alan TURING, Computing machinery and intelligence (1950), *Mind*, vol. 59, n° 236, p. 433-460.

Notre vision de l'avenir est limitée, mais du moins nous voyons qu'il nous reste bien des choses à faire. (Traduction de Patrice BLANCHARD) Alan TURING et Jean-Yves GIRARD (1995), *La machine de Turing*, Editions du Seuil, vol. S131 de *Collection Points Sciences*, Paris, p. 175.



# Table des matières

Remerciements . . . . .	xi
Résumé étendu . . . . .	xiii
Extended abstract . . . . .	xv
<b>Introduction</b>	<b>xvii</b>
De la qualité d'un modèle numérique . . . . .	xvii
Position des travaux . . . . .	xviii
Hydraulique et modélisation numérique . . . . .	xix
Hydroinformatique et intelligence artificielle . . . . .	xix
Plan du manuscrit . . . . .	xx
Inventaire et analyse des connaissances . . . . .	xx
Développement d'un système d'assistance au calage . . . . .	xx
Applications du prototype . . . . .	xxi
<b>I Inventaire et analyse des connaissances</b>	<b>1</b>
<b>1 Définitions</b>	<b>3</b>
1.1 Notions de sémantique en modélisation numérique . . . . .	3
1.1.1 Revue de littérature introductive . . . . .	3
1.1.2 Exemple du terme <i>modèle</i> . . . . .	4
1.1.3 Vers un référentiel terminologique . . . . .	5
1.2 Proposition d'un cadre terminologique . . . . .	6
1.2.1 Référentiel de Refsgaard et Henriksen . . . . .	6
1.2.2 Précisions sur la notion de <i>calage</i> . . . . .	7
1.2.3 Typologie des situations rencontrées en modélisation . . . . .	9
1.2.4 De l'évaluation d'une modélisation au calage du modèle . . . . .	10
1.3 Proposition d'un cadre méthodologique . . . . .	12
1.3.1 Le protocole de Anderson et Woessner . . . . .	12
1.3.2 La qualité anglaise . . . . .	13
1.3.3 Les bonnes pratiques hollandaises . . . . .	13
1.3.4 Les outils européens . . . . .	14
1.3.5 Notre proposition . . . . .	15
1.4 Le modèle numérique comme objet d'échange et outil à évaluer . . . . .	17
1.4.1 Le modèle numérique, entre objet de recherche et outil d'in- génierie . . . . .	20
1.4.2 Transmettre un modèle et sa crédibilité . . . . .	21
1.4.3 Doit-on caler un modèle? . . . . .	21



1.4.4	Peut-on valider un modèle? . . . . .	23
1.5	Conclusions . . . . .	25
<b>2</b>	<b>Éléments d'un modèle numérique de rivière</b>	<b>27</b>
2.1	Modèle conceptuel pour l'hydraulique unidimensionnelle . . . . .	27
2.1.1	Les équations de Saint-Venant . . . . .	28
2.1.2	Détermination de la débitance . . . . .	29
2.1.3	Pertes de charge singulières . . . . .	31
2.2	Codes de calcul . . . . .	32
2.2.1	Multipllicité des logiciels . . . . .	33
2.2.2	MAGE . . . . .	33
2.3	Paramètres en hydraulique fluviale . . . . .	33
2.3.1	Coefficients de résistance à l'écoulement . . . . .	34
2.3.2	Coefficients de débit des ouvrages . . . . .	38
2.3.3	Lien entre modèle conceptuel et paramètres du modèle numérique . . . . .	38
2.4	Données en hydraulique fluviale . . . . .	41
2.4.1	Données topographiques . . . . .	41
2.4.2	Données hydrométriques . . . . .	43
2.4.3	Résultats hydrologiques . . . . .	45
2.4.4	Résultats océanographiques . . . . .	47
2.4.5	Données qualitatives . . . . .	47
2.4.6	Des données pour chaque étape de la modélisation numérique . . . . .	48
2.5	Conclusions . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Calage en hydraulique fluviale</b>	<b>51</b>
3.1	Estimation d'une valeur a priori des paramètres . . . . .	51
3.1.1	Analyse des composantes de la résistance à l'écoulement . . . . .	52
3.1.2	Comparaison à un catalogue de tronçons de référence . . . . .	55
3.1.3	Exploitation d'une table de valeurs . . . . .	58
3.1.4	Formules empiriques . . . . .	59
3.1.5	Analyse des méthodes d'estimation d'une valeur . . . . .	61
3.1.6	Vers une procédure d'initialisation d'un paramètre . . . . .	66
3.2	Méthodes d'ajustement des paramètres . . . . .	68
3.2.1	Principes fondamentaux . . . . .	68
3.2.2	Méthode heuristique . . . . .	70
3.2.3	Méthodes mathématiques . . . . .	70
3.2.4	Position de nos travaux, entre heuristique et automatique . . . . .	76
3.3	Autres approches . . . . .	77
3.3.1	Approches statistiques . . . . .	77
3.3.2	Dérivation automatique du code de calcul . . . . .	78
3.4	Conclusions . . . . .	78
<b>II</b>	<b>Développement d'un système d'assistance au calage</b>	<b>79</b>
<b>4</b>	<b>Modélisation des connaissances</b>	<b>81</b>
4.1	Processus d'ingénierie des connaissances . . . . .	81

4.1.1	Sources de connaissances . . . . .	82
4.1.2	Différents types de connaissances . . . . .	82
4.1.3	Différents niveaux de connaissances . . . . .	83
4.2	Outils de formalisation . . . . .	84
4.2.1	Diagrammes de classes UML . . . . .	84
4.2.2	Diagrammes d'activités UML . . . . .	85
4.2.3	Récapitulatif . . . . .	86
4.3	Modélisation des connaissances descriptives . . . . .	87
4.3.1	ONTOVAL, une ontologie pour la validation opérationnelle . . . . .	87
4.3.2	ONTOHYD, une ontologie pour l'hydraulique fluviale 1D . . . . .	90
4.3.3	Comparaison à d'autres travaux sur des ontologies du domaine . . . . .	95
4.4	Modélisation des connaissances inférentielles . . . . .	98
4.4.1	Formalisation du paradigme actuel pour le calage de modèles numériques . . . . .	98
4.4.2	Affectation des données . . . . .	100
4.4.3	Définition des paramètres . . . . .	101
4.4.4	Initialisation des paramètres . . . . .	103
4.4.5	Réalisation d'une simulation . . . . .	104
4.4.6	Comparaison des prédictions . . . . .	105
4.4.7	Ajustement des paramètres . . . . .	107
4.4.8	Qualification du modèle . . . . .	109
4.4.9	Comparaison à d'autres travaux sur la formalisation du processus de calage . . . . .	109
4.5	Modélisation des connaissances sur l'utilisation du code MAGE . . . . .	113
4.5.1	Choix du code MAGE . . . . .	113
4.5.2	Connaissances descriptives – fichiers . . . . .	113
4.5.3	Connaissances inférentielles – exécution des programmes . . . . .	114
4.5.4	Modélisation de l'étape de réalisation d'une simulation . . . . .	115
4.5.5	Modélisation de la sous-tâche de comparaison entre référence et prédiction . . . . .	115
4.5.6	Comparaison à d'autres travaux sur la formalisation de connaissances sur des codes . . . . .	116
4.6	Conclusions . . . . .	119
<b>5</b>	<b>Implémentation d'un système opérationnel</b> . . . . .	<b>121</b>
5.1	Intégration symbolique/numérique . . . . .	121
5.1.1	Définition des connaissances à intégrer . . . . .	122
5.1.2	Objectifs d'intégration . . . . .	122
5.1.3	Modes d'intégration . . . . .	124
5.2	Notions de pilotage de programmes . . . . .	125
5.2.1	De la réutilisation de code au pilotage de programmes . . . . .	125
5.2.2	Outils pour le pilotage de programmes . . . . .	127
5.3	CARMA-1, un prototype en pilotage de programmes . . . . .	130
5.3.1	Principe d'implémentation technique . . . . .	132
5.3.2	Construction d'une base de connaissances en pilotage de programmes . . . . .	133
5.3.3	Fonctionnement . . . . .	137

5.4	Développement d'outils d'intelligence artificielle dédiés au calage de modèles numériques . . . . .	141
5.4.1	Discussion sur l'implémentation précédente . . . . .	141
5.4.2	Réalisation . . . . .	143
5.4.3	CARMA-2, un nouveau prototype pour le calage . . . . .	144
5.5	Conclusions . . . . .	147
<b>III</b>	<b>Applications du prototype</b>	<b>149</b>
<b>6</b>	<b>Calage d'un modèle de la Lèze</b>	<b>151</b>
6.1	Présentation du cas d'étude . . . . .	151
6.1.1	La rivière Lèze . . . . .	151
6.1.2	La crue de février 2000 . . . . .	152
6.1.3	Modèle numérique . . . . .	152
6.1.4	Spécificités du calage . . . . .	157
6.2	Construction de la base de faits . . . . .	158
6.3	Déroulement de la session de calage avec CARMA-1 . . . . .	160
6.3.1	Affectation des données . . . . .	160
6.3.2	Définition des paramètres . . . . .	160
6.3.3	Initialisation des paramètres . . . . .	161
6.3.4	Réalisation d'une simulation . . . . .	161
6.3.5	Comparaison des prédictions . . . . .	161
6.3.6	Ajustement des paramètres . . . . .	162
6.3.7	Qualification du modèle calé . . . . .	163
6.4	Retours d'expérience . . . . .	163
6.4.1	Comparaison des crues simulée et mesurée . . . . .	163
6.4.2	Définition des coefficients de résistance . . . . .	165
6.4.3	Choix de la méthode d'estimation . . . . .	166
6.4.4	Pas d'ajustement des coefficients de résistance . . . . .	166
6.5	Proposition pour une automatisation de l'étape de comparaison des prédictions . . . . .	166
6.5.1	Raisonnements qualitatifs sur des courbes . . . . .	166
6.5.2	Module d'évaluation symbolique de courbes . . . . .	167
6.5.3	Perspectives d'intégration au système d'assistance au calage . . . . .	168
6.6	Conclusions . . . . .	169
<b>7</b>	<b>Calage d'un modèle de l'Hogneau</b>	<b>171</b>
7.1	Présentation du cas d'étude . . . . .	171
7.1.1	La rivière Hogneau . . . . .	171
7.1.2	La crue de février 2002 . . . . .	172
7.1.3	Modèle numérique . . . . .	172
7.1.4	Spécificités du calage . . . . .	176
7.2	Construction de la base de faits . . . . .	177
7.3	Déroulement de la session de calage avec CARMA-1 . . . . .	179
7.3.1	Préliminaires . . . . .	179
7.3.2	Construction de la condition limite amont . . . . .	179
7.3.3	Calage du coefficient de débit . . . . .	181

7.3.4	Calage des coefficients de résistance . . . . .	181
7.3.5	Qualification du modèle calé . . . . .	182
7.4	Retours d'expérience . . . . .	182
7.4.1	Vérification de l'hypothèse d'invariance de l'hydrogramme . . . . .	182
7.4.2	Comparaison des crues simulée et mesurée . . . . .	182
7.4.3	Définition des coefficients de résistance . . . . .	184
7.4.4	Ajustement itératif des paramètres de l'aval vers l'amont . . . . .	184
7.4.5	Ajustement dissocié des coefficients du lit mineur et du lit majeur . . . . .	185
7.5	Expérimentation d'une optimisation numérique . . . . .	185
7.5.1	Algorithme du recuit simulé . . . . .	185
7.5.2	Expériences . . . . .	186
7.6	Conclusions . . . . .	188
 <b>Conclusion générale</b>		<b>189</b>
<b>Résultats</b>		<b>189</b>
<b>Perspectives</b>		<b>192</b>
 <b>Table des figures</b>		<b>197</b>
<b>Liste des tableaux</b>		<b>201</b>
<b>Bibliographie</b>		<b>203</b>
 <b>Annexes</b>		<b>229</b>
<b>A</b>	<b>Abréviations et notations</b>	<b>231</b>
<b>B</b>	<b>Formalisme graphique UML</b>	<b>233</b>
B.1	Diagrammes de classes . . . . .	233
B.2	Diagrammes d'activités . . . . .	234
B.3	Diagrammes de cas d'utilisation . . . . .	234
<b>C</b>	<b>Méthode de mesure directe du coefficient <math>n</math> de Manning</b>	<b>237</b>
C.1	Choix du tronçon et des conditions hydrauliques . . . . .	237
C.2	Mesure des variables hydrauliques . . . . .	238
C.3	Équation de conservation de l'énergie . . . . .	238
C.4	Formule entre deux sections . . . . .	238
C.5	Formule générale . . . . .	239
<b>D</b>	<b>Tables de valeurs</b>	<b>241</b>
D.1	Tables de valeurs pour les coefficients de la formule de Cowan. . . . .	241
D.2	Tables de valeurs pour les coefficients de la formule de Cowan modifiée pour les plaines d'inondation. . . . .	244
D.3	Tables de valeurs du coefficient $n$ de Manning . . . . .	246

<b>E</b>	<b>Résistance à l'écoulement – Historique</b>	<b>253</b>
E.1	Les premières formules empiriques . . . . .	253
E.1.1	Chézy . . . . .	253
E.1.2	Du Buat . . . . .	254
E.1.3	Girard . . . . .	254
E.1.4	De Prony . . . . .	254
E.1.5	Eytelwein . . . . .	255
E.1.6	Dupuit . . . . .	255
E.1.7	Humphreys et Abbot . . . . .	255
E.1.8	Saint-Venant . . . . .	256
E.2	De coefficients « universels » en paramètres . . . . .	256
E.2.1	Weisbach . . . . .	256
E.2.2	Bazin . . . . .	257
E.3	Vers une formule standard d'ingénierie . . . . .	259
E.3.1	Gauckler . . . . .	259
E.3.2	Guanguillet et Kutter . . . . .	260
E.3.3	Manning . . . . .	261
E.3.4	Strickler . . . . .	261
E.4	Applicabilité hors du régime uniforme . . . . .	262
E.4.1	Régime permanent graduellement varié . . . . .	262
E.4.2	Régime transitoire . . . . .	262
E.5	Lien avec la mécanique des fluides . . . . .	263
E.5.1	Notion de rugosité équivalente . . . . .	263
E.5.2	Colebrook . . . . .	264
E.5.3	Formule de Powell . . . . .	264
E.5.4	Formules simplifiées applicables aux cours d'eau naturels . . . . .	265
E.5.5	Invariance par rapport au rayon hydraulique . . . . .	265
<b>F</b>	<b>Description des fichiers utilisés par le logiciel MAGE</b>	<b>267</b>
<b>G</b>	<b>Description des programmes de la chaîne de traitement du logiciel MAGE</b>	<b>269</b>
<b>H</b>	<b>Listing des sessions de calage avec le prototype CARMA-1</b>	<b>273</b>
H.1	Calage du modèle de la Lèze . . . . .	273
H.2	Calage du modèle de l'Hogneau . . . . .	276

---

## Remerciements

Ce manuscrit est le fruit d'un travail qui, bien que personnel, n'aurait pu s'effectuer sans le concours des personnes qui ont cru à cette aventure. Merci donc à Jean-Baptiste Faure, Danièle Ziébelin et Sabine Moisan, pour leur ouverture d'esprit qui leur a permis de franchir les portes de leurs disciplines respectives et proposer une thématique de recherche commune ; Denis Dartus, pour avoir endossé la charge de directeur de thèse ; Nicolas Gendreau puis Jean-Michel Grésillon, pour m'avoir accueilli au sein de l'unité de recherche Hydrologie-Hydraulique ; Hélène Faurant et Anne Eicholz pour avoir été toujours présentes ; Roger Moussa et Jean-Michel Tanguy, pour avoir lu en détail les nombreuses pages qui suivent ; et enfin Jean-Louis Ermine, pour avoir consenti à lire la biographie hydraulique de Robert Manning...

Je tiens particulièrement à remercier Sabine, pour l'escapade prémonitoire au pays d'Alice & Harry, pour les interminables débuggages par téléphone, et surtout pour avoir toujours été là, même en étant là-bas. Vraiment merci.

Au terme de ces trois années passées au *Cemagref*, je tiens aussi à remercier tous ceux qui ont rendu ce séjour lyonnais si enrichissant. Une première pensée aux compagnons de galère, Oldrich (qui a survécu à trois ans de cohabitation, chapeau bas) et Fred (Krapulax kravaincra!), respect pour Éric, le « modèle<sup>1</sup> » de tout thésard (see you soon in Oxford, préz'), le prix du public pour Anne-Laure, *The* documentaliste herself<sup>2</sup>, spéciale dédîKass à Benj pour le *kréyol* avec l'accent bleu et blanc, bonsoir à Élo et son sourire (au fait, tu l'as rendu ton DVD?), bises émues aux anciens qui ont montré la voix, Robin (L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X for ever) et le couple à l'écran Ju (une autre vie est possible, Hutch...) et Sandy, merci à Guillaume (l'unique soudeur de sèche-cheveux), Raouf (encore une nouvelle fiancée?), Manu, Noémie et Jean-Guillaume, Kamal, Adeline, Magali, Maria-Helena, Christine, Aurélie, Seb, Erwann et Céline, Catherine, Marie-Madeleine, Julien C., merci à Pierre et Jean (les apôtres de l'info), et puis tous les autres...

Merci au badminton et au Vercors, à Léonard, au Vinci, à Saint-Thomas, au smurf, à la fête de la science, à la neige et aux verrières, à Claude G., au Père Labat, à M. Conil, aux îles d'Auvergne, à la chanson française *de qualité*, aux lumières que l'on n'atteint jamais...

Merci enfin à mes parents et à Sandra, pour m'avoir supporté – aux deux sens du terme – pendant ces années et les précédentes.

Et une dernière citation<sup>3</sup> (merci à tous les comédiens d'un soir!) :

« J'aide la science, et c'est ma joie! »

Discipulus Simplex<sup>4</sup>

---

1. Impossible à caler, ou alors avec des talonnettes... KC...

2. Ou comment Monica se fait appeler Paulette et change de raquette.

3. Et puis une petite devinette : Que prend chez lui un hydraulicien quand il avoue à un ingénieur des connaissances ne pas savoir comment fonctionne son code de calcul? Réponse p. 84.

4. LÉONARD (2003), *Crie, ô, génie!*, vol. 15, p. 11, Turk & de Groot, Le Lombard.



---

## Résumé étendu

Les modèles numériques sont aujourd'hui couramment utilisés en hydraulique fluviale comme outils de prévention des inondations. Les résultats numériques fournis doivent être comparés à des données de terrain afin de s'assurer de la fiabilité de ces outils dans des conditions opérationnelles. Ce processus, appelé *validation opérationnelle*, inclut la tâche de calage de modèle. Le calage vise à reproduire des événements de référence aussi fidèlement que possible par un ajustement de paramètres à base physique.

La première partie de cette thèse définit les concepts clés à partir d'une terminologie standard, puis présente un état de l'art et une analyse, d'une part des différents *objets* impliqués dans le processus de calage, et d'autre part des *procédures* actuellement mises en œuvre pour mener à bien cette tâche. Parmi elles, les techniques d'optimisation classiques sont confrontées à des problèmes d'équifinalité. Ce concept prévoit qu'un même résultat peut être obtenu à partir de différents jeux de paramètres. Afin de pallier ces difficultés, cette thèse aborde le sujet du calage de modèles par le biais de techniques issues de l'intelligence artificielle, et plus particulièrement de techniques de systèmes à base de connaissances.

La deuxième partie propose ainsi la construction d'un système à base de connaissances pour l'assistance au calage. L'étude présentée dans la première partie nous a permis d'identifier trois types de connaissances : les *connaissances descriptives* portent sur les objets et concepts utilisés, les *connaissances procédurales* relèvent de la structure de la tâche, et les *connaissances de raisonnement* représentent les règles heuristiques appliquées par les experts. Ces différents types de connaissances sont formalisés de manière cohérente et homogène au moyen de la norme UML (Unified Modelling Language) dans le but de spécifier un prototype de système d'assistance au calage. Ce prototype est fondé sur un langage de représentation de connaissances (YAKL) lisible par un expert et sur le moteur d'inférence associé (PEGASE+), tous deux développés à l'INRIA<sup>5</sup>. La base de connaissance implémentée se décompose en trois niveaux suivant leur généralité : le premier niveau correspond aux *connaissances génériques* sur le calage de modèles, indépendamment du domaine d'application ; le deuxième niveau regroupe les *connaissances spécifiques au domaine d'application*, ici l'hydraulique fluviale unidimensionnelle ; enfin, le troisième niveau est composé des *connaissances nécessaires à une utilisation avancée* du code de calcul MAGE, développé au CEMAGREF<sup>6</sup>.

La troisième partie de ces travaux présente des tests d'application du prototype sur différents cours d'eau. L'apport de ce système d'assistance est démontré au travers de cas d'étude variés du point de vue de la nature et de la quantité des données de terrain disponibles, mais aussi du point de vue de l'objectif d'utilisation projetée du modèle numérique. Ces tests ont permis d'identifier des directions pour faire évoluer ce prototype semi-interactif en un système totalement autonome. D'une part, un *module d'évaluation symbolique de courbes* est ajouté au prototype dans le but de simuler l'actuelle détection visuelle des incohérences entre résultats numériques et données de référence. D'autre part, un outil d'*optimisation par techniques de recuit simulé* est utilisé pour mettre en lumière la complémentarité des approches quantitatives et qualitatives pour l'ajustement des paramètres.

Ces travaux, à l'intersection de la gestion des connaissances et de l'hydraulique flu-

---

5. Institut National de Recherche en Informatique et Automatique ([www.sop-inria.fr](http://www.sop-inria.fr))

6. Institut National de Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement ([www.lyon.cemagref.fr](http://www.lyon.cemagref.fr))



viale, ont permis plusieurs avancées dans chacun de ces domaines. Du point de vue de l'ingénierie des connaissances, ont été formalisés sur la base de connaissances d'experts une *ontologie* générique pour le calage de modèles numérique et un *paradigme* pour la tâche correspondante. Six étapes principales ont été identifiées dans la tâche de calage : l'affectation des données, la définition des paramètres, leur initialisation, la réalisation de simulations, la comparaison des résultats, l'ajustement des paramètres, et la qualification du modèle obtenu. Du point de vue de l'hydraulique fluviale, la formalisation des connaissances a permis de *capitaliser l'expertise* mise en œuvre pour le calage de modèles d'hydraulique 1-D – ce qui constitue un premier pas vers un *code de bonnes pratiques* pour le calage – mais aussi de formaliser les connaissances requises lors d'une utilisation avancée du code MAGE. Enfin, la mise en œuvre opérationnelle de ces connaissances a conduit à un prototype évolutif d'assistance au calage de modèles hydrauliques. Les facilités de réutilisation des différents niveaux de la base de connaissances implémentée ouvrent de nombreuses perspectives de construction de systèmes d'aide à la validation opérationnelle, en hydraulique fluviale, mais aussi dans d'autres domaines comme l'hydrologie distribuée.

---

## Extended abstract

Numerical models are nowadays commonly used in river hydraulics as flood prevention tools. Computed results have to be compared to field data in order to ascertain their reliability in operational conditions. This process, referred to as *operational validation*, includes the model calibration task. Calibration aims at simulating reference events as accurately as possible by adjusting some physically-based parameters. This thesis, lying within the hydroinformatics domain, deals with the *formalization* of current expert methodology for numerical model calibration in 1-D river hydraulics and with its *integration* within a calibration support system.

The first part of this thesis defines relevant concepts on the basis of a standard terminology, then presents a literature review and an analysis of both the different *objects* involved in the calibration process and the *procedures* currently used to achieve this task. Among them, standard optimization techniques have to face equifinality problems. This concept predicts that the same result might be achieved by different sets of parameters. In order to overcome these difficulties, this thesis tackles the model calibration issue with artificial intelligence techniques, and particularly knowledge-based techniques.

The second part deals with the building of a knowledge-based calibration support system. The survey presented in the first part serves us to identify three kinds of knowledge: *descriptive knowledge* is about objects and concepts handled, *procedural knowledge* deals with the task structure, and *reasoning knowledge* represents heuristic rules applied by experts. All kinds of knowledge are formalized in a homogeneous way thanks to the Unified Modelling Language (UML) standard in order to give specifications for a prototype calibration support system. This prototype is built thanks to a human readable knowledge representation language (YAKL) and the associated inference engine (PEGASE+), both developed at INRIA<sup>7</sup>. The implemented knowledge base is structured in three different levels depending on their genericity: the first level corresponds to domain-independent *generic knowledge* about model calibration; the second level gathers *knowledge specific to the domain*, here 1-D river hydraulics; the third level is composed of *knowledge involved in the skilled use* of the MAGE simulation code, developed at CEMAGREF<sup>8</sup>.

The third part of this work presents some application tests of the prototype on different French rivers. Its efficiency is demonstrated throughout real-life case studies on various situations depending on the nature of available field data, on their number, but also on the intended application of the numerical model. These tests bring to light some ways for changing this semi-interactive prototype into a fully autonomous system. On one hand, a *fuzzy symbolic curve evaluation* module is implemented in the prototype in order to mimic the visual identification of discrepancies between computed results and reference data. On the other hand, a *simulated annealing optimization* tool is tested in order to assess the complementarity of numerical and qualitative approaches to refine parameter values.

---

<sup>7</sup>French National Institute for Research in Computer Science and Control ([www.sop-inria.fr](http://www.sop-inria.fr))

<sup>8</sup>French National Institute for Agricultural and Environmental Engineering Research ([www.lyon.cemagref.fr](http://www.lyon.cemagref.fr))

This work, linking knowledge management and river hydraulics areas, led to several advances in both domains. From the knowledge engineering side, both a generic *ontology* for model calibration and a *paradigm* for the corresponding task were determined on the basis of experts' knowledge. Six main steps were identified in the calibration task: data allocation, parameter definition, parameter initialisation, simulation run, outputs comparison, parameter adjustment and calibrated model description. From the river hydraulics side, knowledge modelling allowed to *capitalize the expertise* involved in 1-D hydraulic model calibration –which is a first step towards *good calibration practice*– but also to formalize the knowledge about the skilled use of the MAGE simulation code. Finally, the operationalisation of this knowledge led to an evolutive prototype support system for calibration of river hydraulics models. *Reusability* of the different levels of the implemented knowledge base opens many prospects concerning the building of operational validation support systems, in 1-D hydraulics but also in other domains like hydrology, for physically-based distributed models.

# Introduction

LA SIMULATION NUMÉRIQUE a permis ces dernières décennies d'étudier des rivières en crue au sein même des laboratoires de recherche. Outil devenu aujourd'hui indispensable pour la compréhension des phénomènes physiques (Ghidaglia et Ritaud, 2004), la simulation numérique ne peut pourtant s'affranchir du monde réel, de la véritable rivière, pour confirmer des hypothèses et évaluer les modèles numériques construits. Dans le cadre de la prévention des inondations, les phénomènes de crue et les conséquences d'aménagements réalisés ou projetés<sup>9</sup> sont autant d'éléments que peut aider à comprendre le modèle numérique d'une rivière. Son principal attrait est sa capacité à simuler des événements hypothétiques, ceux précisément engendrant les inondations contre lesquels l'on tente de se prémunir.

## De la qualité d'un modèle numérique

Cette thèse s'intéresse à cet aspect de la simulation numérique qu'est la confrontation du système réel au système modélisé – son « modèle » – en analysant leur comportements respectifs. Cette confrontation est réalisée au travers de tâches diverses à la charge du modélisateur et regroupées sous le terme générique de *validation opérationnelle*. Pour parvenir à une adéquation satisfaisante entre les comportements du système et de son modèle numérique, le modélisateur doit « caler » le modèle – c'est-à-dire déterminer les paramètres de celui-ci – le plus souvent de manière manuelle et donc non reproductible.

Le premier objectif de ces travaux est de proposer une formalisation de la tâche de calage de modèle incluant les différents concepts mis en jeu. Cette formalisation vise à jeter les bases d'un « code de bonnes pratiques » pour la tâche de calage de modèles, et à en proposer une spécification dans le domaine de l'hydraulique fluviale unidimensionnelle. Ces travaux puisent leurs motivations dans le décalage entre les pratiques actuelles liées aux procédures d'évaluation d'un modèle et celles requises dans une logique de qualité – au sens large du terme – pour produire des résultats de modélisation fiables et véritablement utilisables comme outils d'aide à la décision. Ce constat, relayé par des éditoriaux de journaux scientifiques<sup>10</sup>, procède d'un besoin plus général de standardisation de ces pratiques de modélisation (Khatibi, 2001) :

*Safeguarding the integrity of model results can [...] be promoted if modeling procedures are formalized.*

9. L'exemple des aménagements réalisés depuis plus d'un siècle sur le Rhône et leurs conséquences sur les inondations ont récemment fait l'objet d'un dossier dans le magazine GEO (Chatelain *et al.*, 2004).

10. Voir notamment la suite de forums dans le *Journal of Environmental Engineering* (Rossman, 1997; Walski, 1998; Whittemore, 2001).

Cette thèse apporte ainsi une contribution à ce besoin de formalisation en proposant une formalisation du *paradigme* actuel pour la tâche de calage de modèles numériques.

Le deuxième objectif de ces travaux est de mettre en œuvre de manière opérationnelle ces connaissances au sein d'un système d'assistance au calage de modèles d'hydraulique fluviale unidimensionnelle. Les connaissances formalisées sur cette tâche vont être associées à un moteur d'inférence pour constituer un *système à base de connaissances*. Ce système doit ainsi permettre d'assister le modélisateur dans la tâche de calage conformément au « code de bonnes pratiques » identifié. Le système projeté vise à prendre en charge une grande partie du processus de calage et de proposer de manière interactive des solutions au modélisateur lorsque les connaissances formalisées ne suffisent pas à répondre au problème posé.

## Position des travaux

Cette thèse s'inscrit à l'intersection de plusieurs domaines et disciplines scientifiques possédant leurs propres axes de recherches et représentés sur la figure 1. Nous avons d'une part les sciences liées à l'eau<sup>11</sup> qui incluent l'hydraulique fluviale. D'autre part, le domaine de la modélisation numérique – au sens du terme anglais *simulation*, utilisé en recherche opérationnelle – englobe la problématique spécifique de calage. Enfin, nous avons à considérer le vaste domaine de l'intelligence artificielle, et plus particulièrement les systèmes à base de connaissances. Les travaux de ce mémoire se positionnent à l'intersection – ou plutôt *aux* intersections – de tous ces domaines et sous-domaines, que nous allons préciser ci-dessous.

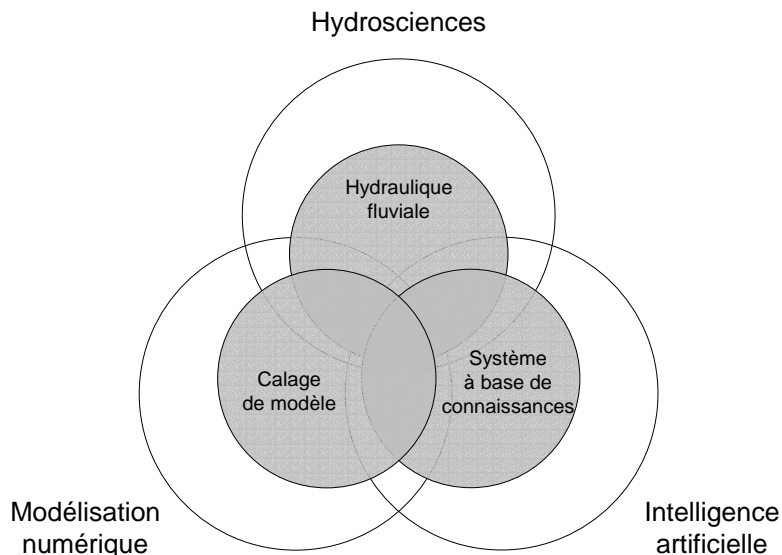


FIG. 1 – *Positionnement des travaux de ce mémoire.*

11. Nous avons choisi d'utiliser ici le néologisme dérivé directement du terme anglais *hydrosiences*.

## Hydraulique et modélisation numérique

L'*hydroinformatique* est une jeune discipline<sup>12</sup> dont les bases ont été jetées il y a un peu plus de dix ans par Abbott (1991). Bâtie à l'origine autour de l'hydraulique numérique, l'hydroinformatique s'affirme depuis comme le croisement hybride des sciences de l'eau et des technologies de l'information. Au terme de quatre générations de modélisation, les outils hydroinformatiques mettent aujourd'hui à disposition des utilisateurs des systèmes à la fois performants et conviviaux (Abbott *et al.*, 1991). L'introduction de ces systèmes a profondément changé la pratique de cette vénérable discipline qu'est l'hydraulique (Abbott, 1994). En effet, la modélisation hydraulique n'est plus seulement comme à ses débuts une affaire d'experts, et quiconque possédant un code de calcul peut aujourd'hui s'improviser « modélisateur ». Malheureusement, l'utilisation de systèmes performants ne peut remplacer totalement l'expertise, notamment lors de l'évaluation de la qualité d'un modèle (Vidal, 2004).

## Hydroinformatique et intelligence artificielle

Anticipant ces inconvénients inhérents à la quatrième génération de modélisation, Abbott (1991, p. 27-29) prévoyait l'apparition d'une nouvelle génération à l'intersection des travaux de l'hydraulique numérique et de l'intelligence artificielle. Les outils de cette nouvelle génération devaient ainsi encapsuler les connaissances des « experts » en hydraulique numérique pour les diffuser aux autres acteurs de la gestion de l'eau :

*The problem of fifth-generation modelling is then that of expressing the knowledge and capabilities of the experts in terms of a discourse of another and more average intelligibility.*

Cette nouvelle génération promise par Abbott n'a pas encore vu le jour – comme l'affirme Harvey (2002) – et sa définition exacte reste à poser. Pourtant, de nombreux travaux ont porté sur la mise au point d'outils intégrant hydraulique numérique et intelligence artificielle (voir Price *et al.*, 1998).

Parmi les diverses branches de l'intelligence artificielle<sup>13</sup>, les techniques de systèmes à base de connaissances qui nous intéressent ici ont permis d'aborder principalement deux sujets en hydraulique fluviale. Le premier est l'assistance – pour l'essentiel interactive – à la modélisation numérique (Chau et Wen-Wu, 1992, 1993; Chau et Yang, 1994). Le deuxième concerne la sélection de la méthode de modélisation hydraulique – méthode de propagation et paramétrage numérique – à mettre en œuvre (Chau et Zhang, 1995; Chau *et al.*, 2002a) à partir de critères « experts » formalisés par ailleurs (voir notamment Moussa et Bocquillon, 1996, 2000). Fait assez surprenant en regard de l'importance qu'elle revêt dans le processus de modélisation, la validation opérationnelle est la grande absente des problèmes d'hydraulique fluviale abordés par les systèmes à base de connaissances.

La tâche spécifique de calage de modèles hydrauliques n'a fait l'objet d'aucun traitement à l'aide d'un système à base de connaissances, au contraire de l'hydrologie où les initiatives en ce sens sont légion (Delleur, 1991; Simonovic, 1991). De nombreux modules « experts » dédiés à assister l'utilisateur dans cette tâche ont ainsi été ajoutés au

12. Ou plutôt *technologie*, pour reprendre les termes d'Abbott.

13. En hydroinformatique, on peut notamment constater depuis quelques années la multiplication de travaux portant sur les algorithmes génétiques et les réseaux de neurones.

début des années 1990 à des codes de calcul hydrologiques existants<sup>14</sup>. La plupart de ces modules appartenaient à la première génération de système experts (Jackson, 1999) qui ne possédait qu'une représentation des connaissances assez pauvre, sous la forme de règles de production<sup>15</sup>. De plus, ces systèmes ne constituaient pas une véritable intégration mais plutôt une juxtaposition d'outils *numérique* (le code de calcul) et *symbolique* (le module d'aide experte).

Nous nous proposons donc dans ces travaux d'apporter une contribution à l'intégration symbolique/numérique et à l'émergence d'une nouvelle génération de modélisation en hydroinformatique, en utilisant des techniques de *systèmes à base de connaissances* pour le *calage* de modèles numériques en *hydraulique fluviale* unidimensionnelle.

## Plan du manuscrit

Le manuscrit est constitué de trois parties : la partie I s'attache à donner un cadre de référence pour nos travaux avant de dresser un inventaire et une analyse des connaissances associées au calage de modèles en hydraulique fluviale unidimensionnelle, la partie II propose le développement d'un prototype de système d'assistance au calage de modèles hydrauliques, et la partie III est consacrée à l'expérimentation de ce prototype et aux retours d'expérience qui en découlent.

### Première partie : Inventaire et analyse des connaissances

Le chapitre 1 constitue une introduction à la tâche de calage de modèles numériques. Il permet de définir celle-ci au travers d'un référentiel terminologique et d'un cadre méthodologique pour la modélisation numérique. Sur la base de ces définitions, le chapitre 2 détaille ensuite pour le domaine de l'hydraulique fluviale unidimensionnelle les différents objets intervenants au cours de la tâche de calage : code de calcul, données et paramètres. Le chapitre 3 présente enfin comment ces différents objets sont employés dans la pratique pour mener à bien cette tâche. Les différentes méthodes d'estimation *a priori* des paramètres et d'ajustement de ceux-ci sur la base de données de référence sont ainsi analysées et comparées.

### Deuxième partie : Développement d'un système d'assistance au calage

Le chapitre 4 propose une formalisation homogène et cohérente de l'ensemble des objets et procédures étudiés dans la partie précédente. Ces connaissances sont représentées en grande partie à l'aide de la norme graphique UML. La base de connaissances ainsi constituée représente une capitalisation de ces connaissances sous la forme d'un « code de bonnes pratiques » pour le calage de modèles hydrauliques. Le développement d'un prototype de système d'assistance au calage, présenté dans le chapitre 5, permet de mettre en œuvre cette base de connaissances de manière opérationnelle. Le prototype s'appuie sur des outils de pilotage de programmes développés à l'INRIA et sur le code de calcul MAGE développé au CEMAGREF.

---

14. On peut citer notamment SMAPEX (Azevedo *et al.*, 1993) pour le code SMAP, ESCALOS (Baffaut et Delleur, 1989, 1990) puis KBSWMM (Liong *et al.*, 1991*b,a*, 1993) pour le code SWMM, HYDRO (Reboh *et al.*, 1982) puis HSPEXP (Lumb et Kittle, 1993; Lumb *et al.*, 1994) pour le code HSPF, SACRE (Lussier *et al.*, 1990) pour le code SSARR ou encore EXSRM (Engman, 1988) pour le code SRM.

15. Du type : Si *Conditions* Alors *Actions*.

### **Troisième partie : Applications du prototype**

Les modèles numériques de deux rivières – la Lèze et l’Hogneau – ont servi de cas d’étude pour le prototype. Ces expérimentations sont présentées et commentées dans le chapitre 6 pour le cas de la Lèze, et dans le chapitre 7 pour le cas de l’Hogneau. Chacun de ces cas d’études permet ainsi de tirer de nombreux retours d’expériences sur le système d’assistance au calage et de dégager plusieurs perspectives pour son évolution.





**Première partie**

**Inventaire et analyse des  
connaissances**



# Chapitre 1

## Définitions

« *Numerical models are a form of highly complex scientific hypothesis.* »

Naomi ORESKES *et al.*<sup>1</sup>

CE PREMIER CHAPITRE témoigne de la dimension de la sémantique dans le domaine de la modélisation numérique. Pour pallier les difficultés liées à la transdisciplinarité des concepts associés à ce domaine, un référentiel terminologique va être mis en place sur la base de plusieurs résultats issus de la littérature. Il va ensuite servir de base à l'élaboration d'un cadre méthodologique pour la modélisation numérique, cadre dans lequel vont s'insérer nos travaux. Enfin, vont être évoqués quelques aspects du modèle numérique, non plus comme concept mais comme objet d'échange, au sein de la communauté scientifique et au-delà.

### 1.1 Notions de sémantique en modélisation numérique

La première étape de construction du cadre de notre travail passe par une définition précise des termes centraux de cette thèse. En effet, l'interdisciplinarité de ce travail nécessite l'établissement d'un consensus sur le vocabulaire employé, afin de rendre moins périlleuse la manipulation de concepts transversaux tels que *modèle*, *calage* ou *paramètre* (Jebari, 2004). Cette section, au travers de quelques exemples issus de la littérature, met en exergue la difficulté d'établir une terminologie interdisciplinaire consensuelle pour la modélisation numérique. L'exemple du terme *modèle* permet de prendre conscience de l'extrême diversité des définitions acceptées au sein de la communauté scientifique. Les limites des principaux référentiels proposés dans la littérature sont ensuite présentés.

#### 1.1.1 Revue de littérature introductive

De nombreuses manifestations réunissent depuis des dizaines d'années des concepteurs et des utilisateurs de modèles numériques de tous horizons, donnant lieu à différentes tentatives d'unification terminologique. On peut citer notamment les communications effectuées depuis une vingtaine d'années durant la *Winter Simulation Conference*

---

1. Naomi ORESKES, Kristin SHRADER-FRECHETTE et Kenneth BELITZ (1994), Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth-sciences. *Science*, vol. 263, n° 5147, p. 641–646.

par Sargent. La motivation de ces travaux se trouve dans un constat simple : les praticiens utilisent un vocabulaire commun mais des définitions spécifiques à leur domaine. Ce constat a été énoncé clairement par Balci et Sargent (1984) :

*A review of the published literature indicates that a uniform, standard terminology is yet nonexistent. Several terms are used. Sometimes, a term used by a modeler in one area has a different meaning when used by a modeler in another area.*

Ce constat effectué il y a maintenant vingt ans reste malheureusement toujours d'actualité, et certains auteurs, dont Abbott (2002), relèvent les dangers – ou tout du moins les effets négatifs – de l'incompréhension qui résulte de cet état de fait :

*Words such as 'sign', 'symbol', 'icon', 'model', 'calibration', 'validation' and so on are frequently used with little regard to their precise meanings. Although, once again, this may be of little real consequence in casual conversation, it can lead to great confusion when matters of some substance, such as are not everyday and average, must none the less be discussed. This confusion in turn leads to apparently endless discussions which seem to have no definite outcomes at all — or may even lead to outcomes that were never intended.*

Et comme précisé par Abbott, même le terme de *calage* ne trouve pas d'acceptation sinon universelle du moins consensuelle parmi la communauté des modélisateurs, au point même – comme l'évoque Hornung (1996) – de brouiller les frontières avec un terme allant souvent de pair, celui de *validation* :

*... there is quite a misunderstanding about the difference between calibration and validation among many modellers.*

Cet état de fait a notamment été relevé par Sheng *et al.* (1993) dans une revue des rapports de plusieurs projets internationaux portant justement sur la validation de modèles. Et l'on en est ainsi réduit comme Khatibi *et al.* (1997) à produire des spéculations sur les définitions sous-entendues par les auteurs d'articles pour identifier les concepts mis en œuvre :

*There is a clear tendency in the literature to reserve the word 'estimation' for calibration and 'identification' for automatic methods.*

L'examen de ces quelques extraits d'articles scientifiques permet de prendre conscience de la difficulté de définir une terminologie dans laquelle tous les acteurs puissent se retrouver. Et il faut ajouter que ces passages sont restreints à la communauté des chercheurs et n'évoquent pas la question de la communication avec les autres acteurs impliqués, à savoir les services opérationnels et les décideurs. Or, cette terminologie se doit d'être le pilier central d'un système à base de connaissances tel que nous souhaitons le construire : sans termes consacrés, pas de connaissances formalisables.

### 1.1.2 Exemple du terme *modèle*

La définition de ce terme central se pose comme un préalable essentiel à toute manipulation du – ou des – concept sous-jacent. Nouvel (2002) a récemment consacré un recueil de réponses apportées par des spécialistes de domaines divers, depuis la biologie jusqu'à l'économie en passant par les sciences de l'environnement. Cet ouvrage permet d'appréhender l'extrême diversité des définitions du mot *modèle* – et des concepts sous-jacents – acceptées au sein du monde scientifique. Pour plus de précisions sur les

différents concepts recouverts, en français comme en anglais, par ce mot, le lecteur pourra se rapporter aux considérations correspondantes de Morton et Suárez (2001).

Il est important de garder à l'esprit qu'un modèle – qu'il soit conceptuel, numérique ou autre – n'est rien d'autre, pour reprendre les termes de Bouleau (1999, p. 301), qu'un « simulacre utile », une « représentation partisane ». Les produits d'un modèle numérique par exemple doivent ainsi être utilisés avec toutes les précautions que ces paraboles suggèrent. Et comme nous allons le voir dans la suite, la tâche de calage permet de se rendre compte en partie de la fidélité de cette représentation et de l'améliorer le cas échéant.

### 1.1.3 Vers un référentiel terminologique

La nécessité de parler une langue commune a donc motivé plusieurs tentatives de développement de référentiels terminologiques qui ont été plus ou moins couronnées de succès. Cette section présente le plus abouti d'entre eux, développé à la fin des années 1970, puis les modifications qui lui ont été apportées depuis. Enfin, nous verrons les limites de ce référentiel pour notre cadre de travail.

#### Première proposition

Un comité interdisciplinaire (*SCS Technical committee on Model Credibility*) a jeté les premières pierres d'un référentiel terminologique (Schlesinger *et al.*, 1979) en s'appuyant sur un schéma synthétique présentant les différents éléments de l'environnement de simulation et les relations les liant entre eux. Ce schéma est représenté sur la figure 1.1. Dans ce diagramme les flèches intérieures tiretées décrivent les processus permettant de passer d'un élément à un autre, et les flèches extérieures font référence aux procédures qui évaluent la crédibilité, la fiabilité, de chacun de ces processus. Ce référentiel a été utilisé en hydrologie, notamment par Refsgaard (1996).

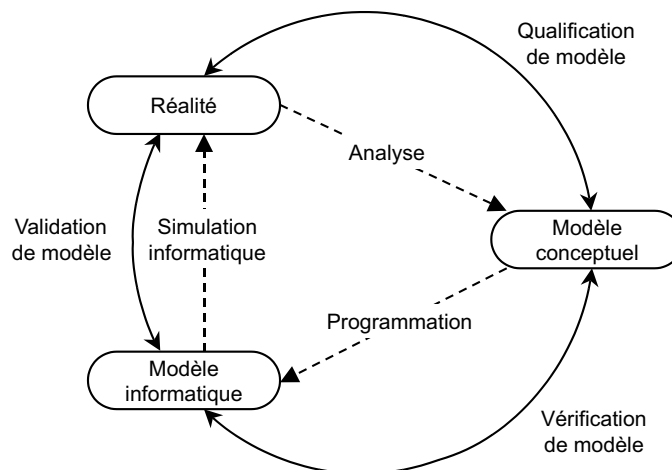


FIG. 1.1 – Référentiel de modélisation de Schlesinger et al. (1979).

#### Introduction du terme de *validation opérationnelle*

Sargent a repris ce diagramme de nombreuses fois lors de communications à la *Winter Simulation Conference* (1984; 1999; 2000; 2001) en lui adjoignant toujours

plus de relations et en adaptant sensiblement la terminologie. Le référentiel de Sargent a été employé par Knepell et Arangno (1993) pour introduire la structure des processus d'évaluation d'une simulation numérique. Le terme de *validation de modèle* est abandonné dans ce nouveau référentiel au profit du terme de *validation opérationnelle*<sup>2</sup>. Selon la définition de Knepell et Arangno, (p. 3-25), ce processus vise ainsi à s'assurer de la correspondance du modèle informatique avec la réalité perçue.

### Limites de ces référentiels

Dans les formulations précédentes, on peut noter l'utilisation du terme *modèle* dans la sémantique de plusieurs procédures d'évaluation de la crédibilité. Leurs définitions nécessitent de fait de préciser de quel modèle il s'agit, modèle *conceptuel* ou modèle *informatique*.

De plus, malgré ces nombreuses formalisations, une caractéristique importante dans le contexte actuel de la modélisation n'est pas représentée : la distinction entre *code de calcul* et *modèle numérique d'un système donné*. En effet, dans le domaine qui nous intéresse, cette distinction est effective depuis le passage de la troisième à la quatrième génération de modèles numériques, lors de la mise en place de systèmes génériques permettant de développer des modèles numériques spécifiques<sup>3</sup>. Cette distinction se révèle particulièrement importante dans la définition du terme *calage*, comme le souligne Flavelle (1992) :

*Calibration means modifying the values of adjustable parameters in a computer code so that the calculated results match a given set of test data, or 'tuning' the model. This is done when the computer code is applied to a particular problem, and is not part of development of the software.*

## 1.2 Proposition d'un cadre terminologique

Les limites des référentiels décrits dans la section précédente nous ont conduit à chercher un nouveau référentiel de modélisation numérique plus en adéquation avec le domaine de l'hydroinformatique. Cette section présente ainsi le référentiel développé par Refsgaard et Henriksen que nous allons adopter dans la suite du document. Des précisions seront apportées à la notion de calage, et l'on verra comment cette activité s'inscrit dans un contexte plus large d'évaluation d'une modélisation.

### 1.2.1 Le référentiel de Refsgaard et Henriksen

Dans le cadre du projet européen HARMONICQUA<sup>4</sup>, un rapport a été produit sur l'état de l'art des procédures d'assurance qualité pour la modélisation numérique relative à la gestion de bassins versants (Refsgaard, 2002). Le troisième chapitre de ce rapport (Refsgaard et Henriksen, 2002)<sup>5</sup> est ainsi consacré à la proposition d'un cadre théorique pour un guide en modélisation. Les auteurs proposent ainsi un nouveau référentiel terminologique, reproduit sur la figure 1.2. Ce référentiel reprend le principe

---

2. Proposition de traduction du terme anglais *operational validation*.

3. « *Tools for building tools* » (Abbott, 1991, p. 19).

4. *Harmonising Quality Assurance in model based catchment and river basin management* ([www.harmoniqua.org](http://www.harmoniqua.org))

5. Ce chapitre a été adapté récemment en article (Refsgaard et Henriksen, 2004).

de celui développé par Schlesinger *et al.* en distinguant le *code de calcul* du *modèle numérique*. Les définitions précises des différents éléments et procédures sont regroupées dans le tableau 1.1. Cette distinction conduit ainsi à scinder les procédures de validation du modèle et de vérification du modèle définies par Schlesinger *et al.* en trois nouvelles procédures :

- la *vérification du code* permet de vérifier l’implémentation informatique du modèle conceptuel ;
- le *calage de modèle* s’attache à ajuster les paramètres du modèle numérique en vue de reproduire la réalité dans les limites de précision demandées ;
- la *validation du modèle* consiste quant à elle à s’assurer que le modèle numérique possède un niveau de précision cohérent avec l’application demandée.

Dans toute la suite du mémoire, nous nous appuyerons sur ce référentiel terminologique, auquel vont être apportées quelques précisions dans la section suivante.

### 1.2.2 Précisions sur la notion de *calage*

Comme pour le terme *modèle*, plusieurs concepts semblent se dessiner sous l’appellation de *calage* (Morton et Suárez, 2001). Nous nous en tiendrons à celui que nous allons tenter d’identifier au travers de quelques définitions extraites de la littérature. Ces définitions apportent des précisions sur plusieurs aspects du calage évoqués seulement de manière succincte dans le référentiel de Refsgaard et Henriksen. Ces précisions seront reprises dans le cadre méthodologique présenté dans la section 1.3.

#### Niveau de correspondance attendu

Comme rappelé par Scholten *et al.* (2001), le calage vise à reproduire le plus fidèlement possible le comportement du système considéré, celui-ci étant identifié par des mesures directes :

*Calibration aims at the reduction of differences between field observations and corresponding model outcomes.*

Le comportement du système ne peut être reproduit idéalement, puisqu’un modèle est par nature imparfait. Un *niveau de correspondance attendu* doit donc être défini, pour guider la tâche de calage du modèle, mais aussi celle de validation du modèle.

#### Un jeu de données de référence

Durant le calage, des paramètres du modèle vont être ajustés pour reproduire les caractéristiques observées du comportement du système, représentées par un jeu de données de référence (Tsang, 1991) :

*Model calibration is the process by which certain unknown parameters to be used in applying a code are determined by comparing modeling results with available data, which the model is required to simulate.*

Ce jeu de données correspond le plus souvent à un ou plusieurs événements passés (Cunge, 2003) :

*Calibration [...] consists in executing a number of simulations of past observed events and in varying the parameters of the model until an acceptable (to the modeller) coincidence between observations and computations is obtained.*



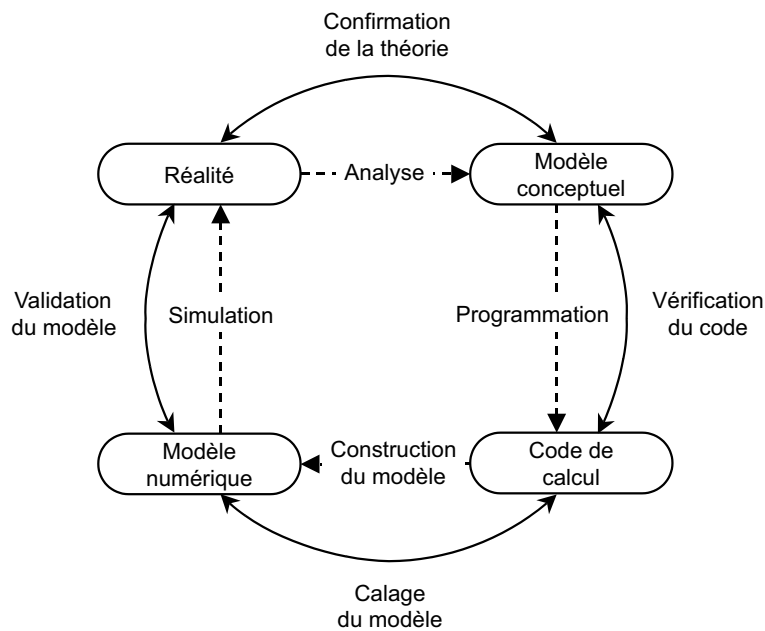


FIG. 1.2 – *Éléments d'une terminologie en modélisation, d'après Refsgaard et Henriksen (2004).*

Terme	Définition générique
Réalité	Type de système naturel
Modèle conceptuel	Description verbale, équations, relations fonctionnelles, ou « lois naturelles » tendant à décrire le type de système considéré
Code de calcul	Programme informatique formalisant de manière générique le comportement du type de système considéré
Modèle numérique	Description informatisée du système particulier étudié
Analyse	Établissement de lois régissant un type de système
Programmation	Développement d'un code transcrivant de manière informatique un modèle conceptuel
Construction du modèle	Établissement d'un modèle du système étudié à l'aide d'un code de simulation générique
Simulation	Utilisation d'un modèle validé pour obtenir des prédictions sur un système donné
Confirmation de la théorie	Détermination de l'adéquation du modèle conceptuel au type de système considéré avec un niveau de correspondance acceptable pour le domaine d'application visé
Vérification du code	Contrôle de la représentation informatique du modèle conceptuel dans les limites de correspondance attendues
Calage du modèle	Ajustement des paramètres du modèle numérique en vue de reproduire la réalité avec le niveau de correspondance attendu
Validation du modèle	Établissement que le modèle numérique, dans son domaine d'applicabilité, possède un niveau de correspondance cohérent avec le domaine d'application visé

TAB. 1.1 – *Glossaire de modélisation développé par Refsgaard et Henriksen (2004) – Proposition de traduction.*

On peut noter ici l'importance des *données* qui n'apparaissent pourtant pas explicitement dans le référentiel de Refsgaard et Henriksen. Nous reviendrons bien évidemment sur ce point dans la suite du document, et notamment dans la section 2.4.2 du chapitre 2.

### Domaine d'application visé

Le processus d'ajustement ainsi que la manière d'évaluer la concordance entre données observées et résultats de simulation vont en outre dépendre fortement des objectifs futurs du modèle. Ainsi, un modèle hydraulique ou hydrologique destiné à la prévision de crues se doit de reproduire les caractéristiques de crues passées, et pas nécessairement les périodes d'étiage (Guinot et Gourbesville, 2003). Le *domaine d'application visé* du modèle apparaît ainsi comme essentiel dans le processus de calage, mais aussi dans les autres étapes d'une modélisation numérique – et notamment la validation (Goodrich, 1992) – comme on le verra dans la section 1.3.

### 1.2.3 Typologie des situations rencontrées en modélisation

Cette section présente les différents cas auxquels peut être confronté un utilisateur/-concepteur de modèles numériques, et comment le *calage* et la *validation* s'inscrivent dans cette typologie basée sur une approche systémique.

#### Approche systémique

L'approche adoptée dans cette section est résumée par la figure 1.3. Un modèle est ainsi défini – dans une acceptation systémique (Le Moigne, 1990) – comme utilisant des *intrants* pour produire des *extrants*. Les paramètres sont considérés comme partie intégrante du modèle. En hydraulique fluviale, on peut voir de façon schématique les intrants comme les conditions limites et initiale, et les extrants comme les hauteurs d'eau et les débits le long du tronçon de rivière modélisé, pendant la période considérée.

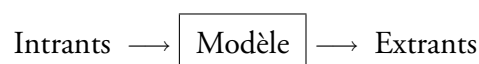


FIG. 1.3 – *Approche systémique de la modélisation.*

#### Problèmes direct et inverse

On peut classer les problèmes rencontrés en modélisation en deux grandes catégories : d'une part le *problème direct* qui vise à déterminer les extrants, les intrants et le modèle étant présumés connus. L'usage « productif » des modèles hydrauliques correspond à ce type de problème, qui comporte deux situations possibles suivant la connaissance sur les intrants : d'une part la *prévision* dans laquelle les intrants sont réellement connus (suivi en temps réel de la propagation d'une crue), et d'autre part la *prédiction* dans laquelle les intrants représentent une situation hypothétique (simulation d'une crue centennale). Les autres problèmes sont qualifiés de *problèmes inverses* et regroupent plusieurs types de situations.

### Situations en problème inverse

Deux types de situations peuvent se présenter à un modélisateur lors de la résolution d'un problème inverse :

- l'*identification* revient à déterminer le modèle correspondant à un couple intrant / extrant donné. Dans le cas de la modélisation hydraulique, cette situation revient à construire un modèle numérique en déterminant ses paramètres, c'est-à-dire en réalisant un *calage* de celui-ci ;
- la *détection* consiste à retrouver l'entrée qui produit une sortie donnée d'un modèle connu. En hydraulique, on peut relier cette situation à la reconstitution des apports à l'amont d'un bief (reconstitution des conditions limite amont), mais aussi à la reconstruction de l'état initial. On discerne ainsi plusieurs types de situations – que l'on va regrouper sous le terme *détection* – qui dépendent de la partie inconnue des intrants : condition limite, condition initiale ou autre.

Cette typologie, résumée dans le tableau 1.2 adapté de Cunge (1975), a été synthétisée par Wasantha Lal (1995).

<i>Problème</i>	<i>Situation</i>	<i>Intrants</i>	<i>Modèle</i>	<i>Extrants</i>
Direct	Prévision	connus	connus	?
	Prédiction	hypothèses	connus	?
Inverse	Identification	connus	?	connus
	Détection	?	connus	connus

TAB. 1.2 – *Typologie des situations en modélisation, adapté de Cunge (1975).*

#### 1.2.4 De l'évaluation d'une modélisation au calage du modèle

Cette section présente les différentes facettes de l'évaluation d'une modélisation, et comment la validation opérationnelle définie plus haut s'inscrit dans ce cadre plus général. Ensuite, le calage du modèle – mais aussi la validation du modèle et une partie de la vérification du code – est identifié comme une composante de la validation opérationnelle. L'articulation de ces différents concepts est présentée sur la figure 1.4.

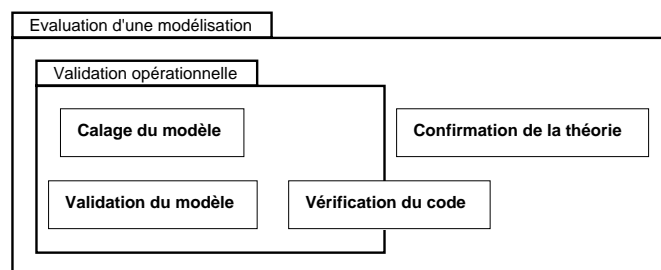


FIG. 1.4 – *Position des processus du référentiel de Refsgaard et Henriksen dans l'évaluation d'une modélisation.*

## Évaluation d'une modélisation

L'évaluation des modélisations numériques a fait l'objet de nombreuses études, notamment dans des domaines sensibles comme la défense militaire (Fosset *et al.*, 1991) ou la contamination des nappes par des radionucléides (Tsang, 1991). Ce dernier article a donné lieu à plusieurs discussions (Goodrich, 1992; Tsang, 1992a; Konikow, 1992; Tsang, 1992b) mettant en relief, d'une part des points de vue différents sur l'évaluation d'une modélisation, et d'autre part les incompréhensions dues à l'absence d'un référentiel terminologique commun.

Dans leur ouvrage intitulé *Simulation Validation—A Confidence Assessment Methodology*, Knepell et Arangno (1993) discernent cinq activités d'évaluation. Nous allons replacer chacune de ces activités dans le cadre du référentiel de Refsgaard et Henriksen :

- la validation du modèle conceptuel correspond à la *confirmation du modèle conceptuel*.
- la vérification du logiciel coïncide avec la *vérification du code* ;
- la vérification de la sécurité interne est reliée à la gestion du logiciel. Cette activité se trouve en-dehors du cadre de ces travaux, puisqu'elle relève de la gestion au sens large du code de calcul ;
- la validation des données vise à s'assurer de la cohérence et de la représentativité des données. Cette activité, non représentée dans notre cadre terminologique, sera évoquée dans la présentation d'un cadre méthodologique pour la modélisation (section 1.3) ;
- la validation opérationnelle regroupe implicitement les processus de *calage de modèle* et *validation de modèle*. Knepell et Arangno se sont en effet basés sur le référentiel de Sargent (section 1.1.3) qui fait intervenir ce terme ;

Nous nous intéresserons dans ce mémoire uniquement à la *validation opérationnelle*, qui s'appuie sur une comparaison des résultats du modèle avec des données issues du système étudié.

## Validation opérationnelle

Sargent (1984) distingue plusieurs approches pour la validation opérationnelle suivant que le système à modéliser est observé ou non<sup>6</sup>. Le tableau 1.3 regroupe les différentes approches possibles. Dans le cadre d'une modélisation hydrologique, un bassin versant non jaugé est un exemple d'un système non observé. En hydraulique fluviale, le système est observé, et l'approche pour la validation opérationnelle est souvent subjective<sup>7</sup> : le calage et la validation s'effectuent à l'aide de graphiques, et l'exploration du comportement du modèle peut s'effectuer à l'aide d'une étude de sensibilité. Dans la suite, le terme de *validation opérationnelle* sera restreint au cas d'un système observé.

Knepell et Arangno (1993) ne font aucune référence à une quelconque distinction de processus assimilables au *calage du modèle* ou bien à la *validation du modèle*. Cependant, les auteurs proposent une batterie de tests réalisables durant l'activité de

6. Sargent utilise le terme anglais *non observable*. Nous avons choisi le terme plus générique « non observé » afin de prendre en compte des systèmes où il n'existe simplement pas actuellement de possibilité d'identifier les réponses à un événement passé. Pour plus de précisions sur les différences de validation opérationnelle entre systèmes *observables* et *non observables*, le lecteur pourra consulter un article de de Marsily (1997).

7. Dans le cas d'un calage par optimisation, l'approche devrait être objective. Nous verrons dans le chapitre 3 qu'il reste pourtant toujours une large part de subjectivité dans ce processus.

	<i>Système observé</i>	<i>Système non observé</i>
<i>Approche subjective</i>	Comparaison de données à l'aide de graphiques Exploration du comportement du modèle	Exploration du comportement du modèle Comparaison à d'autres modèles
<i>Approche objective</i>	Comparaison de données à l'aide de tests statistiques	Comparaison à d'autres modèles à l'aide de tests statistiques

TAB. 1.3 – *Classification des approches pour la validation opérationnelle, d'après Sargent (1984).*

validation opérationnelle, et il est aisé d'extraire ceux correspondant à la tâche de *calage du modèle*, à la *validation du modèle*, mais aussi à la *vérification du code*.

En hydrologie, Klemeš (1986)<sup>8</sup> a proposé un schéma hiérarchique de tests systématiques des modèles, repris par Refsgaard et Knudsen (1996) pour la prédiction de débit sur des bassins jaugés ou non et sujets à des conditions climatiques stationnaires et instationnaires. Refsgaard et Knudsen ont utilisé ce schéma pour la comparaison de trois types de modélisation hydrologique : conceptuelle, distribuée à base physique et mixte.

### 1.3 Proposition d'un cadre méthodologique

Le référentiel adopté dans la section précédente ne nous donne pas de protocole pour effectuer une modélisation. De nombreux auteurs (voir en particulier Ören, 1981; Sheng *et al.*, 1993) ont souligné l'importance de mettre en place non seulement un référentiel terminologique, mais aussi un protocole de modélisation numérique incluant les différentes activités évoquées plus haut. En hydraulique, Carlier (1972, p. 530) propose une mise en œuvre d'un modèle « mathématique »<sup>9</sup> en quatre étapes : conception du modèle, construction du modèle, réglage du modèle et enfin exploitation du modèle. Après une présentation des principaux protocoles recensés dans la littérature, nous proposons à notre tour un protocole de modélisation respectant le référentiel terminologique développé dans la section précédente.

#### 1.3.1 Protocole de Anderson et Woessner

En raison du petit nombre de données de terrain disponibles pour le calage et la validation, l'hydrogéologie s'est très tôt intéressée à la crédibilité de ses modèles, conceptuels et numériques. Dans leur ouvrage sur la modélisation des écoulements souterrains, Anderson et Woessner (1992a) ont développé un protocole conçu comme un guide pour la modélisation. Il consiste en plusieurs étapes mettant en œuvre les principaux objets et processus présents dans notre référentiel. Les auteurs ont de plus introduit dans ce protocole la notion de *sélection de code*. En effet, comme souligné à la page 6, le *modèle informatique* du référentiel de Schlesinger *et al.* est souvent remplacé aujourd'hui par deux entités : le *code de calcul* et le *modèle numérique*. Le modélisateur n'a donc souvent qu'à choisir parmi un ensemble de codes existants celui implémentant

8. Cet article a été repris dans l'ouvrage *Common Sense and Other Heresies – Selected Papers on Hydrology and Water Resources Engineering* (Klemeš, 2000b).

9. Comprendre *numérique*.

au mieux le modèle conceptuel. Ce protocole introduit aussi la notion de *post-audit* (Anderson et Woessner, 1992b), opération consistant à confronter des prévisions réalisées par le modèle avec des données collectées après coup. Cette forme de validation est spécifique à des modèles utilisés comme outils de prévision. Or, les modèles hydrauliques que nous utilisons sont essentiellement destinés à être utilisés comme outils de *prédiction*. Nous ne prendrons donc pas en compte cette étape dans le processus de modélisation numérique.

Refsgaard (1996) a repris ce protocole en lui apportant quelques modifications pour l'accorder avec le référentiel terminologique de Schlesinger *et al.* (1979). Le protocole a été utilisé pour mettre au point un modèle hydrologique distribué d'un bassin versant danois, modèle basé sur le code MIKE SHE<sup>10</sup> (Refsgaard, 1997). Henriksen *et al.* (2003) ont ensuite étendu cette modélisation à l'ensemble du Danemark en ajoutant au protocole des boucles de rétroaction.

### 1.3.2 La qualité anglaise

La société *HR Wallingford* a initié au début des années 1990 une procédure d'assurance qualité pour la modélisation en hydraulique fluviale (Seed *et al.*, 1993). Cette procédure porte sur les points principaux suivants : sélection du code de calcul, définition du modèle, construction du modèle (données topographiques et données hydrométriques), test du modèle<sup>11</sup>, simulations, exploitation du modèle, évaluation des résultats, retour sur expérience et archivage.

### 1.3.3 Les bonnes pratiques hollandaises

Aux Pays-bas s'est affirmée depuis le milieu des années 1990 une volonté de mettre en place des procédures d'assurance qualité dans le domaine de la modélisation et de la simulation numérique pour les sciences de l'eau. Ces volontés se sont finalement concrétisées au sein du groupe d'étude *Good Modelling Practice*.

#### Premières démarches

Au sein du projet intitulé QUASIMODO<sup>12</sup>, le référentiel de Sargent (1984) a été utilisé par Scholten (1994) puis par Scholten et Udink ten Cate (1995) pour établir un schéma détaillé du processus de modélisation. Les auteurs ont intégré ce schéma dans un outil technique d'assurance qualité pour la modélisation baptisé QUASIMODEM<sup>13</sup> (Scholten et Udink ten Cate, 1999).

#### *Generic Framework Water Program*

Au sein du programme AQUEST a été lancée en 1997 l'idée du développement d'un cadre pour la modélisation dans le domaine de la ressource en eau, utilisant les dernières

10. Il est intéressant de noter que ce code, dont le développement a commencé il y a une vingtaine d'années (Abbott *et al.*, 1986a,b), n'a fait l'objet que récemment d'une *vérification*, au sens de notre référentiel (Graham et Jacobsen, 2001). Cette vérification a été accompagnée d'une comparaison de modèles réalisés avec MIKE SHE sur des cas-tests avec des modèles basés sur d'autres codes. Cette dernière opération revient à une *validation* en prenant comme données de référence les résultats d'autres modèles.

11. Dans le texte : *model proving*.

12. QUALITY of Simulation MODElling Objectified.

13. QUALITY of Simulation MODELing Model.

avancées en technologies de l'information. Un programme intitulé *Generic Framework Water Program*<sup>14</sup> a vu le jour en réunissant des instituts fédéraux, des institutions gouvernementales, des compagnies de conseil et des universités (Blind *et al.*, 2000). Trois projets ont ainsi été mis sur pied : *Development Generic Framework Water* (van der Wal et van Elswijk, 2000), qui sera à la base du projet HARMONIT<sup>15</sup>, *Good Modelling Practise*, dont nous allons reparler, et *Umbrella Agreement* pour réunir les modèles et les données nécessaires à la mise en œuvre de l'architecture logicielle.

Le deuxième projet a conduit à la publication d'un outil technique conçu comme un support pour les utilisateurs : le *Good Modelling Practice Handbook*<sup>16</sup> (van Waveren *et al.*, 1999). Ce manuel destiné aux modélisateurs de tous les domaines liés à l'eau (hydrogéologie, hydrologie, distribution d'eau, hydrodynamique, prévision de crues, qualité de l'eau, morphologie, traitement des eaux, écologie, économie, etc.) est constitué de deux parties principales : une description pas à pas de la modélisation de manière générique et une liste des pièges et des sensibilités par domaine. Sont aussi proposés une *check-list* globale et une fiche qualité pour chacune des étapes. Ce manuel<sup>17</sup> se veut ainsi un véritable outil de travail qui accompagne le modélisateur tout au long du processus.

Les recommandations du *Good Modelling Practice Handbook* ont été utilisées au sein de la société *W/L Delft Hydraulics* pour le développement du logiciel SOBEK (Dhondia, 2004). On peut néanmoins regretter qu'aucune directive spécifique à la tâche de calage ne soit fournie aux utilisateurs.

#### 1.3.4 Les outils européens

Sur la base des travaux du *Good Modelling Practice Handbook* (Scholten et Groot, 2002) et d'autres guides – notamment celui produit par Satkowski *et al.* (2000) – le projet HARMONQUA, après les travaux terminologiques de Refsgaard et Henriksen, a développé un logiciel de support pour la modélisation numérique appelé MoST<sup>18</sup> (HARMONQUA Consortium, 2004). Cet outil propose une approche interactive de l'assurance qualité pour la gestion de l'eau basée sur la modélisation numérique (Refsgaard *et al.*, 2004).

Il se pose ainsi comme une aide à la modélisation multidisciplinaire (Scholten *et al.*, 2004) et supporte ainsi les domaines suivants : prévision de crue, hydrogéologie, transformation pluie-débit, socio-économie, qualité de l'eau, écologie, hydrodynamique. Un domaine « générique » est aussi présent et recouvre les notions communes et interdisciplinaires. Le logiciel s'adapte à chacun des acteurs de la modélisation : modélisateur bien sûr, mais aussi client (*water manager*), auditeur, partie prenante (*stakeholder*) ou encore public. Trois niveaux de complexité sont proposés pour la tâche de modélisation, ainsi que trois domaines d'application visés : planification, conception et gestion opérationnelle.

Par le biais d'une interface graphique, MoST propose trois outils (Kassahun *et al.*, 2004) :

- un *guide* pour la modélisation sous forme d'un arbre de tâches, disposé selon trois vues différentes : énumération, diagramme procédural et description textuelle ;

14. [www.genericframework.org](http://www.genericframework.org)

15. [www.harmonit.org](http://www.harmonit.org)

16. Téléchargeable depuis le site du projet : [www.info.wau.nl/researchprojects/gmp.htm](http://www.info.wau.nl/researchprojects/gmp.htm).

17. Pour les lecteurs intéressés, des présentations concises du *Good Modelling Practice Handbook* ont été effectuées par Scholten *et al.* (2000, 2001).

18. Pour *Modelling Support Tool*, téléchargeable sur [www.harmoniqua.org](http://www.harmoniqua.org).

- un *répertoire* des tâches effectuées ;
- un *générateur de rapport* de modélisation, actuellement en développement.

### 1.3.5 Notre proposition

Dans cette section, nous proposons un protocole pour la modélisation numérique basé sur le référentiel terminologique développé dans la section 1.2. Après une description des différents acteurs, le protocole est introduit, avec une présentation en détail de l'activité de construction du modèle.

#### Les acteurs de la modélisation numérique

Scholten et Udink ten Cate (1999), puis Scholten *et al.* (2004) ont proposé une classification des acteurs intervenant dans le processus de modélisation. Le tableau 1.4 contient une proposition plus recentrée sur l'objet « modèle numérique » et développée dans une optique plus réduite de validation opérationnelle.

La figure 1.5 permet de relier les différents rôles aux processus du référentiel terminologique. Cette figure utilise le formalisme graphique UML (Unified Modelling Language) (OMG, 2003) qui sera utilisé tout au long de ce mémoire, et principalement dans la partie II. Les principales notations employées dans ce formalisme sont rappelées dans l'annexe B. Le langage UML est devenu un standard pour la conception en informatique, et est largement utilisé pour représenter des artefacts logiciels. Il nous a ainsi permis de spécifier notre système d'assistance au calage.

On peut noter que les cinq rôles de la figure 1.5 ne représentent pas nécessairement cinq personnes – ou groupe de personnes – différentes. En effet, un même rôle va pouvoir être tenu successivement par plusieurs personnes. Voyons cela au travers d'un exemple : en hydraulique fluviale, la définition du *domaine d'application visé* peut être réalisée en partie par le maître d'ouvrage (par exemple, simulation des niveaux d'eau) et par l'ingénieur chargé de l'étude (par exemple, choix de l'utilisation des équations de Saint-Venant en régime permanent). De plus, la distinction entre ces acteurs va dépendre fortement du contexte de la modélisation :

#### *Dans un contexte d'ingénierie*

Le décideur est à l'initiative de la modélisation ; les phases d'analyse et bien souvent de programmation ont été réalisées en amont et le théoricien et le développeur n'interviennent donc pas ; en revanche, le modélisateur et l'utilisateur sont tous deux représentés par l'ingénieur en charge de l'étude. Ces deux acteurs peuvent être des personnes différentes dans le cas d'une nouvelle étude du même système.

#### *Dans un contexte de recherche*

Le modélisateur, l'utilisateur et le décideur forment une seule et même personne : le chercheur ; il peut aussi être développeur s'il n'existe pas de code de calcul adapté, et même théoricien quand le modèle conceptuel du système est à construire.

#### Processus de modélisation numérique

La figure 1.6 présente le processus de modélisation numérique en accord avec le référentiel de Refsgaard et Henriksen. On retrouve les cinq types d'acteurs présentés



Rôle	Tâches
Théoricien	Élaborer un modèle conceptuel d'un type de système physique
Développeur	Implémenter le modèle conceptuel dans un langage informatique
Modélisateur	Utiliser le code de calcul et des données d'un système physique particulier pour produire un modèle numérique de ce système
Utilisateur	Prédire l'état du système considéré à partir de simulations numériques
Décideur	Déterminer les objectifs de la modélisation et utiliser les résultats de simulation pour prendre des décisions

TAB. 1.4 – Description des rôles dans le processus de modélisation.

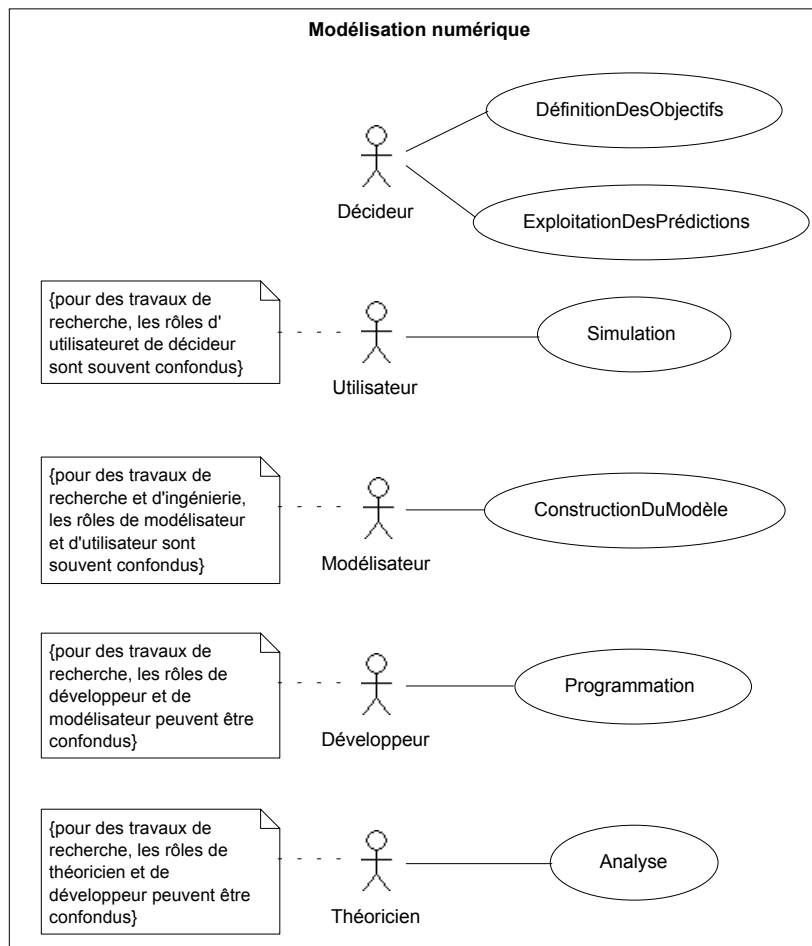


FIG. 1.5 – Rôles en modélisation numérique – Diagramme de cas d'utilisation UML. Les ellipses représentent les tâches associées à chaque rôle.

plus haut ainsi que les activités correspondant à leur(s) rôle(s) dans le processus. On retrouve aussi sur ce diagramme les objets définis dans le référentiel (modèle conceptuel, code de calcul, modèle numérique et prédictions du modèle), mais aussi ceux évoqués dans la section 1.2.2 : *domaine d'application* et *niveau de correspondance*. On peut noter aussi la possibilité d'utiliser des objets pré-existants – modèle conceptuel, code de calcul et même modèle numérique – pour produire des prédictions.

Nous avons pris comme parti de ne pas représenter ici les procédures d'évaluation de la modélisation. Ces procédures seront intégrées, comme on le verra dans la suite, aux différentes étapes de la modélisation qui sont représentées sur la figure 1.6.

### Processus de construction de modèle

Nous allons nous intéresser dans la suite essentiellement à l'activité de construction de modèle. La figure 1.7 détaille ce processus en intégrant trois sous-tâches : le recueil des données, la préparation du modèle et le calage du modèle.

La tâche de *recueil des données* vise à extraire du système physique étudié des données quantitatives – mais aussi qualitatives – permettant de caractériser le système lui-même et les événements qui l'ont affecté. En hydraulique fluviale, le relevé de sections en travers permet de caractériser la topographie de la rivière, et l'enregistrement d'un hydrogramme permet de représenter un événement de crue. Cette tâche doit bien évidemment être réalisée en adéquation avec le domaine d'application visé.

La tâche de *préparation du modèle* s'attache à construire – toujours en respectant le domaine d'application visé – un modèle numérique basé sur un code de calcul et intégrant les données caractérisant le système étudié. En hydraulique fluviale, les données topographiques doivent par exemple être adaptées aux formats requis par le code de calcul. Cette phase de formatage des données peut être extrêmement longue et fastidieuse.

Le modèle numérique obtenu est ensuite soumis à la tâche de *calage du modèle* qui s'effectue à l'aide des données événementielles recueillies et en accord avec le niveau de correspondance attendu.

## 1.4 Le modèle numérique comme objet d'échange et outil à évaluer

Cette section présente quelques réflexions sur le modèle numérique comme objet d'échange entre les différents acteurs impliqués dans son cycle de vie. De nombreuses questions ont ainsi été posées sur la nature de cet objet complexe – objet de recherche ou simple outil de travail – et sur son passage du « créateur » du modèle à un « simple » utilisateur<sup>19</sup>. Cette section aborde ensuite des questions d'ordre plutôt philosophique sur l'approche à adopter vis-à-vis de l'évaluation de la crédibilité d'un modèle. De multiples auteurs se sont interrogés sur la validité de ces procédures d'évaluation de la crédibilité des processus de modélisation numérique, et notamment sur la pertinence du calage et sur le bien-fondé de la validation. Ces deux problématiques vont être abordées ici afin d'apporter quelques éléments de réponse.

19. La dimension sociétale de la modélisation numérique est notamment très présente dans l'ouvrage fondateur de l'hydroinformatique (Abbott, 1991).

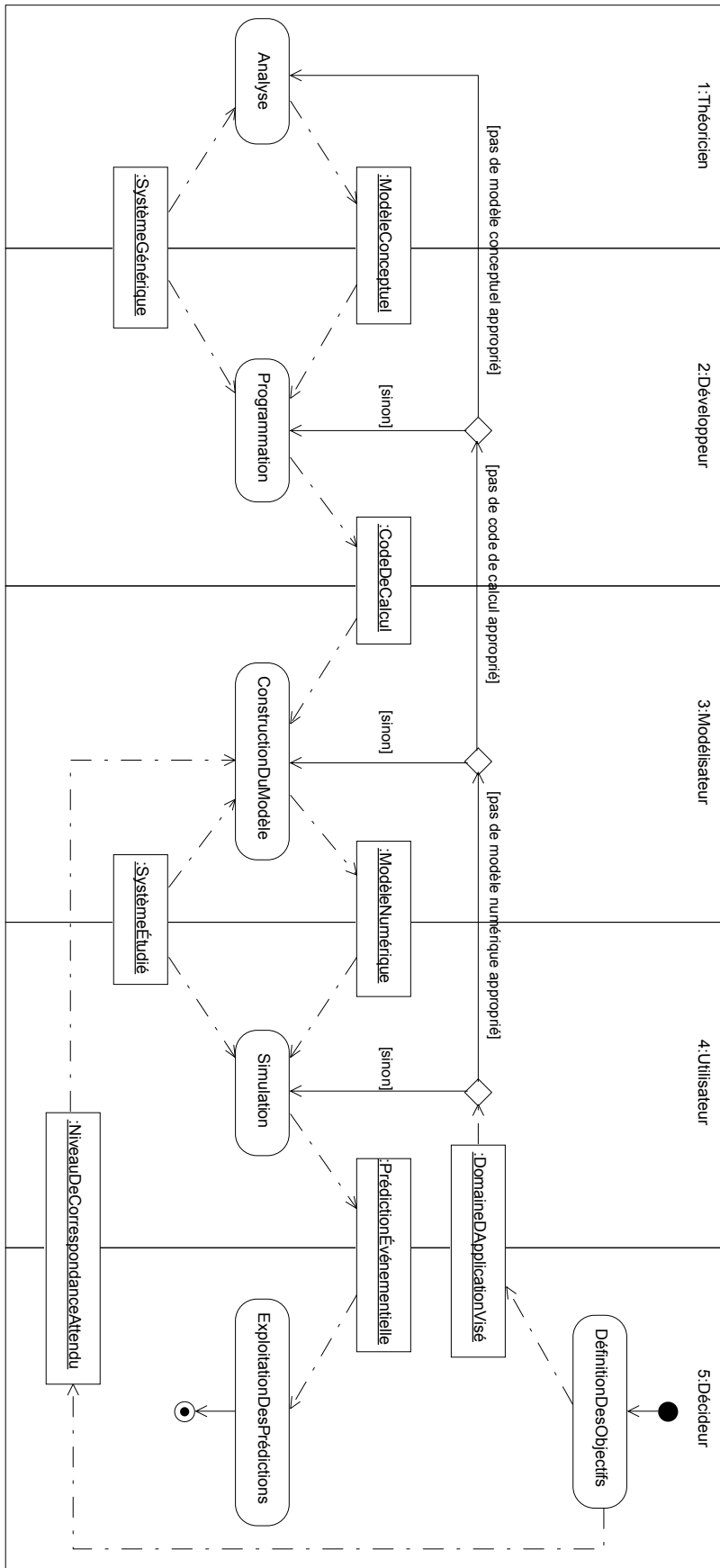


FIG. 1.6 – Processus de modélisation numérique – Diagramme d'activité UML. Les cinq travées séparent les éléments utilisés par chaque acteur de la modélisation. Le processus débute au disque noir pour se terminer au disque noir et blanc. Les rectangles arrondis représentent les différentes sous-tâches du processus de modélisation, qui génèrent les objets représentés par des rectangles au contenu souligné. Les points de décisions lors de transitions entre différentes sous-tâches sont matérialisés par des losanges.

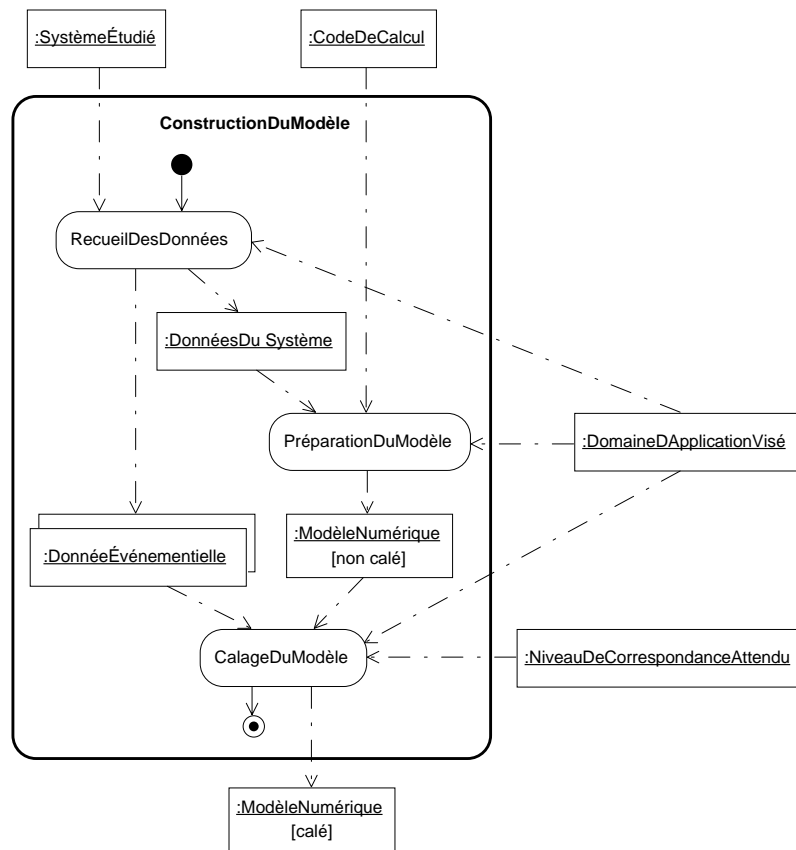


FIG. 1.7 – Processus de construction du modèle – Diagramme d'activité UML.

La modélisation numérique, comme on l'a vu plus haut, fait intervenir de nombreux acteurs du monde scientifique et au-delà. Les prédictions réalisées par les modèles numériques en hydroinformatique sont utilisées pour dimensionner des ouvrages d'art, déterminer des zones inondables, etc. Leurs apports dans notre vie quotidienne se révèlent ainsi grandissants et déjà considérables. L'évaluation des simulations réalisées à l'aide de modèles numériques se doit donc d'être d'autant plus performante pour rendre celles-ci dignes de confiance et utilisables comme aides à la décision.

Pour toutes ces raisons, Friedman *et al.* (1984) ont présenté il y a déjà une vingtaine d'années une revue de l'utilisation des modèles dans les domaines liés à l'eau auprès des instances nationales et fédérales des États-Unis. Leurs conclusions quant à la crédibilité des modèles peut être résumée dans les points suivants :

- le développement de nouveaux modèles a souvent primé sur le calage et la validation. Ce point sera repris dans la section 1.4.1 ;
- les résultats de ces modèles n'ont pas été accompagnés d'un niveau d'incertitude et ont provoqué une désaffection des décideurs suite à des utilisations inappropriées. Ces conclusions seront développées dans la section 1.4.2 ;
- la fiabilité de nombreux modèles est contestable, en raison notamment de mauvaises pratiques liées au calage. Cette position sera reprise et argumentée dans la section 1.4.3 ;
- dans certains cas, les théories ne sont pas assez avancées pour fournir des modèles conceptuels crédibles. Cette considération sera évoquée dans la section 1.4.4.

#### 1.4.1 Le modèle numérique, entre objet de recherche et outil d'ingénierie

Dix ans après l'article de Friedman *et al.*, l'*American Society of Civil Engineers* a mis en place un comité d'étude sur la définition de critères pour l'évaluation de modèles de bassins versants. Les résultats de cette étude développent une critique des articles parus dans les revues scientifiques suivant trois points (ASCE, 1993) : les critères d'évaluation des modèles sont souvent absents, peu de tests sont réalisés dans des conditions différentes et les modèles ne sont accompagnés que d'une maigre documentation.

Cunge (2003), reprenant les idées de Klemesš (1986), souligne la dualité de l'objet modèle numérique. Dans le domaine de l'hydroinformatique, nombre de modèles considérés comme objets de recherche sont actuellement très vite utilisés comme outils pour résoudre des problèmes d'ingénierie. Le danger de cette situation est l'immaturation de ces modèles pour produire des résultats fiables. En effet, le passage au statut d'outil d'ingénierie ne peut se faire que par le biais d'une validation, qui est loin d'être prioritaire pour les chercheurs.

Les modèles basés sur des codes développés au CEMAGREF sont un parfait exemple de cette dualité. En effet, les missions de recherche et d'appui technique sont intimement liées au sein de cet organisme de recherche finalisée. Malheureusement, comme l'indiquent Scholten et Udink ten Cate (1999) ou encore van Zuylen (1994), les modèles – et pas seulement ceux du CEMAGREF – sont souvent développés *par* et *pour* le modélisateur. Dans ce cas, la mise en œuvre de tels modèles peut s'avérer particulièrement hasardeuse si leur fonctionnement et leurs limites ne sont pas clairement explicités, assimilés et pris en compte par l'utilisateur (Guinot et Gourbesville, 2003) :

*A model should be operated only by a modeller (i.e. by someone who has experience and knowledge of the physics and understands how reality is described in the model). Therefore the belief that models can be operated by anybody is not justified.*

Yen (1995) résume parfaitement la situation en précisant les rôles que doivent tenir respectivement le modélisateur et l'utilisateur pour éviter ce genre d'écueil :

*The proper adoption of a model to solve a problem and the elimination of abuse in using models cannot be satisfactorily achieved until: (1) The modelers adequately prepare their models for others to use; and (2) the users are knowledgeable and critical in the selection and use of the models.*

Notre approche s'inscrit tout à fait dans la continuité des réflexions de Yen, Guinot et Gourbesville, puisque nous proposons justement de mettre à disposition de l'utilisateur ces connaissances sous la forme d'un système d'assistance au calage.

#### 1.4.2 Transmettre un modèle et sa crédibilité

Encore aujourd'hui, les résultats des modèles sont délivrés aux décideurs comme des vérités, et non comme des résultats de nature foncièrement incertaine. Il est en effet plus aisé d'inférer une décision sur la base de valeurs exactes – de préférence avec un grand nombre de décimales... – qu'à l'aide d'un intervalle de confiance. Pourtant, comme l'affirment Guinot et Gourbesville (2003), les prédictions d'un modèle devraient être transmises avec une mesure de leur incertitude :

*A modeller should be knowledgeable enough to admit, and diplomatic enough to explain to their client(s), that all simulations are approximate and that all model results should be provided with an uncertainty interval.*

On retrouvera cette approche – récente dans son acceptation – dans la section 1.4.3. Malheureusement, il faut bien admettre que ces prescriptions ne sont jamais suivies en pratique. Des prédictions considérées – implicitement ou explicitement – comme des vérités absolues ont ainsi pu dans le passé se trouver totalement inadaptées et renforcer la méfiance des décideurs vis-à-vis des modèles. Les comportements semblent avoir évolué depuis lors, et l'on se trouve à présent dans une situation quasiment inverse, où une étude n'est considérée comme « sérieuse » que si elle s'appuie sur un modèle numérique.

Au début des années 1990, une étude a été lancée au sein de *W/L Delft Hydraulics*<sup>20</sup> sur la validation des modèles informatiques en hydraulique fluviale. Cette étude a donné lieu à l'élaboration d'un protocole pour la validation des modèles hydrauliques<sup>21</sup>. Ce protocole a été repris par l'*Association Internationale de Recherches Hydrauliques (AIRH/IAHR)* qui a élaboré des recommandations pour documenter la validité des logiciels d'hydraulique (Dee *et al.*, 1994).

#### 1.4.3 Doit-on caler un modèle?

Le principe même du calage de modèle a récemment été remis en cause par Cunge (2003) et Guinot et Gourbesville (2003). Avant de rentrer dans le cœur de la question et de proposer une réponse, il importe de savoir quels modèles sont concernés par cette remise en cause.

20. DEE, D. P. et VAN DER MAREL, M. J. (1991), Validation of computer models: Concepts and terminology. *Rap. tech. X0084*, W|L Delft Hydraulics.

DEE, D. P. (1991), Validation of computer models: Systems theory literature survey. *Rap. tech. X0084*, W|L Delft Hydraulics.

21. DEE, D. P. (1993), A framework for the validation of generic computational models. *Rap. tech. X 0109*, W|L Delft Hydraulics.

## Types de modèles en hydroinformatique

Différents types de modèles – conceptuels et numériques – peuvent être rencontrés en hydroinformatique (Refsgaard, 1996; Guinot et Gourbesville, 2003) :

- les *modèles empiriques (black-box)* relient des séries de données d'entrée et de sortie sans aucune considération physique. On peut citer comme exemple les modèles de régression et les réseaux de neurones ;
- les *modèles conceptuels globaux (grey-box)* décrivent le système de façon globale suivant des concepts à base physique. Les modèles à réservoirs pour la modélisation pluie-débit en sont des exemples représentatifs ;
- les *modèles à base physique (white-box)* représentent les processus physiques locaux, en suivant les principes de conservation de la masse, de l'énergie et/ou de la quantité de mouvement. Les modèles hydrologiques distribués et les modèles d'hydraulique fluviale sont de ceux-là.

Si les deux premiers types de modèles nécessitent un ajustement de leurs paramètres en raison de leur nature même, la question de la pertinence d'un calage se pose pour les modèles à base physique.

## Calage de modèles à base physique

Le calage de modèles à base physique, qu'ils soient hydrologiques ou hydrauliques, repose sur l'ajustement des valeurs de paramètres regroupant différents phénomènes physiques soit mal connus, soit imparfaitement modélisés. Un exemple est donné par le coefficient  $n$  de Manning dans les modèles standards en hydraulique fluviale unidimensionnelle (Cunge, 2003) :

*At the scale of the model [Manning's coefficient  $n$ ] does not replace or represent any set of physical processes.*

L'ajustement de ces paramètres contribue ainsi à réduire la pertinence scientifique du calage, comme l'exprime non sans humour (Klemeš, 1997)<sup>22</sup> :

*... I realized that all what this high-power prestidigitation, posturing as 'scientific hydrology', can teach me is how to fit a line to a few points, extrapolate a curve by the most abstruse and esoteric means available, and keep calibrating (i.e., fudging) an arbitrary 'system' with an excessive number of the degrees of freedom until it fits some hydrologic record.*

C'est pourquoi Guinot et Gourbesville (2003) et Cunge (2003) recommandent d'éviter au maximum cet ajustement et de préférer réaliser une étude de sensibilité aux paramètres concernés et présenter les résultats avec un intervalle de confiance. Cette méthode a aussi été défendue et utilisée par Ewen et Parkin (1996) et Parkin *et al.* (1996) pour des modèles pluie-débit destinés à prédire l'impact des changements d'occupation du sol et des changements climatiques. Cunge (2003) propose ainsi de supprimer tout ajustement de paramètres pour les modèles à base physiques, et donc notamment les modèles hydrauliques. Malheureusement, on peut se poser comme Beck (1991) la question de l'accueil de cette position au sein de la communauté des modélisateurs :

22. Cet éditorial a été repris dans l'ouvrage *Common sense and Other Heresies – Selected Papers on Hydrology and Water Resources Engineering* (Klemeš, 2000a).

*The question is, can the “principled modeller” compromise from an “optimal” match of the model with reality, to a “good”, to an “acceptable”, to no match of the model with reality?*

### Notre position

Le point de vue défendu par Cunge, Guinot et Gourbesville est louable en ce qu’il prétend éliminer les pratiques abusives actuelles où un niveau de correspondance le plus élevé possible entre données de terrain et résultats du modèle cherche à être atteint à tout prix par les modélisateurs. Les paramètres des modèles sont à cet effet souvent ajustés au détriment de leur signification physique pour compenser des erreurs ou des approximations dans la géométrie et/ou les conditions limite (USACE, 1993, p. 5-16) :

*The key to a successful calibration is to identify the true values of the parameters which control the system and not to use values that compensate for shortcomings in the geometry and/or the boundary conditions.*

Malheureusement, l’utilisation ultérieure d’un modèle nécessite la détermination d’un seul jeu de paramètres pour effectuer des prédictions. En ce sens, la tâche de calage s’avère tout à fait nécessaire. De plus, la tâche de calage ne se résume pas, comme on le verra dans la partie II, à un simple ajustement : il importe aussi de choisir les données de référence, les données d’entrée et les paramètres, de produire les résultats pertinents, d’effectuer les comparaisons adéquates, et tout cela en fonction du domaine d’application attendu.

Nous proposons donc, plutôt que de supprimer totalement cette tâche, de l’encadrer au moyen d’un système d’assistance pour participer à la mise en œuvre d’un « code de bonnes pratiques » pour le calage de modèles (Vidal *et al.*, 2005).

#### 1.4.4 Peut-on valider un modèle? (Ou plutôt : peut-on confirmer une théorie?)

La question du bien-fondé de la validation de modèles constitue un thème fort en philosophie des sciences, qui a été popularisé dans le domaine des sciences de l’environnement par un article d’Oreskes *et al.* (1994) dans le magazine *Science*. Il faut bien noter que dans le référentiel de Refsgaard et Henriksen, ce thème correspond non pas à la procédure *validation de modèle*, mais bien à celle de *confirmation de la théorie*. Cette confusion a aussi atteint le domaine de l’hydraulique, puisque Brutsaert (1971) pense proposer une « vérification » du modèle conceptuel constitué par les équations de Barré de Saint-Venant alors qu’il propose seulement une validation d’un modèle numérique basé sur ce modèle conceptuel. La problématique est donc la suivante : peut-on dire qu’un modèle – conceptuel – représente parfaitement un système générique?

#### Points de vue en philosophie des sciences

Il serait quelque peu manichéen de vouloir, comme Bouleau (1999, 2002), opposer sur cette question deux courants bien déterminés de la philosophie des sciences. Pourtant, deux visions de la *confirmation d’une théorie* sont présentes dans la littérature.



*Théories réfutables...*

Selon Popper (1991), seule la *falsification* ou la *réfutation* d'une théorie – et donc d'un modèle conceptuel – est possible. Dans ce cadre, la procédure de *confirmation* d'une théorie définie dans le référentiel de Refsgaard et Henriksen est simplement impossible. Malheureusement, les théories popperiennes, c'est-à-dire dire réfutables par l'expérience, sont « non seulement rares, mais si exceptionnelles que se restreindre à cette norme revient à s'interdire les représentations les plus utiles aux acteurs sociaux » (Bouleau, 1999, p. 15).

*... et théories acceptables*

Afin d'estimer de façon pragmatique le « contenu de fausseté de notre meilleure théorie », Popper (1991, p. 147) introduit la notion de *vérisimilitude* comme une mesure de référence pour la comparaison de deux théories (1991, p. 103-115). Ces considérations pragmatiques, souvent occultées par les lecteurs de Popper<sup>23</sup>, ont conduit d'autres philosophes des sciences – suivant en cela Quine (voir par exemple 1999) – à affirmer qu'une théorie n'a pas besoin d'être *confirmée* pour être utilisée, comme l'exprime Kuhn (1983, p. 38-39) :

Pour être acceptée comme paradigme, une théorie doit sembler meilleure que ses concurrentes, mais il n'est pas nécessaire qu'elle explique (en fait elle n'explique jamais) tous les faits auxquels elle peut se trouver confrontée.

Les théories actuelles en sciences de l'environnement sont le parfait exemple de cette vision, exemple repris par Bouleau (1999, p. 313-315). Chaque confrontation concluante avec le système physique modélisé permet d'asseoir la crédibilité d'une telle théorie. Ce sont ces confrontations qui peuvent être assimilées à la procédure de *confirmation de la théorie* définie par Refsgaard et Henriksen. Seule une réfutation d'une théorie par d'autres confrontations avec le système considéré peut nécessiter son remplacement. Cette vision « positiviste » de la confirmation d'une théorie est classiquement illustrée par la théorie « universelle » de la gravitation, mise au point par Newton (1687), utilisée avec succès pendant des siècles et remplacée seulement au xx<sup>e</sup> siècle par la théorie de la relativité générale d'Einstein (1916)<sup>24</sup>.

**Situation en hydroinformatique**

Les sciences de l'eau n'ont pas échappé à ces réflexions. En particulier, de nombreux travaux ont été effectués sur les moyens d'évaluer les résultats de modèles hydrogéologiques. Deux numéros spéciaux<sup>25</sup> du journal *Advances in Water Resources* ont ainsi été consacrés à la question de la validation des modèles hydrogéologiques (Hassanizadeh et Carrera, 1992). Dans le premier numéro, Konikow et Bredehoeft (1992) se sont fait l'écho de la thèse popperienne et suggèrent de ne pas utiliser le terme *validation* :

23. Herskovitz (1991) propose quant à lui l'approche suivante : les scientifiques, en « validant » leurs modèles par des comparaisons avec des données du monde réel, suivent la tradition de falsification de Popper. Ils ne cherchent ainsi pas à prouver une théorie, mais s'engagent dans un processus de conjectures et réfutations justement préconisé par l'auteur, et qui peut être assimilé à la procédure définie par Refsgaard et Henriksen.

24. On peut trouver les deux références précitées regroupées dans un ouvrage récent dans une traduction française (Hawking, 2003).

25. Volume 15 (1992), numéros 1 et 3.

*We believe the terms validation and verification have little or no place in ground-water science; these terms lead to a false impression of model capability.*

Cette assertion est en parfaite concordance avec le référentiel de Refsgaard et Henriksen, puisque le terme utilisé pour ce concept est *confirmation de théorie*. Il faut toutefois préciser que si la théorie est infirmée, alors tout calage et/ou validation d'un modèle numérique obtenu à partir du modèle conceptuel correspondant sera vain du point de vue physique.

### Notre position

La théorie pragmatique suivie par Kuhn est aujourd'hui la plus couramment répandue dans le monde de la modélisation numérique. En effet, les modèles sont utilisés de manière opérationnelle comme des outils que l'on sait être imparfaits. Malgré cela, et même si la théorie sur laquelle ils sont basés ne peut pas être véritablement confirmée, ils se montrent pourtant terriblement efficaces dans la pratique.

Dans la suite du document, nous admettons que le modèle conceptuel à la base des modèles numériques hydrauliques – et donc les équations de Saint-Venant – est une représentation acceptable des écoulements en rivière. Nous ne poserons donc pas ici la question de la réfutation de cette *théorie*, même si elle possède un niveau de vraisemblance inférieur à d'autres théories, comme les équations de Navier-Stokes en deux ou trois dimensions.

## 1.5 Conclusions

Ce chapitre nous a permis de construire un cadre de travail pour la mise au point d'un système à base de connaissances pour la validation opérationnelle. Nous disposons à présent de deux éléments essentiels pour la suite de nos travaux :

- le *référentiel terminologique* proposé par Refsgaard et Henriksen et reproduit p. 8 nous servira de base tout au long du mémoire pour proposer des termes adéquats dans le cadre de notre activité de modélisation des connaissances.
- un *protocole de modélisation numérique* résumé dans la figure 1.6 nous fournit un cadre dans lequel s'inscrivent les activités liées à la validation opérationnelle. Plus particulièrement, le processus de *construction du modèle* détaillé dans la figure 1.7 nous fournit une définition de la tâche que nous allons étudier dans la suite : le *calage du modèle*.

Nous avons de plus abordé quelques réflexions sur l'objet d'échange que représente le modèle numérique, notamment entre chercheurs et ingénieurs, entre modélisateurs et simples utilisateurs. Ces réflexions ont permis d'apporter quelques éclairages sur la nature ambiguë de cet objet au sein de la communauté scientifique et de prendre conscience de la pertinence des procédures d'évaluation de sa crédibilité, et principalement de la tâche de calage.

Les deux chapitres suivants sont consacrés à la description des connaissances actuellement disponibles sur la tâche de calage en hydraulique fluviale unidimensionnelle. Ces connaissances ont été compilées à partir de trois sources de connaissances : un *corpus bibliographique* important, des *entretiens informels avec des experts* et enfin l'*expérience personnelle* acquise sur le sujet. Ce processus d'ingénierie des connaissances

nous conduit ainsi à présenter, d'une part dans le chapitre 2 les différents *objets* utilisés durant la tâche de calage, et d'autre part dans le chapitre 3 les différentes *procédures* actuellement disponibles pour mener à bien cette tâche. Ces deux chapitres comportent ainsi une analyse de tous ces éléments en regard de l'objectif de notre étude, c'est-à-dire le développement d'un système d'assistance au calage.

## Chapitre 2

# Éléments d'un modèle numérique de rivière

« Il y a des Sciences qui, par leur objet, ne sont destinées qu'à servir d'aliment à la curiosité ou à l'inquiétude de l'esprit humain : il en est d'autres qui doivent sortir de cet ordre purement intellectuel pour s'appliquer aux besoins de la Société : telle est en particulier l'Hydrodynamique. »

Abbé BOSSUT<sup>1</sup>

LES DIFFÉRENTS OBJETS évoqués dans le premier chapitre vont être présentés en détail pour le domaine qui nous intéresse ici, à savoir l'*hydraulique fluviale unidimensionnelle*. Ce chapitre vise ainsi à répertorier et à décrire les objets suivants : le modèle conceptuel considéré, les codes de calcul implémentant ce modèle conceptuel, les paramètres impliqués dans le calage, et les diverses données utilisées lors de cette tâche. Les connaissances *descriptives* sur la tâche de calage exposées dans ce chapitre seront formalisées dans le chapitre 4 pour être implémentées dans le système d'assistance au calage. Nous ferons régulièrement référence dans ce chapitre au *Guide méthodologique pour le pilotage d'études hydrauliques* – projet conjoint CETMEF–Cemagref – actuellement en cours de rédaction<sup>2</sup>.

### 2.1 Modèle conceptuel pour l'hydraulique unidimensionnelle

En hydraulique fluviale unidimensionnelle, de nombreux modèles conceptuels sont à la disposition des modélisateurs : modèle SAINT-VENANT, modèle MUSKINGUM–CUNGE (Cunge, 1969), etc. Une revue de ces modèles est présentée dans un des chapitres du *Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques* (Faure, 2004). Le modèle

1. Charles BOSSUT (Abbé), *Traité théorique et expérimental d'hydrodynamique* (1786), vol. 1. Imprimerie Royale, Paris, France, p. 15

2. Une version provisoire sous forme de chapitres est téléchargeable sur [www.cetmef.equipement.gouv.fr/projets/hydraulique/clubcourseau/](http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/projets/hydraulique/clubcourseau/)

conceptuel<sup>3</sup> standard – que nous appellerons *modèle conceptuel SAINT-VENANT 1D* – est constitué de deux éléments principaux :

- les *équations de Saint-Venant* sont deux équations aux dérivées partielles non linéaires permettant de calculer les variables d'un écoulement unidimensionnel sur fond fixe. Ces équations font de plus intervenir une inconnue qui est représentée par la pente de la ligne d'énergie  $S_f$  ou la débitance  $K$  ;
- une *détermination de la débitance* permet ensuite de fermer le système d'équations.

Les prochaines sections vont être consacrées à une description plus précise de ces deux éléments, mais vont aussi évoquer des modules spécifiques ajoutés la plupart du temps pour former le modèle conceptuel complet, comme les lois d'ouvrages ou les pertes de charge ponctuelles. Il apparaît important de préciser que le modèle conceptuel que nous considérons ici incorpore l'hypothèse – forte – d'un lit rigide, dans lequel la géométrie de la rivière ne se déforme pas au cours d'un événement. Ce modèle conceptuel n'inclut en conséquence aucune équation de transport solide.

### 2.1.1 Les équations de Saint-Venant

Après les travaux de Cauchy (1827), Navier (1827), mais aussi Bélanger (1828), Dupuit (1863) a le premier apporté ses réflexions sur le mouvement des eaux à débit variable. Barré de Saint-Venant (1871*a*), après avoir émis un rapport sur les travaux de Partiot (1871), est revenu notamment sur l'équation de conservation de la masse que celui-ci avait établie dans un cas particulier. Il a ainsi défini le problème du mouvement non permanent des eaux dans les canaux découverts, et en a proposé une solution pour des canaux rectangulaires de pente uniforme (Barré de Saint-Venant, 1871*b*).

Le modèle conceptuel – suivant la définition donnée à la page 8 – à la base des modèles que nous allons traiter dans la suite de ce mémoire est basé sur la forme classique des équations pour les écoulements transitoires graduellement variés qui portent aujourd'hui son nom :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (2.1a) \\ \underbrace{\left( \frac{\partial Q}{\partial t} \right)}_{[I]} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{A} \right)}_{[II]} + \underbrace{g A \frac{\partial h}{\partial x}}_{[III]} + \underbrace{g A \left( \frac{Q |Q|}{K^2} \right)}_{[IV]} = \underbrace{\left( q \frac{Q}{A} \right)}_{[V]} \quad (2.1b) \end{array} \right.$$

L'équation 2.1a rend compte de la conservation de la masse et est appelée *équation de continuité* ; l'équation 2.1b illustre la conservation de la quantité de mouvement et est appelée *équation dynamique*.

3. Le terme *modèle conceptuel* utilisé ici – et dans toute la suite du mémoire – doit être pris comme le pendant du terme *modèle numérique* et non comme opposition au terme « modèle à base physique », comme pourrait le laisser entendre la sémantique courante en hydrologie. Le modèle conceptuel considéré ici est par ailleurs bien sûr à base physique.

Les différentes notations utilisées sont explicitées ci-dessous :

$Q(x,t)$	débit ( $m^3/s$ )	[ I ]	Terme d'accélération locale
$t$	temps (s)	[ II ]	Terme convectif
$x$	abscisse du cours d'eau (m)	[ III ]	Terme de pression
$A(x,t)$	section mouillée ( $m^2$ )	[ IV ]	Terme de gravité
$q$	débit linéique d'apport latéral ( $m^2/s$ )	[ V ]	Terme source
$\beta$	coefficient de Boussinesq <sup>4</sup>		
$g$	accélération de la pesanteur ( $m/s^2$ )		
$h$	hauteur d'eau (profondeur) (m)		
$K$	débitance ( $m^3/s$ )		

Ces équations, constituant l'essentiel du modèle conceptuel, sont soumis à plusieurs hypothèses dont la vérification expérimentale peut constituer une *confirmation* de cette théorie<sup>5</sup> :

- l'écoulement s'effectue selon une direction privilégiée ;
- la pression sur une verticale est répartie de manière hydrostatique ;
- la pente du cours d'eau est faible (inférieure à 10 %) ;
- la densité de l'eau est considérée constante.

### 2.1.2 Détermination de la débitance

La débitance est une mesure quantitative de la capacité hydraulique d'un cours d'eau. Disposer de cette mesure apparaît donc essentiel lorsqu'il s'agit de protection contre les inondations, mais aussi de construction d'ouvrages hydrauliques.

Afin de faire un point sur les connaissances acquises sur ce sujet, l'*Engineering and Physical Sciences Research Council of the U.K.* (EPSRC) a initié, avec le support de l'Agence pour l'Environnement britannique, un réseau de connaissances sur la débitance (*Network on Conveyance in River/Floodplain Systems*<sup>6</sup>). Ce réseau a permis d'établir un rapport initial (Evans *et al.*, 2001) et de nombreux articles, dont une revue de la débitance dans les modèles numériques unidimensionnels (Knight, 2001). Un projet intitulé *Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance*<sup>7</sup>, et réunissant *HR Wallingford*, le DEFRA (*Department for Environment, Food & Rural Affairs*) et l'Agence pour l'Environnement britannique a été lancé sur ces bases. L'objet du deuxième rapport intermédiaire de ce projet fait le point sur les méthodes actuellement utilisées pour déterminer la débitance (DEFRA/Environment Agency, 2003).

### Chenaux simples, hétérogènes et composés

Dans les chenaux simples, la débitance est définie par l'équation suivante :

$$K = \frac{Q}{\sqrt{S_f}} \quad (2.3)$$

4. Ce coefficient porte aujourd'hui le nom de celui qui l'a introduit dans son monumental ouvrage *Essai sur la théorie des eaux courantes* (Boussinesq, 1877*a,b*).

5. En référence à la discussion abordée dans la section 1.4.4 du chapitre précédent.

6. [ncrfs.civil.gla.ac.uk](http://ncrfs.civil.gla.ac.uk)

7. [www.river-conveyance.net](http://www.river-conveyance.net)

où  $S_f$  est la pente de la ligne d'énergie. La détermination de la débitance à l'aide de cette formule est appelée *Single Channel Method* (SCM). Dans un chenal *hétérogène*, la rugosité n'est pas la même le long du périmètre mouillé. Les cours d'eau naturels sont de parfaits exemples de ce type de chenal : la rugosité n'est souvent pas la même au fond du lit et sur les berges. La section d'un chenal peut aussi être composée de plusieurs sous-sections définies par leur géométrie. On parle alors d'un chenal *composé*<sup>8</sup>. Les cours d'eau naturels, par exemple, présentent la plupart du temps un lit mineur et deux plaines d'inondation, en rive droite et en rive gauche. Dans la pratique, les deux notions se confondent car les rugosités sont bien souvent différentes sur chacune des sous-sections d'un chenal composé (Yen, 1991b, p. 64) :

*... compound channel in open channels is conventionally regarded as a channel whose cross section not only consists of subsections of different geometry shapes but also has different boundary roughness, as in the case of main channel and floodplains.*

Les paragraphes suivants présentent un bref état de l'art des différentes méthodes utilisées pour prendre en compte ces hétérogénéités dans le calcul de la débitance.

### Méthode par chenaux divisés – *Divided Channel Method* (DCM)

Pour prendre en compte ces disparités, l'équation suivante est utilisée :

$$K = \sum_{i=1}^p K_i = \sum_{i=1}^p \frac{Q_i}{\sqrt{S_{fi}}} \quad (2.4)$$

où  $K_i$  débitance dans la sous-section  $i$ , et  $p$  le nombre de sous-sections. Ces sous-sections sont le plus souvent au nombre de 3 – ou bien 5, en identifiant une sous-section supplémentaire pour chaque berge – pour les cours d'eau naturels, comme évoqué dans la section précédente. Chaque débit  $Q_i$  peut ainsi être estimé indépendamment<sup>9</sup>.

Cette méthode, largement répandue dans les logiciels du marché, induit le calcul d'un coefficient de résistance composite suivant l'une des nombreuses formules compilées et critiquées par Yen (2002). Ces formules sont basées sur des hypothèses d'égalité entre les sommes de certaines variables par lit (force de cisaillement, vitesse moyenne, etc.) avec la valeur de cette même variable pour le cours d'eau entier.

### Formulation DEBORD

Nicollet et Uan (1979) ont développé une méthode basée sur de nombreuses expériences en laboratoire sur des canaux composés en régime permanent. La débitance s'exprime à l'aide des équations suivantes, dans lesquelles  $A$  désigne la section mouillée,  $R$  le rayon hydraulique et  $n$  le coefficient de Manning sur lequel nous reviendrons dans la section 2.3.1. L'indice « c » désigne la valeur d'une variable pour le lit mineur (*channel*) et l'indice « f » la valeur pour le lit majeur (*floodplain*).

$$K = \theta \frac{A_c R_c^{2/3}}{n_c} + \frac{R_f^{2/3}}{n_f} \sqrt{A_f^2 + A_c A_f (1 - \theta^2)} \quad (2.5)$$

8. En anglais : *compound channel*.

9. On voit apparaître cette méthode pour la première fois dans le cours d'hydraulique de Bresse (1868, p. 228) :

... il faudrait avoir soin de calculer séparément le débit de la section comprise entre les berges [...], et celui de la section supplémentaire due à l'inondation.

où :

$$\theta = \begin{cases} \alpha = 0.9 \left( \frac{n_f}{n_c} \right)^{-1/6} & \text{pour } \frac{R_f}{R_c} > 0,3 \\ \frac{1-\alpha}{2} \cos \left( \frac{\pi}{0,3} \frac{R_f}{R_c} \right) + \frac{1+\alpha}{2} & \text{pour } \frac{R_f}{R_c} \in [0 ; 0,3]. \end{cases}$$

et :

$$\beta = \left( \frac{\eta^2}{A_c} + \frac{1}{A_f} \right) \frac{A}{(1 + \eta)^2} \quad (2.6)$$

où :

$$\eta = \frac{Q_c}{Q_f} = \frac{n_f}{n_c} \frac{\theta A_c}{\sqrt{A_f^2 + A_c A_f (1 - \theta^2)}} \left( \frac{R_c}{R_f} \right)^{2/3}$$

Cete formulation permet ainsi de prendre en compte les pertes de charges dues aux échanges de quantité de mouvement entre les différents lits.

### Autres méthodes

D'autres méthodes de calcul on été développées ces dernières années, comme la *Lateral Distribution Method* (LDM) (Lyness *et al.*, 1997), ou bien l'*Exchange Discharge Method* (EDM) (Bousmar et Zech, 1999). Pour plus de précisions sur ces formulations de la débitance, le lecteur pourra se référer à la thèse de Bousmar (2002). Des recherches sont de plus actuellement en cours au CEMAGREF sur le développement d'une méthode prenant en compte les échanges de masse et de quantité de mouvement à l'interface entre les deux lits (Proust, 2005)<sup>10</sup>. Ces méthodes n'étant pas encore implémentées dans des logiciels largement diffusés auprès des services opérationnels, nous envisageons dans la suite uniquement les deux méthodes précédentes de calcul de la débitance.

### 2.1.3 Pertes de charge singulières

Aux équations de Saint-Venant peuvent se substituer – ou s'ajouter – des lois de perte de charge correspondant à des singularités du cours d'eau, comme des ouvrages hydrauliques ou des élargissement brusques.

#### Ouvrages hydrauliques

Dans le modèle conceptuel considéré, les ouvrages hydrauliques – comme les déversoirs ou les orifices – se présentent comme des zones où les équations de Saint-Venant ne s'appliquent pas. On utilise alors une loi de perte de charge simple pour relier les variables à l'amont et à l'aval de chaque ouvrage. On peut mettre ces relations sous la forme générale suivante :

$$Q = \mu f(h_{\text{amont}}, h_{\text{aval}}) \quad (2.7)$$

où  $\mu$  est un coefficient numérique appelé *coefficient de débit*,  $h_{\text{amont}}$  et  $h_{\text{aval}}$  niveaux d'eau à l'amont et à l'aval de l'ouvrage. Nous reviendrons sur ce paramètre du modèle

<sup>10</sup>. Le lecteur intéressé par cette démarche pourra suivre les publications actuellement en cours sur ce sujet (Bousmar *et al.*, 2005; Proust *et al.*, 2005).



numérique dans la section 2.3.2. Différents types d'ouvrages élémentaires peuvent être utilisés pour modéliser des structures présentes sur le linéaire d'un cours d'eau. L'arche d'un pont peut ainsi être modélisée comme un orifice, et son tablier par un déversoir.

L'équation générique pour un déversoir est donné par l'équation :

$$Q = \mu L \sqrt{2g} (h_{\text{amont}} - z_0)^{3/2} \quad (2.8)$$

où  $z_0$  niveau de la crête du déversoir et  $\mu$  dépendant de  $h_{\text{aval}}$  pour un déversoir noyé. L'équation pour un orifice est donné par l'équation :

$$Q = \mu \Omega \sqrt{2gH} \quad \text{où} \quad H = \begin{cases} h_{\text{amont}} - z_0 & \text{pour un orifice dénoyé} \\ h_{\text{aval}} - h_{\text{amont}} & \text{pour un orifice noyé} \end{cases} \quad (2.9)$$

et  $\Omega$  section de l'orifice,  $z_0$  niveau du centre de l'orifice.

### Élargissements brusques

Lorsque l'écoulement franchit un élargissement brusque, une perte de charge se crée. On parle de perte de charge « à la Borda », d'après l'auteur des premières recherches sur le sujet (Borda, 1766, 1770). Cette perte de charge  $\Delta H$  peut s'exprimer par la formule suivante :

$$\Delta H = \xi \frac{V_{\text{aval}}^2}{2g} \quad (2.10)$$

où  $\xi$  coefficient dépendant des caractéristiques de l'élargissement considéré, et notamment du rapport des sections mouillées  $\frac{A_{\text{amont}}}{A_{\text{aval}}}$ . La présence ou non de ces élargissements brusques dépend bien évidemment des données topographiques recueillies. Nous verrons dans la section 2.4.1 des critères permettant la sélection du nombre et de l'emplacement des sections en travers.

## 2.2 Codes de calcul

Le *code de calcul* tel que défini dans le référentiel de Refsgaard et Henriksen correspond à l'implémentation informatique du *modèle conceptuel*. Ce processus d'implémentation inclut notamment la discrétisation des équations aux dérivées partielles, qui peut s'effectuer selon plusieurs schémas. On peut ainsi obtenir des codes différents à partir d'un même modèle conceptuel. Nous nous restreindrons ici aux codes de calcul capables de résoudre ces équations en régime *fluvial* uniquement. Le régime fluvial correspond à des valeurs du nombre de Froude<sup>11</sup> inférieures à 1. Ce cas correspond à une célérité des ondes supérieure à la vitesse de l'écoulement, et une propagation des perturbations à la fois vers l'amont et l'aval. En régime fluvial, les valeurs locales des variables de l'écoulement – débit  $Q$  et hauteur d'eau  $h$  – dépendent des valeurs situées à l'aval (situation de *contrôle aval*). Ce régime se rencontre dans la plupart des fleuves et rivières lorsque la pente du fond n'est pas trop importante.

11. Ce nombre est défini par  $\mathcal{F} = \frac{V}{\sqrt{gh}}$ .

### 2.2.1 Multiplicité des logiciels

De nombreux codes de calcul ont été bâtis sur le modèle conceptuel présenté dans la section 2.1. Cette section vise à comparer les principaux logiciels présents sur le marché au code MAGE que nous avons utilisé dans ces travaux. Le tableau 2.1 présente quelques caractéristiques des logiciels ISIS (HALCROW/HR WALLINGFORD, 1999), HEC-RAS (Brunner, 2001*a,b*) et MIKE11 (DHI, 2003*a,b*). Ces caractéristiques ont été choisies en raison de l'importance qu'elle revêtent dans la problématique du calage, et donc de l'estimation de la résistance à l'écoulement.

<i>Logiciel</i>	<i>Calcul de la débitance</i>	<i>Différentes zones en lit majeur</i>	<i>Lit mineur hétérogène</i>	<i>Société</i>
ISIS	DCM		oui <sup>(1)</sup>	<i>Wallingford Software</i> <sup>(2)</sup>
HEC-RAS	DCM	oui	oui	<i>U.S. Army Corps of Engineers</i> <sup>(3)</sup>
MIKE11	DCM		au choix <sup>(4)</sup>	<i>Danish Hydraulic Institute</i> <sup>(5)</sup>
MAGE	DEBORD	non	non	CEMAGREF

TAB. 2.1 – *Logiciels d'hydraulique fluviale unidimensionnelle.*

<sup>(1)</sup> La section entière est divisée en zones de rugosité homogène.

<sup>(2)</sup> [www.wallingfordsoftware.com/products/isis/](http://www.wallingfordsoftware.com/products/isis/)

<sup>(3)</sup> [www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hecras-hecras.html](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hecras-hecras.html)

<sup>(4)</sup> Il est possible de définir simplement des points de transition entre lit mineur et lit majeur.

<sup>(5)</sup> [www.dhisoftware.com/mike11/](http://www.dhisoftware.com/mike11/)

### 2.2.2 MAGE

Nous avons utilisé dans cette étude le logiciel MAGE pour construire un prototype de système d'assistance au calage. Nous reviendrons dans le chapitre 4 sur les raisons de ce choix. MAGE permet de résoudre les équations unidimensionnelles de Saint-Venant en réseau maillé généralisé et implémente la formulation DEBORD pour le calcul de la débitance. Ce code de calcul a été développé au CEMAGREF à partir d'un interpolateur géométrique appelé TALWEG (CEMAGREF, 1984) et d'un programme permettant de calculer des lignes d'eau en régime permanent appelé FLUVIA (CEMAGREF, 1983). Ce code de calcul a été utilisé dans diverses études hydrauliques depuis de nombreuses années (voir par ex. Giraud *et al.*, 1997).

Nous présenterons le fonctionnement externe du code MAGE dans le chapitre 4 lors de la formalisation des connaissances nécessaires à sa mise en œuvre.

## 2.3 Paramètres en hydraulique fluviale

Cette section s'attache à présenter les différents paramètres d'un modèle numérique basé sur le modèle conceptuel défini dans la section 2.1. Deux classes de paramètres vont être distinguées : tout d'abord, les *coefficients de résistance à l'écoulement*, caractérisant un tronçon de rivière, et ensuite les *coefficients de débit*, associés à une structure locale – la plupart du temps un ouvrage artificiel – sur le linéaire du cours d'eau modélisé. La dernière partie de cette section traitera enfin des relations entre le modèle

conceptuel utilisé – et notamment le calcul de la débitance – avec les valeurs des paramètres de résistance à l'écoulement.

### 2.3.1 Coefficients de résistance à l'écoulement

La résistance à l'écoulement a constitué un champ de recherche majeur depuis plus de deux cent ans, motivé dès le départ par des impératifs de la société civile. Les différents projets de construction de canaux pour l'alimentation en eau de la ville de Paris auront joué un rôle certain dans la constitution de ce champ de recherche. Pour de tels projets a été développée au fil des ans une multitude de formules empiriques susceptibles de lier la vitesse moyenne de l'écoulement à des grandeurs mesurables (pente, hauteur d'eau, etc.).

Les premières formules faisaient intervenir chacune un coefficient « universel », utilisé pour l'ensemble des cours d'eau – naturels ou artificiels – considérés. Ces coefficients se sont avérés dépendre du site étudié, et notamment de la rugosité du lit. La connaissance partielle ou imprécise des processus physiques à l'origine de cette résistance à l'écoulement a ainsi transformé les différents coefficients « universels » en paramètres à part entière dans les diverses formules utilisées en ingénierie. À partir de la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, la standardisation de ces formules a conduit à un quasi monopole de la formule de Manning en ingénierie fluviale. Avec l'avènement de la simulation numérique, ce paramètre, intégrant les différentes sources de résistance à l'écoulement – que nous passerons en revue un peu plus loin – a permis de compenser les connaissances partielles et imprécises des processus physiques sous-jacents. Le coefficient de résistance s'est ainsi rapidement imposé comme un *paramètre de calage*.

L'annexe E présente un historique de ces coefficients depuis les premières formules de la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle jusqu'aux développements théoriques de la mécanique des fluides. Elle permet ainsi de mieux saisir l'évolution fondamentale de la nature même des coefficients de résistance, de coefficients universels en paramètres de calage.

#### Formules de résistance à l'écoulement

Trois formules ont traversé l'histoire et sont actuellement utilisées pour relier la pente de la ligne d'énergie – nécessaire pour calculer la débitance – à la vitesse moyenne de l'écoulement et au rayon hydraulique :

$$\text{Formule de Chézy}^{12} \quad S_f = \frac{V^2}{C^2 R} \quad (2.11)$$

$$\text{Formule de Manning}^{13} \quad S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (2.12)$$

$$\text{Formule de Darcy-Weisbach}^{14} \quad S_f = \frac{f V^2}{8 g R} \quad (2.13)$$

où C coefficient de Chézy, n coefficient de Manning et f coefficient de Darcy-Weisbach.

14. CHÉZY, A. (1775), Mémoire sur la vitesse de l'eau conduite dans une rigole donnée.

14. MANNING, R. (1891), On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, vol. 20, p. 161–207.

14. WEISBACH, J. A. (1847), *Principles of the Mechanics of Machinery and Engineering – Volume 1: Theoretical Mechanics*, vol. 2 de *Library of Illustrated Standard Scientific Works*. Hippolyte Bailliere, London, U.K.

La pente de la ligne d'énergie peut être exprimée sous la forme générique suivante :

$$S_f = \alpha V^2 R^{-\beta} \quad (2.14)$$

On peut ainsi retrouver les équations précédentes<sup>15</sup> à l'aide des valeurs de  $\alpha$  et  $\beta$  données dans le tableau 2.2.

Formule	$\alpha$	$\beta$
Chézy	$\frac{1}{C^2}$	1
Manning	$n^2$	$\frac{4}{3}$
Darcy-Weisbach	$\frac{f}{8g}$	1

TAB. 2.2 – Valeur des coefficients de la formule générique de la pente de la ligne d'énergie.

### Choix de la formule de Manning

Les paragraphes suivants permettent de mieux comprendre comment le coefficient  $n$  de Manning est devenu le standard parmi les divers coefficients de résistance proposés. En égalisant les équations 2.11, 2.12 et 2.13, on peut obtenir une relation entre les coefficients de Darcy-Weisbach, Chézy et Manning :

$$\sqrt{\frac{f}{8}} = \frac{\sqrt{g}}{C} = \frac{n\sqrt{g}}{R^{1/6}} \quad (2.15)$$

Ces relations indiquent ainsi une équivalence théorique *a priori* des divers coefficients (Yen, 2002). On peut cependant noter que, si le coefficient  $f$  de Darcy-Weisbach est lui adimensionnel, le coefficient  $n$  de Manning a pour dimension  $[L^{1/3} T^{-1}]$ . Cette dépendance vis-à-vis du temps a gêné les hydrauliciens, depuis Manning lui-même. Afin de résoudre ce problème, Yen (1992, 2002)<sup>16</sup> recommande d'utiliser la forme suivante dimensionnellement homogène :

$$V = \frac{\sqrt{g}}{n_g} R^{2/3} S^{1/2} \quad \text{où} \quad n_g = n\sqrt{g} = R^{1/6} \sqrt{\frac{f}{8}} \quad (2.16)$$

Nous conserverons toutefois dans cette étude la forme dimensionnelle du coefficient  $n$  de Manning, en raison de l'utilisation largement minoritaire de la forme proposée par Yen.

L'avantage du coefficient  $n$  de Manning est sa quasi-indépendance vis-à-vis de la profondeur de l'eau, du nombre de Reynolds et du rapport de la rugosité équivalente sur le rayon hydraulique  $\frac{k_s}{R}$ , pour un écoulement complètement turbulent sur une surface rugueuse et rigide (voir l'annexe E, section E.5.5). Cette condition étant une hypothèse de travail commune pour des rivières à lit de gravier, l'usage du coefficient  $n$  et de la formule associée s'est ainsi imposé au fil du temps auprès de la communauté des hydrauliciens. Leopold *et al.* (1964, p. 158) se sont ainsi étonnés voilà déjà quarante

15. Et de nombreuses autres de structure comparable (voir Vischer, 1987).

16. Le lecteur intéressé est invité à lire les discussions sur ce sujet dans le *Journal of Hydraulic Engineering* (Christensen, 1993; Yen, 1993).

ans de la persistance de cette équation empirique face aux développements théoriques dans le domaine de la mécanique des fluides :

*It is truly surprising that engineering practice has depended to such an extent on a formula as empirical as this one, derived nearly a century ago. Many engineers have become very proficient at estimating the value of  $n$  to apply to a given channel. [...] Because  $n$  must be estimated, its determination is a matter of judgement and not an independent measure of specified physical attributes of the channel.*

Cette prédominance de la formule de Manning peut s'expliquer par des considérations sur la notion d'échelle pour la résistance à l'écoulement : les travaux de mécanique des fluides sur les écoulements à surface libre ont permis d'inclure le coefficient adimensionnel  $f$  dans les notions de résistance à la paroi et de couche limite<sup>17</sup>. Il est ainsi regardé comme une valeur locale de la résistance à l'écoulement, relié à la distribution des vitesses et associé au concept de moment de cisaillement. Le rayon hydraulique  $R$  se trouve alors être la profondeur de l'eau. D'autre part, les expériences à l'origine de la détermination des coefficients  $C$  et  $n$  ont toutes été basées sur des mesures de perte de charge, et ceux-ci se révèlent naturellement adaptés pour exprimer une résistance à l'échelle d'une section ou d'un bief. Yen (2002, p. 36) conclut de la sorte en recommandant l'utilisation d'un coefficient de résistance à l'échelle de la section ou du tronçon dans des simulations unidimensionnelles :

*While in 2D or 3D simulations of local phenomena, the use of local resistance is required, in 1D simulation of open-channel flows, it is the reachwise or cross sectional resistance coefficient that is practically useful.*

Dans la suite du document, et notamment dans le chapitre 4, nous considérerons suivant ces recommandations que le coefficient  $n$  de Manning est associé à un bief, ou plus précisément à un tronçon homogène d'un bief.

En conclusion, la formule de Manning sera utilisée pour calculer la résistance à l'écoulement dans les modèles considérés dans la suite du document. Le choix de ce coefficient particulier dans ces travaux repose sur le nombre de connaissances existantes liées précisément à l'estimation de ses valeurs<sup>18</sup>.

### Sources de la résistance à l'écoulement

La résistance à l'écoulement est un effet cumulatif de plusieurs phénomènes. À partir de la classification de Rouse (1965), quatre types de résistance à l'écoulement ont été identifiés par Yen (2002) et sont détaillés dans les paragraphes suivants.

#### *Résistance de surface*

Ce premier type de résistance correspond aux effets induits dans le profil vertical de vitesse par le degré de turbulence de l'écoulement, par la rugosité relative du lit, mais aussi par la forme de la section en travers. L'influence de la résistance de surface sera considérée comme prépondérante dans le cas des écoulements en rivière étudiés ici.

---

17. Pour plus de précisions, le lecteur pourra se référer à Carter *et al.* (1963) et Yen (2002).

18. Le même choix a été réalisé dans le cadre du projet *Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance*, sur la base de l'avis d'un groupe d'experts (DEFRA/Environment Agency, 2004a, p. 6).

### *Résistance due au changement de forme*

La non-uniformité de la forme ou de la taille de la section en travers le long de l'axe du cours d'eau va entraîner des modifications du profil de vitesse, demandant une variation de la résistance. Cet effet est, suivant Rouse, p. 13, négligé dans la plupart des cas d'écoulements graduellement variés :

*In the case of gradually varied flow represented by backwater analysis it remains customary to ignore such niceties on the assumption that the resistance at any section is equal to what it would be if the same rate of flow took place past the same section under conditions of uniformity.*

Cette source particulière de résistance est cependant, dans le cas de rivières naturelles, d'un ordre de grandeur suffisant pour la prendre en compte.

### *Résistance due à la nature de l'écoulement*

Une variation du nombre de Froude caractérisant l'écoulement peut lui aussi entraîner une variation de la résistance, comme l'ont montré Li *et al.* (1992). Cette variation est pourtant négligée en régime fluvial, comme le signale Rouse, p. 16 :

*Supercritical flow in bends is now commonly accepted as dependent upon the Froude number, but this has not yet come to pass for subcritical flow, despite the fact that wave resistance is just as important at changes in channel alignment as it is at changes in cross-section.*

### *Résistance due à la variabilité temporelle*

Suivant les mêmes raisonnements que précédemment sur les variations spatiales de la hauteur d'eau, des variations temporelles de l'écoulement engendrent elles aussi une résistance propre. Ce dernier type de résistance pourra être négligé dans les cas étudiés ici, en reprenant encore une fois les propos de Rouse, p. 18 :

*The other limit of the problem, comparable to gradually varied flow, has long since proved even more amenable to treatment. This is the propagation of true flood waves, which takes place in such a manner that inertial effects are small in comparison with resistance. Under these conditions the resistance can be assumed to have essentially the same magnitude as that of steady uniform flow at the same depth and velocity.*

### *Formule synthétique*

On peut ainsi exprimer, à l'instar de Rouse (1965), un des coefficients de résistance – ici le coefficient  $f$  de Darcy-Weisbach – par une fonction symbolique adimensionnelle  $F$  :

$$f = F(\mathcal{R}, \mathcal{K}, \mathbf{C}, \mathbf{N}, \mathcal{F}, \mathbf{U}) \quad (2.17)$$

où  $\mathcal{R} = \frac{VR}{\nu}$  nombre de Reynolds de l'écoulement,  $\mathcal{K} = \frac{k_s}{R}$  rugosité relative du lit,  $\mathbf{C}$  symbole représentant la forme de la section,  $\mathbf{N}$  symbole représentant l'irrégularité du canal en profil et en plan,  $\mathcal{F}$  nombre de Froude de l'écoulement et  $\mathbf{U}$  symbole représentant la variabilité temporelle de l'écoulement.

Pour des rivières naturelles où l'écoulement se fait en régime turbulent rugueux, le coefficient  $n$  de Manning ne dépend pas du nombre de Reynolds  $\mathcal{R}$  (voir annexe E, section E.5.4). De plus, en négligeant – comme préconisé par Rouse – la dépendance de

la résistance à l'écoulement vis à vis du nombre de Froude  $\mathcal{F}$  et du caractère transitoire de l'écoulement ( $\mathbf{U}$ ), l'équation 2.17 peut se ramener à :

$$f = F(\mathcal{K}, \mathbf{C}, \mathbf{N}) \quad (2.18)$$

Nous considérerons dans la suite uniquement les facteurs inclus dans l'équation 2.18 lorsque nous emploierons le terme de résistance à l'écoulement.

### 2.3.2 Coefficients de débit des ouvrages

Dans le modèle conceptuel considéré dans cette étude, la modélisation de chaque ouvrage nécessite l'utilisation d'un coefficient de débit, comme précisé dans la section 2.1.3. Le tableau 2.3 présente les valeurs moyennes des coefficients de débit pour quelques types de base de déversoirs et le tableau 2.4 présente des valeurs du coefficient de débit pour quelques types d'orifices.

Type de déversoir	$\mu$ ( $\text{m}^{-1/2} \cdot \text{s}$ )
Déversoir en mince paroi vertical à nappe libre, rectangulaire, sans contraction latérale	0,43
Déversoir en mince paroi vertical à nappe libre, rectangulaire, avec contraction latérale	0,40
Déversoir à crête épaisse	0,385

TAB. 2.3 – Valeurs moyennes des coefficients de débit relatifs à l'équation 2.8 pour quelques types de déversoirs.

Type d'orifice	$\mu$ ( $\text{m}^{-1/2} \cdot \text{s}$ )
Orifice circulaire à veine moulée	1
Orifice circulaire en mince paroi	0,62

TAB. 2.4 – Valeurs moyennes des coefficients de débit relatifs à l'équation 2.9 pour quelques types d'orifices.

Ces valeurs ont été établies de manière empirique sur des ouvrages de géométrie parfaitement connue. Dans la pratique cependant, les ouvrages rencontrés possèdent des formes quelquefois sensiblement différentes de celles utilisées pour déterminer les coefficients des tableaux 2.3 et 2.4. Un ajustement de ces valeurs peut alors s'avérer nécessaire, pour compenser l'erreur de modélisation d'un ouvrage réel avec une équation rendant compte de l'écoulement à travers un ouvrage « idéal ». Ces coefficients de débit deviennent alors des *paramètres* du modèle numérique.

### 2.3.3 Lien entre modèle conceptuel et paramètres du modèle numérique

Laissons de côté les coefficients de débit des ouvrages pour revenir un instant sur la détermination de la débitance et les coefficients de résistance à l'écoulement. L'existence de différentes méthodes de détermination de la débitance induit l'utilisation d'un même coefficient pour représenter des agrégations différentes de certaines composantes de la résistance à l'écoulement. En effet, ce coefficient peut rendre compte de différents facteurs – comme précisé par l'équation 2.18 – qui peuvent être intégrés ou non au modèle conceptuel par le biais de la formulation de la débitance.

## Principe

Cet état de fait est illustré de manière probante par les différentes approches du traitement de sections à la fois hétérogènes et composées, à l'image des cours d'eau naturels soumis à des écoulements débordants. En utilisant la formule de Manning, on peut exprimer la débitance par :

$$K = \frac{A R^{2/3}}{n_c} \quad (2.19)$$

où  $n_c$  est le coefficient de résistance composite de la section considérée, dépendant de la hauteur d'eau dans cette même section. Le tableau 2.5 présente une comparaison des différentes méthodes d'estimation possibles de cette débitance et des facteurs à prendre en compte par le modélisateur lors de l'estimation du coefficient  $n$  de Manning.

Méthode	Facteurs			Sources de résistance incluses dans le modèle conceptuel
	$\mathcal{K}$	<b>C</b>	<b>N</b>	
SCM	•	•	•	–
DCM	•	•	◦	Hétérogénéité des sections
DEBORD	•	◦	◦	Hétérogénéité des sections et pertes de charges dues au débordement

TAB. 2.5 – Comparaison des facteurs à prendre en compte dans l'estimation du coefficient  $n$  de Manning suivant la méthode de détermination de la débitance (• : à prendre en compte ; ◦ : à prendre en compte partiellement). Les facteurs considérés ici sont ceux de l'équation 2.18 :  $\mathcal{K} = \frac{k_s}{R}$  rugosité relative du lit, **C** symbole représentant la forme de la section, et **N** symbole représentant l'irrégularité du canal en profil et en plan.

## Illustration au travers d'un exemple

Le modélisateur ne devra donc pas, en toute rigueur, utiliser les mêmes valeurs du coefficient  $n$  de Manning pour différentes formulations de la débitance. La figure 2.1 présente, au travers de l'exemple d'un tronçon de cours d'eau de section de forme artificielle, les différences de calcul du coefficient  $n_c$  et de la débitance  $K$ .

Cette rapide comparaison soulève deux commentaires. Premièrement, les trois codes implémentant la méthode DCM ne donnent pas la même valeur de la débitance<sup>19</sup>. Cette différence provient des différentes hypothèses considérées :

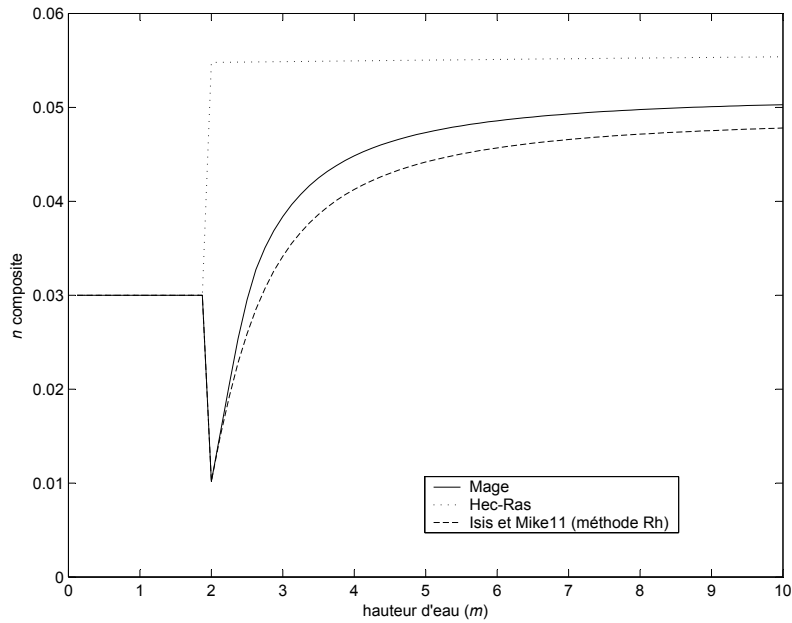
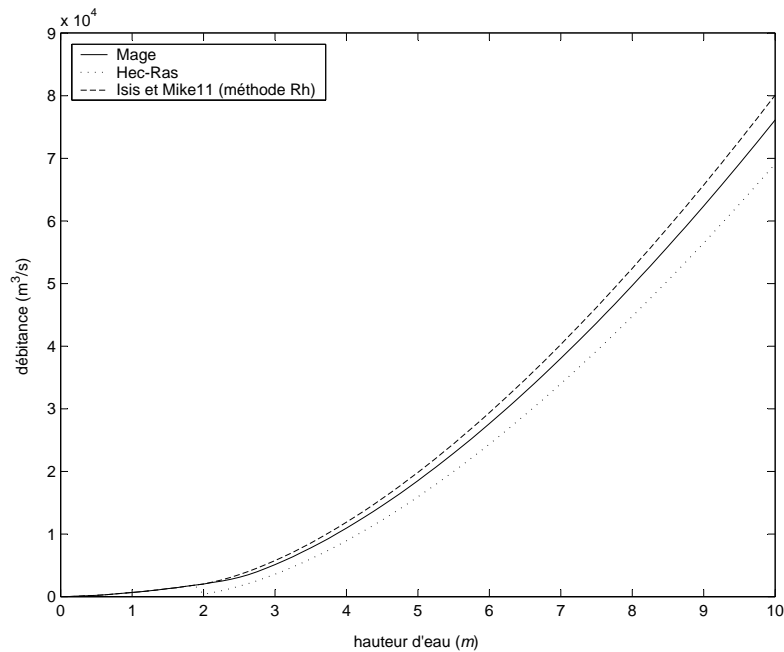
- ISIS et MIKE11 supposent que le débit total est la somme des débits de chaque sous-section mouillée, et le coefficient  $n$  composite est donné par<sup>20</sup> :

$$n_c = \frac{A R^{2/3}}{\sum_i \frac{A_i R_i^{2/3}}{n_i}} \quad (2.20)$$

19. Cet état de fait est rappelé dans le manuel du logiciel MIKE11 (DHI, 2003a, p. 22) qui fournit à l'utilisateur la possibilité de choisir entre deux variantes de la méthode DCM, dont la méthode «  $R_h$  ».

20. LOTTER, G. K. (1933), Soobrazheniia k gidravlicheskomu raschetu rusel s razlichnoi sherokhovatostiu stenok. (Considerations on hydraulic design of channels with different roughness of walls). *Izvestiia Vsesoiuznogo Nauchno-Issledovatel'skogo Instituta Gidrotekhniki (Trans. All-Union Sci. Res. Inst. Hydraulic Eng.)*, vol. 9, p. 238–241.



(a) Coefficient de Manning composite  $n_c$ .

(b) Débitance.

FIG. 2.1 – Comparaison des calculs de la débitance pour différents codes. La section considérée est composée d'un lit mineur trapézoïdal (largeur = 20 m, fruit des berges = 1,7) et d'un lit majeur de largeur =  $2 \times 50$  m. La valeur du paramètre  $n$  pour le lit mineur est de 0,03, celle pour le lit majeur de 0,06.

- HEC-RAS suppose l'égalité des vitesses moyennes dans chacune des sous-sections, et le coefficient  $n_c$  est donné par<sup>21</sup> :

$$n_c = \left( \sum_i^N \frac{n_i^{3/2} P_i}{P} \right)^{2/3} \quad (2.21)$$

Deuxièmement, pour un couple donné de valeurs de coefficients de résistance, le code MAGE va donner une valeur de la débitance supérieure à celle donnée par le code HEC-RAS, et inférieure à celle donnée par les codes ISIS et MIKE11.

Un soin tout particulier doit donc être apporté à l'estimation d'une valeur de coefficient de résistance pour des débits débordants, comme le précisent Williams et Julien (1991, p. 344) :

*... Models that do not take into consideration the interactions of channels, banks, and floodplains are calibrated to field data by adjustment of non-interacting channel and floodplain Manning's "n" or other resistance parameters. [...] This leads to associating the phenomenon of compound channels to the wrong hydraulic parameters and results in errors in the design water surface elevations...*

Ces considérations permettent d'affirmer qu'un même couple de valeurs du coefficient  $n$  de Manning ne va pas conduire à des résultats de calcul équivalents pour tous les codes existants, apportant une contrainte certaine lors d'une éventuelle transposition de valeurs de paramètres entre modèles bâtis sur des codes de calculs différents. Dans le contexte du calage d'un modèle numérique, un code unique est considéré, et cette transposition n'est pas nécessaire. Pourtant, l'influence de la méthode de détermination de la débitance devrait intervenir dans l'incertitude d'estimation *a priori* des coefficients de résistance.

Dans la suite du document, nous ferons l'hypothèse que cette influence intervient seulement de façon négligeable dans ces incertitudes et que celles-ci sont reliées aux seules considérations sur les sources de résistance à l'écoulement identifiées dans la section 2.3.1.

## 2.4 Données en hydraulique fluviale

Mettre au point un modèle numérique en hydraulique fluviale nécessite de nombreuses données sur le système étudié et sur les événements l'ayant affecté, ou bien susceptibles de l'affecter. Cunge (1975, chap. 5) distingue deux groupes de données requises pour la préparation et le calage de modèles de propagation de crue : les données *topographiques* et les données *hydrauliques*. Dans cette section, nous suivrons la typologie que cet auteur a développée en la complétant par des données d'autres natures, requises pour les autres phases de la modélisation numérique. Les contraintes imposées pour mener à bien le processus seront évoquées pour chaque type de données.

### 2.4.1 Données topographiques

Les données topographiques décrivent la géométrie du système fluvial étudié indépendamment de l'événement pouvant l'affecter. Ces données sont destinées à établir

21. EINSTEIN, H. A. (1934), Der hydraulische oder profil-radius. *Schweizerische Bauzeitung*, vol. 103, n° 8, p. 89–91.

la topologie du modèle : lits d'écoulements principaux, zones de stockage, etc. Les différentes techniques disponibles pour recueillir de telles données ont été compilées par Tekatlian (2001a) et font l'objet d'un chapitre dans le *Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques* (Cornet *et al.*, 2002). Après un rapide parcours des différents types de données topographiques, nous nous attarderons sur l'influence de leur qualité sur les résultats de simulation.

## Typologie

### *Profils en travers*

Une campagne de levés topographiques et bathymétriques destinés à une modélisation hydraulique consiste le plus souvent en une série de profils en travers du lit mineur et éventuellement de la plaine d'inondation.

### *Profils en long*

La détermination de lignes directrices est une étape fondamentale dans l'établissement d'une géométrie adéquate pour une modélisation numérique. En particulier, la limite entre lit mineur et lit majeur doit être déterminée avec application sur chacune des rives de tous les profils mesurés.

### *Carte en plan*

L'établissement d'une carte topographique de la plaine d'inondation doit permettre de déterminer les limites de celles-ci, mais aussi les zones d'écoulement secondaires en crue ainsi que les zones de stockage. Le type de modélisation adopté pour la plaine d'inondation – lit majeur actif ou bien casier de stockage – va dépendre fortement de cette carte, qui peut provenir de quatre sources principales détaillées ci-dessous :

*Carte topographique* Les cartes topographiques IGN fournissent des courbes de niveau dont l'interpolation peut se révéler suffisante pour produire un rendu cartographique adapté à une modélisation unidimensionnelle.

*Modèle numérique de terrain* Un modèle numérique de terrain approprié pour la modélisation hydraulique unidimensionnelle peut être établi à partir de campagnes topographiques de terrain et d'un Système d'information Géographique (SIG). Des exemples de ce type d'approche sont donnés par Bates et De Roo (2000) et Tate *et al.* (2002).

*Photogrammétrie* Les prises de vues aériennes avec un plan au sol permettent, par stéréopréparation puis aérotriangulation, de restituer une topographie des zones non couvertes par une végétation haute.

*Altimétrie laser* Les techniques d'altimétrie laser LIDAR<sup>22</sup> sont depuis quelques années utilisées pour la détermination de la géométrie des plaines d'inondation. Des exemples sont donnés par Marks et Bates (2000) et Bates *et al.* (2003).

## Nombre et emplacement des sections en travers

Les règles de base pour déterminer l'emplacement des sections en travers ont été données par Samuels (1990). Ces règles comprennent, au-delà d'éléments de bon sens pour la représentation géométrique de la rivière, des critères mathématiques liés aux

---

22. pour *Light Detection And Ranging*.

caractéristiques hydrauliques de l'écoulement à modéliser (échelle de temps de l'événement, distance de remous, etc.). Quelques autres recommandations ont aussi été établies par le CETMEF (Salomon, 2000).

Fread (1993, p. 10.22), sur les bases d'études antérieures, propose un critère *numérique* pour déterminer l'espacement entre deux sections en travers sur la base du calcul du rapport entre deux sections mouillées consécutives :

$$0,635 \leq \frac{A_{i+1}}{A_i} \leq 1,576 \quad (2.22)$$

Ce critère est utilisé – pour un schéma de discrétisation implicite à quatre points – de manière automatique dans le logiciel FLDWAV (Fread et Lewis, 1998). Sa pertinence physique a été vérifiée par Gates *et al.* (1998) suivant des considérations de géométrie hydraulique. D'autres critères ont été étudiés par Traver et Miller (1993) pour l'implémentation dans le logiciel HEC-2, précurseur du code HEC-RAS.

### Erreurs dues aux données topographiques

Burnham et Davis (1986)<sup>23</sup> ont réalisé une étude statistique pour connaître les effets des erreurs dues à la topographie sur les lignes d'eau – calculées ici par le logiciel HEC-2 – correspondant à un débit centennial. Trois types de sources pour les données topographiques ont été étudiés : campagne de terrain, photogrammétrie et cartes topographiques. L'erreur moyenne sur les lignes d'eau basées sur une topographie obtenue par une campagne de terrain est par exemple donnée par la formule suivante :

$$E_{\text{moy}} = 0,041 h_{\text{moy}}^{0,60} S_0^{0,11} I_c^{0,65} \quad (2.23)$$

où  $h_{\text{moy}}$  hauteur d'eau moyenne sur le tronçon,  $S_0$  pente moyenne sur le tronçon et  $I_c$  indice de confiance sur la valeur du coefficient  $n$  de Manning. Cet indice de confiance, basé sur une répartition statistique construite à partir d'estimations de 80 ingénieurs, vaut 0 pour une connaissance parfaite du coefficient et 1 pour une estimation de base. Ces résultats ont été incorporés dans le logiciel PAS<sup>24</sup> (Davis et Barkin, 1989), destiné à une analyse préliminaire pour le calcul de lignes d'eau.

Une étude de sensibilité des résultats hydrauliques – niveaux d'eau et largeurs au miroir – à la topographie a été réalisée au CEMAGREF (Dhervillez, 2001). Une méthodologie a été développée pour déterminer de manière rapide l'influence d'erreurs de mesure – erreurs ponctuelles ou systématiques – des sections en travers (Faure *et al.*, 2002).

### 2.4.2 Données hydrométriques

Les données hydrométriques permettent de caractériser un événement survenant sur le système étudié, c'est-à-dire de caractériser une crue survenant sur la portion de rivière considérée. Encore une fois, un chapitre du *Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques* est consacré à cette catégorie de données (Goutx, 2004).

23. Ce rapport a été publié quelques années plus tard dans le *Journal of Hydraulic Engineering* (Burnham et Davis, 1990).

24. Pour *Preliminary Analysis System for Water Surface Profile Computations*.

## Typologie

### *Limnigramme*

Les stations hydrométriques permettent d'enregistrer de manière plus ou moins continue le niveau de l'eau dans la rivière. Ce niveau est relatif au niveau zéro de l'échelle limnimétrique associée, lui-même référencé dans les repères NGF. En considérant le niveau du fond de la section comme fixe, on peut en déduire la hauteur d'eau – comprendre la profondeur de l'eau – dans la rivière. Un limnigramme est donc une fonction discrète  $h(x_0, t)$ .

### *Jaugeage*

Une mesure de débit s'effectue la plupart du temps par exploration du champ des vitesses. Par intégration de ce champ, on obtient le débit associé au niveau d'eau courant dans la section considérée sous la forme  $Q(x_0, t_0)$ . Ce débit est associé à la hauteur d'eau dans la section pour former un point de jaugeage  $[Q(x_0, t_0), h(x_0, t_0)]$ .

### *Courbe de tarage*

Une courbe de tarage rassemble les différents jaugeages réalisés sur une section donnée. Cette courbe de tarage discrète est ensuite traduite en une fonction continue  $Q(h)$  pour permettre de déterminer – par interpolation ou extrapolation – les débits correspondants à d'autres hauteurs d'eau que celles mesurées durant les jaugeages.

### *Hydrogramme*

L'hydrogramme est la traduction du limnigramme enregistré par une station hydrométrique par la relation donnée par la courbe de tarage établie dans la section correspondante. C'est donc une fonction discrète  $Q(x_0, t)$ .

### *Niveau d'eau ponctuel*

Des niveaux d'eau peuvent aussi être mesurés de manière manuelle et ponctuelle dans des sections dépourvues de stations hydrométriques. Ces niveaux d'eau sont donc des points discrets  $h(x_0, t_0)$ .

### *Laisse de crue*

Les laisses de crue sont des témoins de la hauteur maximum atteinte dans une section pendant une crue donnée. Ces témoins peuvent être de nature très diverses : niveau repéré sur une structure pérenne, débris et sédiments fins laissés par le flot, etc. Lorsque une telle mesure est effectuée loin du lit principal de la rivière, il peut être difficile de la relier avec une abscisse en long précise  $x_0$  de ce lit. Une laisse de crue est ainsi un point  $\max_{t \in [t_d; t_f]} [h(x_0, t)]$  où  $t_d$  et  $t_f$  délimitent la plage d'occurrence estimée du niveau d'eau maximum.

## Données internes et externes

La distinction entre données *internes* et données *externes* a été effectuée par Fawcett *et al.* (1995), à propos de la validation de modèles distribués à base physique. Sur la base d'exemples issus de l'hydrologie distribuée – et notamment la modélisation avec le logiciel SHE –, mais aussi de l'hydraulique fluviale bidimensionnelle, les auteurs

mettent l'accent sur l'importance de disposer d'observations de terrain intérieures au domaine modélisé, pour vérifier la représentation des phénomènes et des processus internes. Cette approche a été reprise par Bates *et al.* (1998) qui ont réalisé un calage de plusieurs modèles hydrauliques bidimensionnels non seulement à l'aide d'enregistrements d'hydrogrammes à l'aval du tronçon modélisé – procédure appelée *external validation* –, mais aussi à l'aide d'enregistrements de niveaux d'eau à l'intérieur du bief modélisé – procédure identifiée par le terme *internal validation*. Cette nécessité a été relevée dans de nombreuses études (voir par exemple Bates et Anderson, 2001; Stewart *et al.*, 1999). Malheureusement, les données hydrométriques internes sont trop souvent rares ou inexistantes pour les événements simulés. Cette situation peut ainsi conduire à des paramétrisations irréalistes, comme le souligne Bates (2004) :

*Lack of distributed validation data is, therefore, a significant cause of equifinality and leads to a tolerance of the physically unrealistic spatial lumping of parameter values and processes.*

En revanche, de telles données internes peuvent être extrapolées à partir de données qualitatives comme les photographies aériennes, dont nous parlerons plus loin. Nous pouvons enfin noter que les autres types de modèles en hydroinformatique – modèles *black-box* ou *grey-box* –, qui fournissent seulement des résultats externes au domaine modélisé (voir la section 1.4.3 p. 22), requièrent seulement des données externes pour la phase de calage.

### Synthèse graphique

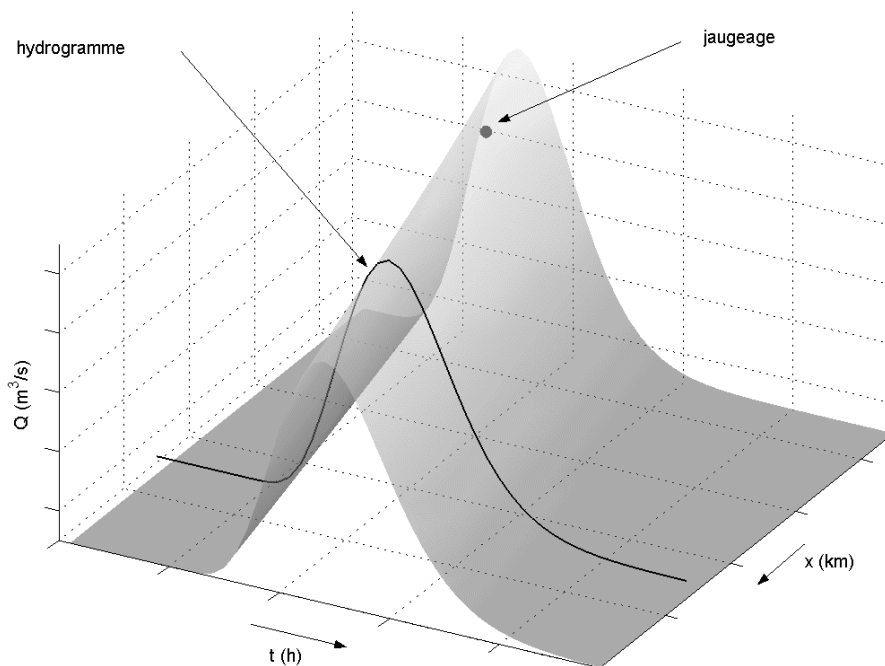
Une synthèse graphique en trois dimensions de ces différents types de données hydrométriques est présentée sur la figure 2.2, dans un repère  $(x,t,Q)$  (figure 2.2(a)) et dans un repère  $(x,t,z)$  (figure 2.2(b)). Sur ces deux graphiques, la crue est représentée par la surface grisée, et les différents types de données hydrométriques par des lignes pleines (hydrogramme, limnigramme et ligne d'eau) ou des points (jaugeage et niveau d'eau). Nous avons aussi représenté une laisse de crue par une ligne pleine suivant l'axe temporel, puisque l'instant précis où le niveau maximum a été atteint n'est pas connu.

### 2.4.3 Résultats hydrologiques

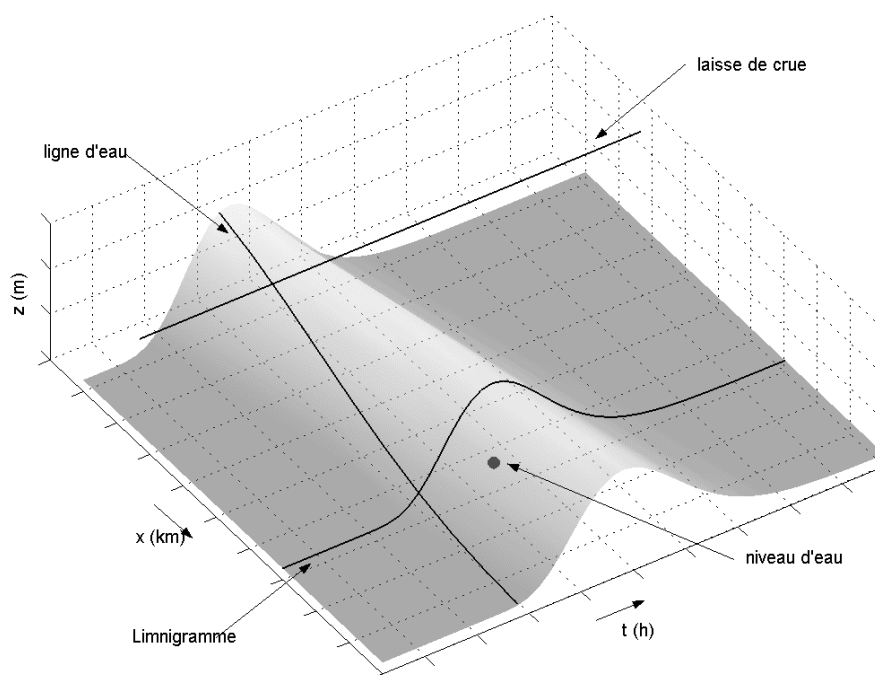
Une modélisation hydraulique peut nécessiter une modélisation hydrologique préliminaire pour déterminer certaines des données d'entrée à fournir au code, comme des apports du bassin versant intermédiaire, ou encore des hydrogrammes de projet.

#### Apports latéraux

Le bassin versant intermédiaire, situé entre l'amont et l'aval de la modélisation hydraulique, peut apporter sa contribution au débit dans la rivière principale. Par le biais d'une modélisation hydrologique, les hydrogrammes calculés à l'exutoire des sous-bassins versant intermédiaires sont fournis comme entrées du code d'hydraulique. Nous verrons dans le chapitre 6 un exemple d'utilisation de ce type de résultat issu d'une modélisation hydrologique sur le bassin versant de la Lèze.



(a) Avec la variable  $Q$ .



(b) Avec la variable  $z$ .

FIG. 2.2 – Représentation en 3D des données hydrométriques liées à une crue.

## Hydrogrammes de projet

Lors de la phase de prédiction, l'établissement de conditions limite amont nécessaires à la simulation d'un événement hypothétique requiert une modélisation hydrologique préalable produisant les hydrogrammes d'entrée correspondants.

### 2.4.4 Résultats océanographiques

Lorsque le système hydraulique considéré est un estuaire, la réalisation de prédictions hydrauliques nécessite l'établissement de limnigrammes de projet correspondant à des niveaux de marées projetés.

### 2.4.5 Données qualitatives

L'ensemble des données décrites ci-dessus est de nature éminemment quantitative. Les données d'ordre *qualitatif* sont pourtant particulièrement précieuses lors d'une modélisation hydraulique.

## Photographies terrestres

Les photographies terrestres peuvent être utilisées pour caractériser le système étudié, et notamment pour estimer une valeur des coefficients de résistance. Cet aspect sera longuement développé dans la section 3.1.2 du chapitre suivant. Lorsqu'elles sont prises durant un événement, elles peuvent aussi servir de données de référence, en permettant de créer des données quantitatives comme des hauteurs d'eau atteintes.

## Photographies aériennes ou images radar

Les produits de la télédétection sont actuellement de plus en plus utilisés dans les modélisations hydrauliques (voir Bates, 2004), notamment pour fournir des données internes de calage (Horritt, 2000; Horritt et Bates, 2001). En effet, de telles images prises durant une crue permettent en effet d'extraire des informations sur l'étendue du champ d'inondation.

Une autre utilisation des photographies aériennes a été mise en évidence lors de la thèse de Raclot (2003) : les photographies aériennes peuvent aussi permettre de déterminer des contraintes relatives sur les niveaux d'eau de différentes zones inondées, à partir de techniques d'analyse issues de l'intelligence artificielle (Raclot et Puech, 2003).

## Descriptions écrites

Les comptes-rendus d'un événement historique peuvent se révéler particulièrement importants lors d'un calage de modèle. Le lecteur intéressé par l'exploitation des ces informations historiques pourra parcourir la thèse de Naulet (2002).

## Témoignages

Pour des événements plus récents, le recueil de témoignages de riverains peut fournir de précieuses indications chronologiques et/ou qualitatives sur le déroulement de la crue considérée, à condition toutefois que ce recueil s'effectue dans des délais assez courts après l'événement.



### 2.4.6 Des données pour chaque étape de la modélisation numérique

Les données décrites dans les sections précédentes sont utilisées pour les deux étapes suivantes de la modélisation numérique : *construction du modèle* et *simulation*, telles que définies dans la section 1.3.5. Le tableau 2.6 présente pour chacune des sous-étapes les données requises et optionnelles.

		<i>Construction du modèle</i>		<i>Simulation</i>		
		Préparation du modèle	Calage du modèle	Validation du modèle	Prédiction	
Données topographiques	Sections en travers	•				
	Profils en long	•				
	Cartes en plan	•				
Données hydrométriques	Hydrogramme	amont	•	•		
		intérieur <sup>(1)</sup>	○	○		
	Courbe de tarage	intérieure		○	○	
		aval		• <sup>(2)</sup>	• <sup>(2)</sup>	• <sup>(2)</sup>
	Limnigramme	intérieur		○	○	
		aval		• <sup>(2)</sup>	• <sup>(2)</sup>	
Niveau d'eau		○	○			
Jaugeage			○	○		
Données qualitatives en crue	Photographies terrestres	○	○	○		
	Photographies aériennes	○	○	○		
	Descriptions écrites	○	○	○		
	Témoignages	○	○	○		
Résultats hydrologiques	Apport latéral	prédit		•		
		de projet			•	
	Hydrogramme de projet				•	
Résultats océanographiques	Limnigramme de projet				• <sup>(2)</sup>	

TAB. 2.6 – Typologie des données requises et optionnelles pour les différentes phases de la modélisation numérique (• : donnée requise ; ○ : donnée optionnelle).

<sup>(1)</sup> Un hydrogramme « intérieur » peut être situé à une des extrémités aval du domaine modélisé.

<sup>(2)</sup> La – ou les – condition limite aval peut être soit une courbe de tarage, soit un limnigramme.

Les données topographiques sont indispensables à la phase de *préparation du modèle*. Comme nous le verrons dans le chapitre 4, ces données font partie intégrante du modèle numérique et ne doivent pas être considérées comme des paramètres ni être modifiées durant les phases de calage et de validation (Cunge, 2003) :

*In open channel flow in rivers, [such] parameters are roughness Manning/Strickler/Chézy coefficients, singular head-loss coefficients and discharge coefficients of structures (weirs, gates, culverts, etc.). But certainly not topography, dyke elevation, operations rules for structures, etc.*

Par ailleurs, des données qualitatives en crue peuvent aider à identifier certaines caractéristiques de l'écoulement et guider les choix de modélisation, notamment pour la représentation de la plaine d'inondation.

La phase de *calage du modèle*, comme la phase de *validation du modèle*, nécessite impérativement des données hydrométriques – et éventuellement des résultats hydrologiques – pour construire les conditions aux limites du domaine modélisé, mais aussi d'autres données hydrométriques – mesurées directement ou bien extraites de données qualitatives – pour constituer un jeu de données de référence. Dans la suite de nos travaux et notamment dans l'élaboration du système d'assistance au calage, nous prendrons seulement en compte des *données hydrométriques exploitables directement*. En effet, de nombreuses techniques d'analyse de données qualitatives se développent actuellement pour se ramener à des données correspondant à des produits d'un code de calcul comme des hauteurs d'eau (voir par exemple Raclot, 2003).

La phase de *prédiction* nécessite quant à elle des données hydrologiques et océanographiques de projet, ainsi qu'une courbe de tarage comme condition limite aval à fournir au modèle.

## 2.5 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue les différents éléments intervenant dans une modélisation en hydraulique fluviale unidimensionnelle. Nous avons ainsi transposé dans ce domaine particulier les différents concepts définis dans les référentiels terminologique et méthodologique proposés dans le chapitre 1 :

- le *modèle conceptuel SAINT-VENANT* 1D inclut l'équation de continuité et l'équation dynamique, mais aussi une détermination de la débitance et des formules de pertes de charge ponctuelles ;
- le *code de calcul* *MAGE* développé au CEMAGREF implémente le modèle conceptuel ci-dessus ;
- les *paramètres* d'un modèle hydraulique comprennent les coefficients de débit des ouvrages et surtout les coefficients de résistance à l'écoulement ;
- les *données* mises en œuvre dans la tâche de calage peuvent être réparties en deux catégories : les données topographiques sont constitutives du modèle hydraulique et caractérisent le cours d'eau étudié, alors que les données hydrométriques caractérisent les crues simulées.

Ces différents éléments représentent les *connaissances descriptives* associées à la tâche de calage dans le domaine qui nous intéresse ici. Ces connaissances feront l'objet d'une formalisation dans le chapitre 4 au travers d'une ontologie pour l'hydraulique fluviale unidimensionnelle, et seront implémentées dans le système d'assistance au calage qui sera présenté dans le chapitre 5.



## Chapitre 3

# Calage en hydraulique fluviale

« Mais alors, dans le choix à faire entre les différents coefficients proposés, on ne peut plus se laisser guider par le seul raisonnement : c'est la pratique, et seulement une longue pratique, qui peut indiquer les corrections à faire subir à ces coefficients et les meilleures valeurs qu'il convient de leur attribuer dans les diverses circonstances. »

Alfred FLAMANT<sup>1</sup>

APRÈS LA PRÉSENTATION des différents éléments d'un modèle numérique en hydraulique fluviale, ce troisième chapitre s'intéresse aux différentes approches utilisées actuellement pour déterminer les valeurs des paramètres de ce modèle numérique. Nous nous intéresserons ici essentiellement aux principaux paramètres d'un modèle hydraulique, à savoir les coefficients de résistance à l'écoulement. Nous distinguons ici, d'une part les méthodes d'estimation *a priori* d'une valeur de ces paramètres, et d'autre part les procédures d'ajustement sur la base de comparaisons avec des données de référence. Enfin sont présentées deux approches émergentes pour la problématique de calage. Les connaissances *procédurales* exposées dans ce chapitre seront formalisées dans le chapitre suivant pour être implémentées dans le système d'assistance au calage.

### 3.1 Estimation d'une valeur *a priori* des paramètres

L'estimation d'une valeur du coefficient de résistance à l'écoulement pour un tronçon donné repose actuellement essentiellement sur l'expertise du modélisateur<sup>2</sup>. Celui-ci peut s'appuyer sur quatre méthodes qui vont être détaillées et analysées dans les sec-

---

1. Alfred FLAMANT, *Hydraulique* (1900). Encyclopédie des Travaux Publics, Béranger, C., 2<sup>e</sup> éd, avant-propos, p. iii.

2. On peut citer l'initiative originale de Kidson (2003) qui, dans le cadre d'une thèse, a fait appel au savoir-faire de la communauté des hydrauliciens pour l'estimation du coefficient  $n$  de Manning correspondant à son site d'étude. Elle a ainsi mis en ligne un site internet ([www.srcf.ucam.org/~r1k23/Manning/](http://www.srcf.ucam.org/~r1k23/Manning/)) présentant différentes sections en travers et les informations nécessaires correspondantes : photographies, granulométrie, et mesures hydrauliques à différents débits. Un formulaire est à disposition pour donner une estimation des valeurs du coefficient  $n$  pour chaque section en travers et pour trois classes de débit.

tions suivantes<sup>3</sup>. Nous proposons d'intégrer ces différentes méthodes dans une procédure synthétique d'estimation d'une valeur du coefficient  $n$  de Manning correspondant à un tronçon donné.

Parallèlement à nos travaux s'est déroulée, dans le cadre du projet *Reducing Uncertainty on River Flood Conveyance*, une importante revue bibliographique d'environ 700 références sur le sujet de la résistance à l'écoulement (Fisher et Dawson, 2003). Nous ne prétendons pas recouvrir ici l'ensemble de ce domaine, mais uniquement les travaux pertinents dans le cadre du calage d'un modèle hydraulique. Nous nous sommes par exemple restreints à des études sur des rivières à fond non sableux, pour rester dans les hypothèses du modèle conceptuel décrit dans le chapitre précédent.

### 3.1.1 Analyse des composantes de la résistance à l'écoulement

Nous avons vu précédemment (section 2.3.1, p. 36) que la résistance à l'écoulement, et donc le coefficient de résistance  $n$  par exemple, possédait des origines diverses. Dès 1929, Ramser cite parmi celles-ci les irrégularités du périmètre mouillé, la non uniformité des sections en terme de taille et de forme, la végétation et les obstructions à l'écoulement.

#### L'équation de Cowan

La détermination d'une valeur du coefficient  $n$  de Manning par les ingénieurs repose bien souvent sur une approche soit intuitive soit arbitraire, comme constaté par Cowan (1956) :

*There seems to have developed a tendency to regard the selection of  $n$  for natural channels as either an arbitrary or an intuitive process.*

Dans le but de redonner un fondement scientifique à cette estimation, il propose une formalisation de la dépendance du coefficient  $n$  de Manning vis à vis de plusieurs facteurs, sous la forme de l'équation suivante :

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (3.1)$$

où :

- le coefficient  $n_b$  constitue la valeur de base du coefficient de Manning, qu'aurait un canal rectiligne uniforme, homogène et de même matériau que le cours d'eau considéré ;
- le coefficient  $n_1$  représente l'effet engendré par les irrégularités de surface du fond et des parois ;
- le coefficient  $n_2$  traduit l'influence des variations de forme et de dimensions de la section mouillée ;
- le coefficient  $n_3$  représente l'effet des obstructions de la section mouillée par divers éléments : racines, blocs de pierre, troncs d'arbres... ;
- le coefficient  $n_4$  traduit l'influence de la végétation ;
- le coefficient  $m$  est un facteur correctif traduisant l'importance de la sinuosité du cours d'eau.

3. Ce catalogue de méthodes est présent dans la plupart des ouvrages de référence en hydraulique (Carlier, 1972; Chow, 1973; French, 1994).

Sur les bases de cette équation, Cowan a construit une méthodologie pour estimer une valeur du coefficient de Manning, en proposant pour chacun des coefficients une table sommaire associant une description physique des caractéristiques considérées à un intervalle de variation du coefficient. Cette méthode sera reprise dans le manuel d'hydraulique du *Soil Conservation Service* aux États-Unis (Culp *et al.*, 1956, Supplément B). Cowan propose dans son article une table très sommaire pour évaluer la valeur de base du coefficient  $n$  de Manning et des tables donnant les valeurs des différents coefficients d'ajustement. Nous proposons dans les tableaux D.1 à D.6 de l'annexe D une traduction des tables les plus complètes à ce jour<sup>4</sup>.

### Relation avec l'équation synthétique de Rouse

Les équations 2.18 et 3.1 peuvent être confrontées. Le tableau 3.1 présente la correspondance entre leurs différents termes : la rugosité relative  $\mathcal{K}$  dépend ainsi du matériau du fond, mais aussi de la végétation ; la forme de la section  $\mathbf{C}$  est représentée par le degré d'irrégularité ; la variabilité du canal  $\mathbf{N}$  provient des variations de forme et de taille de la section, mais aussi du méandrement et des obstructions.

Composante de l'équation 2.18	Coefficient de l'équation 3.1
$\mathcal{K}$	$\left\{ \begin{array}{l} n_b \\ n_4 \end{array} \right.$
$\mathbf{C}$	$n_1$
$\mathbf{N}$	$\left\{ \begin{array}{l} n_2 \\ n_3 \\ m \end{array} \right.$

TAB. 3.1 – Correspondance entre les formules explicitant les composantes de la résistance à l'écoulement.

Ces considérations montrent de manière claire que le coefficient  $n$  de Manning utilisé comme paramètre avec la plupart des codes de calcul ne représente pas seulement une mesure de la *rugosité*, mais regroupe aussi celle de bien d'autres facteurs, comme ceux évoqués dans les sections précédentes, mais aussi de facteurs propres au modèle conceptuel utilisé (Yen, 1973), notamment les hypothèses réalisées sur le coefficient de Coriolis  $\alpha$  (Xia et Yen, 1994). La distinction effectuée par (Yen, 1999) entre *coefficient de rugosité* et *coefficient de résistance à l'écoulement* prend donc tout son sens et c'est elle qui a motivé l'adoption de cette dernière appellation pour le coefficient  $n$  dans ce mémoire.

### Extension à un cours d'eau composé

Il est important de noter que la procédure décrite par Cowan est applicable seulement dans le cas d'un canal à lit simple. Pour des raisons pratiques d'application aux cours d'eau naturels, Arcement et Schneider (1984, 1989) ont étendu cette procédure à l'estimation des coefficients  $n$  de Manning relatifs au lit mineur composite et à la plaine

4. Carlier (1972) donne une traduction des tables originales établies par Cowan (1956).

d'inondation d'un bief donné<sup>5</sup>. La formule utilisée pour l'estimation du coefficient  $n$  de Manning pour une plaine d'inondation est la suivante :

$$n = n_b + n'_1 + n'_3 + n'_4 \quad (3.2)$$

où  $n_b$  est une valeur de base et  $n'_1$ ,  $n'_3$  et  $n'_4$  les coefficients homologues de ceux utilisés dans l'équation 3.1 avec des valeurs adaptées. Les coefficients  $n_2$  et  $m$  ne sont pas présents dans l'équation 3.2 puisqu'ils ne peuvent être définis pour une plaine d'inondation. Les tables de valeurs proposées par Arcement et Schneider (1989) sont reproduites en annexe D dans les tableaux D.7 à D.9.

### Comparaison avec une autre analyse

Dans le cadre du projet *Reducing Uncertainty on River Flood Conveyance*, une valeur « unitaire » de la résistance<sup>6</sup> notée  $n_l$  est déterminée par l'équation 3.3 (McGahey et Samuels, 2004) :

$$n_l = \sqrt{n_{\text{sur}}^2 + n_{\text{veg}}^2 + n_{\text{irr}}^2} \quad (3.3)$$

où  $n_{\text{sur}}$  représente le matériau de surface,  $n_{\text{veg}}$  l'influence de la végétation, et  $n_{\text{irr}}$  les irrégularités de la section (variations transversales et longitudinales, obstructions, etc.). Cette approche diffère de celle de Cowan sur deux points :

- le coefficient est décomposé en seulement trois facteurs, les coefficients  $n_1$ ,  $n_2$  et  $n_3$  de l'équation 3.1 étant en quelque sorte regroupés dans le coefficient  $n_{\text{irr}}$ . Il est important de noter que l'équation 3.3 n'est de plus pas utilisée avec le modèle conceptuel présenté dans le chapitre précédent (voir DEFRA/Environment Agency, 2004b, chap. 2), et le coefficient  $n_l$  n'inclue pas – à la différence du coefficient « classique » de Manning – les pertes de charge dues aux cisaillements latéraux, aux courants secondaires ou à la sinuosité ;
- la sommation des différents facteurs est effectuée par l'intermédiaire de leurs carrés, pour souligner le facteur principal et respecter la proportionnalité entre perte de charge et carré de la vitesse locale (DEFRA/Environment Agency, 2004a, p. 7).

Nous avons préféré mettre en relief dans ce mémoire l'approche de Cowan puisqu'elle est tout à fait compatible avec le modèle conceptuel actuellement utilisé pour rendre compte d'un écoulement fluvial unidimensionnel<sup>7</sup>. Dans ce cadre, il est important de noter que seuls deux valeurs du coefficient de résistance peuvent être définies dans une section : l'un pour le lit mineur et l'autre pour la plaine d'inondation. Cette approche – comme d'autres – ne permet donc pas de définir un coefficient spécifique pour les berges, ce qui peut être un frein à une modélisation fidèle de la résistance à l'écoulement. Nous reparlerons de ce point particulier à l'occasion de l'analyse de l'ensemble des approches pour l'estimation de valeurs *a priori*.

5. Une version utilisant les unités du Système International et disponible sur le web ([www.fhwa.dot.gov/bridge/](http://www.fhwa.dot.gov/bridge/)) comporte malheureusement plusieurs erreurs, notamment dans les valeurs du coefficient d'obstruction.

6. Traduction du terme anglais *Unit roughness value*.

7. L'actuel consensus sur le modèle conceptuel est d'ailleurs peut-être appelé à changer au profit de ceux présentés dans les travaux réalisés dans le cadre du projet *Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance* ou dans ceux de Proust (2005).

### 3.1.2 Comparaison à un catalogue de tronçons de référence

Plusieurs établissements américains ont lancé des études d'envergure pour réaliser des catalogues de tronçons de rivières de référence pour le coefficient de résistance à l'écoulement. Les cours d'eau de Nouvelle-Zélande ont eux aussi fait l'objet d'une importante campagne de mesure de ce coefficient. Cette section présente un inventaire assez exhaustif des publications de ces campagnes de terrain, menées sur des canaux d'irrigation, des lits mineurs de rivières naturelles et des plaines d'inondation. La technique de mesure du coefficient  $n$  de Manning employée dans la plupart de ces études est décrite dans l'annexe C.

#### Canaux de drainage et d'irrigation

Aux États-Unis, Ramser (1929) réalise pour le compte de l'USDA (*United States Department of Agriculture*) de nombreuses expériences sur des canaux, pour la plupart artificiels. À l'aide d'une méthode sommaire basée sur une mesure de la pente de la ligne d'eau, il propose des valeurs calculées du coefficient  $C$  de Chézy, puis du coefficient  $n$  de Kutter<sup>8</sup>. Chaque tronçon est décrit par une ou plusieurs photos en noir et blanc et un schéma de la section en travers moyenne. Ce premier catalogue de photographies et de mesures a été réédité trente ans plus tard par Fasken (1963). Celui-ci suggère d'utiliser les valeurs obtenues avec la formule de Manning. Il remarque pourtant que cette utilisation n'est pas absolument rigoureuse :

*The calculated "n" values would have been slightly less had the measured values been substituted in the Manning formula.*

Selon Culp *et al.* (1956, p. 5.4.2), cette correspondance est valable pour des pentes supérieures ou égales à 0,01% et un rayon hydraulique compris entre 0,3 m et 6 à 9 m.

Après avoir rendu publics en 1933 les résultats de plus de 450 expériences réalisés sur des canaux bâtis, Scobey (1939) – toujours pour le compte de l'USDA – publie les résultats de près de 500 expériences réalisées sur des canaux de types variés. En utilisant la méthode standard de mesure du coefficient  $n$ <sup>9</sup>, il propose ainsi un tableau des valeurs calculées des coefficients  $C$  de Chezy,  $n$  de Kutter et  $n$  de Manning. Ce tableau est accompagné d'un grand nombre de photographies en noir et blanc et d'une reproduction des sections-types des canaux.

#### Lits mineurs de rivières naturelles

Barnes (1967) réalise pour le compte de l'USGS (*United States Geological Survey*) de nombreuses mesures sur des rivières naturelles après le passage d'une crue *non débordante*. Il reporte ainsi pour chaque bief étudié les profils en travers de 3 ou 4 sections, un schéma en plan du bief et deux photographies en couleur. Le débit de pointe de la crue est estimé à partir d'une courbe de tarage, et la ligne d'eau enveloppe correspondante est déterminé à l'aide de laisses de crues<sup>10</sup>. Le coefficient  $n$  est alors calculé par la formule de Manning.

8. Voir l'annexe E (p. 260) pour plus de renseignements sur ce coefficient.

9. Voir l'annexe C.

10. Les mesures sont données en unités anglo-saxonnes, mais une partie d'entre elles est transcrite en unités du Système International dans l'ouvrage de French (1994, p. 132-157)



Hayden *et al.* (1999) ont transcrit ce rapport en langage html pour le déposer sur un site Internet<sup>11</sup>. Nolan *et al.* (1998)<sup>12</sup> incluent quant à eux dans leur stage pratique sur les techniques en hydraulique fluviale une version légèrement différente du rapport de Barnes. Ponce *et al.* (2001) ont eux regroupé sur un autre site<sup>13</sup> les photographies et les valeurs correspondante calculées du coefficient  $n$  de Manning dans une collection de miniatures. Il est ainsi possible d'avoir une idée d'ensemble des différents faciès puis d'effectuer un zoom sur ceux se rapprochant du site d'étude.

Coon (1995), toujours pour le compte de l'USGS, effectue de nombreuses mesures sur des cours d'eau de l'état de New-York, dont une majorité de rivières naturelles, et fournit pour chaque site deux photos en noir et blanc ainsi que les valeurs du coefficient  $n$  de Manning calculées pour différents débits. Ce rapport a été repris plus récemment pour inclure de nouvelles photos en couleur des sites étudiés (Coon, 1998).

En Grande-Bretagne, une étude du coefficient de Manning est réalisée au début des années 1990 sur des cours d'eau de la région du Severn-Trent<sup>14</sup>. Des photos accompagnées des mesures effectuées au débit de pleins bords sur huit sites ont été reprises par Fisher et Dawson (2003, p. 170-185) dans le cadre de la revue bibliographique du projet *Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance*.

En Nouvelle-Zélande, Hicks et Mason (1998) ont effectué de très nombreuses mesures sur des rivières naturelles – mais aussi quelques canaux – qui constituent la plus grande compilation de données disponibles sur le coefficient  $n$ <sup>15</sup>. Ils fournissent pour chaque site une description précise du tronçon étudié, de la granulométrie, plusieurs photos et l'ensemble des mesures réalisées à plusieurs débits.

Aldridge et Garrett (1973) proposent enfin des valeurs du coefficient  $n$  – pour la plupart *estimées*<sup>16</sup> – pour des types de cours d'eau intermittents situés dans des régions arides. Ces recherches ont été poursuivies plus récemment par Phillips et Ingersoll (1998) qui ont réalisé des mesures du coefficient  $n$  sur d'autres rivières de l'Arizona.

### Plaines d'inondation

Dans leur rapport pour la *Federal Highway Administration*, Arcement et Schneider (1984) reproduisent des photographies en noir et blanc de plaines d'inondations associées à une valeur du coefficient  $n$  de Manning calculée par Schneider *et al.* (1977)<sup>17</sup>. Il faut noter que les plaines d'inondation présentées sont uniquement constituées de sous-bois. Ponce *et al.* (2002) ont regroupé sur un site Internet<sup>18</sup> la version en couleur de ces photographies, sous forme d'une collection de miniatures.

Aldridge et Garrett (1973) proposent quant à eux des valeurs *estimées* de la valeur du coefficient  $n$  pour différents types de plaines d'inondation de cours d'eau de régions arides.

11. [www.engr.utk.edu/hydraulics/openchannels/cover.htm](http://www.engr.utk.edu/hydraulics/openchannels/cover.htm)

12. Le rapport complet est disponible en version html sur le site [www.rcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/](http://www.rcamnl.wr.usgs.gov/sws/fieldmethods/)

13. [manningsn.sdsu.edu/](http://manningsn.sdsu.edu/)

14. NATIONAL RIVERS AUTHORITY, Severn-Trent Region (1991), Manning's roughness study. *Second interim report*.

15. Cet ouvrage a fait l'objet de deux revues dans le *Journal of Hydraulic Engineering*, dont une très récente (Nelson, 2001; Rathburn, 2004).

16. Par des praticiens expérimentés de l'USGS.

17. Comme évoqué plus haut, les calculs présentés sont en unités anglo-saxonnes.

18. [manningsn2.sdsu.edu/](http://manningsn2.sdsu.edu/)

### Récapitulatif des références disponibles

Le tableau 3.2 regroupe les différents catalogues de sections de référence disponibles dans la littérature, suivant la nature du cours d'eau considéré.

Type de cours d'eau		Auteurs	Sites	Valeurs de $n$	Plusieurs débits
Canaux	bâties	Scobey	>250	0,007–0,027	oui <sup>(1)</sup>
		Scobey <sup>(2)</sup>	>300	0,010–0,071	oui <sup>(1)</sup>
	creusés ou dragués	Ramser <sup>(3)</sup>	41	0,014–0,162	oui
		Hicks et Mason	4	0,018–0,045	oui
		Phillips et Ingersoll	4	0,017–0,052	oui
	Coon	2	0,024–0,033	oui	
Rivières	N <sup>lle</sup> -Zélande	Hicks et Mason	74	0,016–0,290 <sup>(4)</sup>	oui
	États-Unis	Barnes	50	0,024–0,075	non
	Arizona	Aldridge et Garrett	35	0,012–0,090 <sup>(5)</sup>	oui <sup>(6)</sup>
	New-York	Coon	19	0,025–0,129	oui
	Floride	Gillen	10	0,021–0,218	oui
	Arizona	Phillips et Ingersoll	10	0,018–0,067	oui
	Angleterre	Fisher et Dawson	8	0,022–0,052	non <sup>(7)</sup>
	Colorado	Jarrett	3	0,033–0,142	oui
Lits majeurs	Arizona	Aldridge et Garrett	10	0,030–0,100	non <sup>(8)</sup>
	États-Unis (S-E)	Arcement et Schneider	9	0,100–0,200	non

TAB. 3.2 – Récapitulatif des catalogues de sections de référence disponibles.

- (1) Sur quelques sites seulement.  
 (2) Catalogue repris partiellement par Chow.  
 (3) Catalogue repris par Fasken et partiellement par Chow.  
 (4) Les sites sont classés par ordre croissant de la valeur de  $n$  pour le débit moyen inter-annuel.  
 (5) Les sites sont classés par  $n$  croissant.  
 (6) Seuls 6 sites ont fait l'objet de mesures hydrauliques. Les valeurs de  $n$  ont été estimées visuellement sur les autres sites.  
 (7) Les mesures données correspondent au débit de pleins bords.  
 (8) Les valeurs de  $n$  ont été estimées visuellement.

Plusieurs points sont à considérer lors de l'utilisation de tels catalogues de tronçons de référence. En effet, certaines mesures répertoriées ont été effectuées dans des conditions pour lesquelles le coefficient  $n$  mesuré ne peut être utilisé comme paramètre d'un modèle numérique :

- pour des hauteurs d'eau de même ordre que le diamètre médian des sédiments constituant le lit du cours d'eau, la définition du rayon hydraulique et de la profondeur devient ambiguë, et la formule de Manning est difficilement applicable (Smart *et al.*, 2002; Smart, 2004) ;
- pour des débits débordants, la mesure du coefficient  $n$  inclut les pertes de charges dues au débordement, ce qui ne permet pas d'identifier correctement la valeur du paramètre correspondant à la résistance du lit mineur seul.

L'utilisation de catalogues de tronçons de référence doit donc être effectuée avec vigilance. Au vu de ces remarques, on ne peut qu'apprécier l'approche de Hicks et Mason qui fournissent, en sus des valeurs mesurées à différents débits, la valeur du coefficient  $n$  pour le débit moyen interannuel ou *module*.

Enfin, il est important de prendre en considération la région du monde dans laquelle ont été effectuées ces mesures. En effet, la morphologie des cours d'eau naturels dépend en grande partie du régime des écoulements qui lui-même est intimement relié à la position géographique du bassin versant étudié. La plupart des rivières intermittentes de l'Arizona étudiées par Aldridge et Garrett, Phillips et Ingersoll, mais aussi certains cours d'eau néo-zélandais à la forme caractéristique étudiés par Hicks et Mason, ne peuvent être directement transposés en France par exemple.

### 3.1.3 Exploitation d'une table de valeurs basée sur une typologie de rivières

Guanguillet et Kutter (1893) sont les premiers à proposer une table de valeurs basée sur une typologie de canaux pour le coefficient  $n$ , alors rattaché à la formule développée par ces auteurs et connu sous le nom de coefficient  $n$  de Kutter<sup>20</sup>. Horton<sup>21</sup> propose une extension de cette table incluant notamment huit types de cours d'eau naturels. La reproduction complétée de cette dernière table dans l'ouvrage de King (1954, p. 7-20) a grandement participé à la popularité du coefficient  $n$ .

Chow (1973) a largement augmenté l'étendue de la table originale en considérant différents types de lit mineurs, mais aussi différentes familles de plaines d'inondation, classées selon le type de végétation prépondérant. Ces tables sont issues d'une compilation de nombreuses mesures de la pente de la ligne d'énergie réalisés notamment par Horton<sup>21</sup>, Ramser (1929), King (1954) et Culp *et al.* (1956), et associées à des descriptifs des canaux ou rivières correspondants. Elles ont été reprises de nombreuses fois, notamment par Jarrett (1985) et Coon (1995)<sup>22</sup>.

Une traduction française de ces tables est proposée en annexe D<sup>23</sup> : les tableaux D.10 et D.11 présentent les valeurs du coefficient  $n$  pour différents types de canaux, le tableau D.12 pour différents types de rivières et le tableau D.13 pour différents types de plaines d'inondation.

On peut par ailleurs trouver dans la littérature de nombreux articles portant sur la détermination de coefficients de résistance pour des modèles hydrologiques de bassins versants. Parmi eux, Engman (1986) propose une table du coefficient  $n$  de Manning pour différents types d'occupation du sol. Cette table – utilisée par Liong *et al.* (1989) pour une modélisation d'un bassin versant à Singapour – est reproduite sur le tableau D.14 de l'annexe D. Gilley et Kottwitz (1992) proposent quant à eux des tables de valeurs du coefficient de Manning pour différents types de cultures et pour des orientations des rangs parallèle ou perpendiculaire au courant. Cette table est reproduite dans le tableau D.15 de l'annexe D.

20. Voir annexe E, p. 260.

21. HORTON, R. E. (1916), Some better Kutter's formula coefficients. *Engineering News*, vol. 75, n° 8, p. 373–374.

22. Ce dernier rapport a été repris trois ans plus tard avec des photographies en couleur pour tous les sites étudiés (Coon, 1998).

23. Carlier (1972, p. 546-547) donne une version de la table originale de Horton dont la traduction française ne nous semble pas toujours fidèle aux notions de la version anglo-saxonne. Nous proposons donc en annexe une nouvelle traduction des tables données par Chow (1973) réalisée avec l'aide du *Grand Dictionnaire terminologique* ([www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)). Certains commentaires de Fisher et Dawson (2003) sur ces tables – et notamment sur les termes *weedy* et *brush* – ont de plus été mis à profit.

Le tableau 3.3 présente un récapitulatif des tables de valeurs présentes dans la littérature.

Type de cours d'eau	Auteurs	Nombre d'entrées	Valeurs de n
Canaux	Chow	50	0,010–0,500
Rivières	Chow	12	0,025–0,150
Lits majeurs	Chow	15	0,020–0,200
	Engman	24	0,060–0,480
	Gilley et Kottwitz	12	0,012–1,260

TAB. 3.3 – Récapitulatif des tables de valeurs du coefficient  $n$  de Manning.

### 3.1.4 Formules empiriques

Coon (1995, p. 21-24) présente une critique des différentes équations disponibles et de leurs différentes conditions d'application. La plupart d'entre elles fait intervenir des mesures de variables hydrauliques comme la pente de la ligne d'eau ou le rayon hydraulique. Ces équations ne sont donc pas utilisables directement pour déterminer une valeur du coefficient  $n$  de Manning comme paramètre d'un modèle numérique. Cela étant, elles peuvent servir de vérification *a posteriori* de la valeur obtenue par d'autres moyens. Les formules les plus courantes sont présentées dans les paragraphes suivants<sup>24</sup>.

#### Formules liées à la granulométrie

La granulométrie du lit est un facteur majeur de la résistance à l'écoulement, comme indiqué par le tableau D.1 de l'annexe D. De nombreux auteurs ont donc tenté de relier directement le coefficient  $n$  de Manning à une mesure de la taille des sédiments. Strickler<sup>25</sup> a proposé la première formule de ce type :

$$n = \frac{d_{50}^{1/6}}{21,1} \quad (3.4)$$

De façon surprenante, l'équation 3.4 attribuée à Strickler varie considérablement selon les sources, comme indiqué par French (1994, p. 159)<sup>26</sup>.

*... there is significant disagreement between authors regarding the circumstances of the original Strickler experiments, the value of the coefficient [dans l'équation 3.4], the definition of the variable  $d$ , and the units associated with  $d$ .*

De nombreuses autres équations de forme identique ont été déterminées empiriquement en utilisant comme variables d'autres diamètres que le diamètre médian. On citera

24. La plupart de ces formules ont été publiées en concordance avec les unités du système anglo-saxon. Les coefficients ont été modifiés ici pour utiliser les variables dans les unités du Système International.

25. STRICKLER, A. (1923), Beiträge zur Frage der geschwindigkeitsformel und der rauhighkeitszahlen für ströme, kanäle und geschlossene leitungen. *Mitteilungen des Amtes für Wasserwirtschaft*, n° 16.

26. Nous avons pris ici la formule indiquée dans la note biographique de Vischer (1987) qui indique la formule suivante :  $K_s = \frac{21,1}{d^{1/6}}$  où  $d$  diamètre du gravier ou des rochers. Pour plus d'informations sur les différentes valeurs que peuvent prendre les éléments de cette équation, le lecteur est invité à se référer à la discussion de Jaegi et Smart sur une contribution de Bray (1982, p. 133-134).

seulement la formule développée par Meyer-Peter et Müller (1948) utilisant la taille de particule pour laquelle 90 % des sédiments sont plus fins :

$$n = \frac{d_{90}^{1/6}}{26} \quad (3.5)$$

Leopold et Wolman (1957, p. 57) ont établi la formule suivante – à l'origine sur le coefficient  $f$  de Darcy-Weisbach – en incluant une dépendance du coefficient de résistance vis-à-vis du rayon hydraulique  $R$  et en accordant leur préférence au quantile à 84 % comme mesure granulométrique :

$$n = 0,113 R^{-1/3} d_{84}^{1/2} \quad (3.6)$$

Limerinos (1970) propose la formule logarithmique suivante, toujours sur les bases d'une analyse du coefficient  $f$  :

$$n = \frac{0,113 R^{1/6}}{1,16 + 2,0 \log_{10} \left( \frac{R}{d_{84}} \right)} \quad (3.7)$$

Cette équation est recommandée par Bray (1979). Griffiths (1981), suivant une approche similaire sur d'autres données, propose enfin l'équation suivante :

$$n = \frac{0,113 R^{1/6}}{0,76 + 1,98 \log_{10} \left( \frac{R}{d_{50}} \right)} \quad (3.8)$$

### Formules liées à une pente

L'utilisation des formules citées au-dessus est conditionnée par la disponibilité de mesures granulométriques sur le site étudié. D'autres auteurs ont donc tenté d'établir de manière empirique d'autres équations basées uniquement sur des mesures hydrauliques. Bray (1979) recommande l'utilisation de la formule suivante si aucune donnée sur la taille des sédiments n'est disponible :

$$n = 0,104 S_w^{0,177} \quad (3.9)$$

où  $S_w$  pente de la ligne d'eau. Dingman et Sharma (1997) ont utilisé les données de Barnes (1967) et de Hicks et Mason (1998)<sup>27</sup> pour dériver l'équation suivante :

$$n = 0,217 A^{-0,173} R^{0,267} S_w^{0,156} \quad (3.10)$$

Une analyse critique très complète de toutes ces formules a été récemment effectuée par Bathurst (2002) qui propose à son tour les équations suivantes, où  $S$  pente du fond :

$$\left\{ \begin{array}{ll} n = 0,083 R^{1/6} \left( \frac{R}{d_{84}} \right)^{-0,547} & \text{pour } S < 0,8\% \\ n = 0,103 R^{1/6} \left( \frac{R}{d_{84}} \right)^{-0,93} & \text{pour } S > 0,8\% \end{array} \right. \quad (3.11)$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} n = 0,083 R^{1/6} \left( \frac{R}{d_{84}} \right)^{-0,547} & \text{pour } S < 0,8\% \\ n = 0,103 R^{1/6} \left( \frac{R}{d_{84}} \right)^{-0,93} & \text{pour } S > 0,8\% \end{array} \right. \quad (3.12)$$

27. La première édition date de 1991.

## Récapitulatif

Les équations 3.4 à 3.12 ont été déterminées de manière empirique en utilisant des ajustements statistiques. Le nombre de sites utilisées pour l'établissement de chacune d'entre elles ainsi que les valeurs extrêmes mesurées du rayon hydraulique, de la pente et du diamètre médian du substrat sont résumés dans le tableau 3.4.

Auteurs	Domaine de détermination			Nombre de sites
	Rayon hydraulique (m)	Pente (%)	d <sub>50</sub> (mm)	
Strickler <sup>(1)</sup>	0,037–7,14	0,04–2,5	–	–
Meyer-Peter et Müller	– <sup>(2)</sup>	0,4–23	0,40–28,65	13 <sup>(3)</sup>
Limerinos	0,44–3,32	– <sup>(2)</sup>	17–253	11
Griffiths	0,12–6,89	0,0085–1,10	13–152	59
Leopold et Wolman	0,16–1,40	0,02–3,6	0,18–268	> 28 <sup>(4)</sup>
Bray	0,44–6,92 <sup>(5)</sup>	0,022–1,5 <sup>(6)</sup>	26–145	67
Dingman et Sharma	0,11–9,17	0,002–4,18 <sup>(6)</sup>	– <sup>(2)</sup>	128
Bathurst	0,11–1,63	0,30–3,73	112–762 <sup>(7)</sup>	27

TAB. 3.4 – Récapitulatif des équations empiriques et de leur domaine de détermination.

<sup>(1)</sup> Valeurs d'après Vischer (1987).

<sup>(2)</sup> Non renseigné.

<sup>(3)</sup> Configurations de canaux expérimentaux.

<sup>(4)</sup> L'équation a été établie à partir de plus de 50 observations, mais seules les données de 28 sites sont disponibles.

<sup>(5)</sup> La variable mesurée est en réalité la profondeur moyenne définie comme le rapport de la section mouillée à la largeur au miroir.

<sup>(6)</sup> Pente de la surface libre.

<sup>(7)</sup> d<sub>84</sub>.

Dans notre contexte d'étude, il est important de noter que seules les équations 3.4 et 3.5 peuvent être utilisées pour déterminer une valeur *a priori* du coefficient  $n$  de Manning. En effet, toutes les autres formules font intervenir des variables hydrauliques que le modélisateur cherche justement à calculer.

### 3.1.5 Analyse des méthodes d'estimation d'une valeur

Les différentes méthodes d'estimation *a priori* d'une valeur – ou d'un intervalle de valeurs – pour le coefficient  $n$  de Manning décrites ci-dessus méritent une analyse de leur pertinence à la fois absolue et relative avant leur implémentation dans un système d'assistance au calage. Notre analyse s'est focalisée sur l'estimation du coefficient  $n$  pour des rivières naturelles, en considérant l'objectif de prévention des inondations pour le modèle numérique considéré. De plus, seules de rares mesures du coefficient de résistance pour les plaines d'inondation sont disponibles dans la littérature<sup>31</sup>. Nous avons donc réalisé notre analyse *uniquement sur des valeurs mesurées pour le lit mineur de cours d'eau naturels*.

31. On peut en réalité en trouver une seule dans le rapport de Barnes (1967, p. 138-141).

## Matériel pour l'analyse

Nous avons utilisé les données recueillies par Barnes (1967) et Hicks et Mason (1998), après les avoir filtrées suivant les remarques effectuées plus haut (p. 57) de manière à :

- prendre uniquement en compte des écoulements *non débordants* ;
- considérer seulement les *rivières à lit de gravier*. Nous avons ainsi conservé uniquement les sites pour lesquels le diamètre médian des sédiments était supérieur ou égal à 2 mm ;
- éviter les mesures réalisées à un *tirant d'eau supérieur à trois fois le diamètre médian* des sédiments.

Pour chaque mesure retenue, nous avons déterminé, à partir des données fournies par les auteurs sur chaque site (photographies, descriptions textuelles et graphiques et courbes granulométriques disponibles) les résultats suivants :

1. une valeur du coefficient  $n$  par la formule de Strickler, à partir de l'équation 3.4 ;
2. un intervalle de variation du coefficient de base  $n_b$  de la formule de Cowan, à partir du tableau D.1 ;
3. un intervalle de variation du coefficient  $n$  d'après la formule de Cowan, à partir des tableaux D.1 à D.6 ;
4. un intervalle de variation du coefficient  $n$  donné d'une part par la formule de Strickler pour la valeur de base, et d'autre part par la formule de Cowan, à partir des tableaux D.2 à D.6<sup>32</sup> ;
5. un intervalle de variation du coefficient  $n$  d'après la typologie de rivières de Chow, à partir du tableau D.12 ;
6. un intervalle d'incertitude de mesure d'après les indications de Hicks et Mason.

Les paragraphes suivants présentent l'exploration de plusieurs points sur la base de ces résultats.

## Différence entre valeur de la rugosité et valeur de la résistance

Comme rappelé plus haut (section 3.1.1, p. 53), la rugosité ne représente qu'une des sources de la résistance à l'écoulement. Or, les formules retenues au terme de la section 3.1.4 ne font intervenir qu'une mesure de la rugosité du lit, par l'intermédiaire par exemple du diamètre médian des sédiments pour la formule de Strickler. La figure 3.1 présente la comparaison de valeurs *mesurées* du coefficient de résistance, d'une part à l'intervalle pour la valeur de base de la formule de Cowan, et d'autre part à la valeur calculée par la formule de Strickler.

Deux constatations peuvent être effectuées : premièrement, les deux méthodes conduisent à une sous-estimation quasi systématique du coefficient  $n$  de Manning<sup>33</sup>. Cette observation confirme la différence entre coefficient de rugosité et coefficient de résistance à l'écoulement. Deuxièmement, les valeurs obtenues par la formule de Strickler sont proches de la borne inférieure de l'intervalle du coefficient  $n_b$  de la formule de Cowan. La formule de Strickler donnerait ainsi une estimation basse de la résistance due à la rugosité du lit.

32. Bray (1979) a lui aussi utilisé cette méthode « hybride » lors d'une comparaison de plusieurs méthodes d'estimation d'une valeur de  $n$ .

33. Excepté pour les faibles valeurs de ce coefficient. Nous reviendrons sur ce point dans les paragraphes suivants.

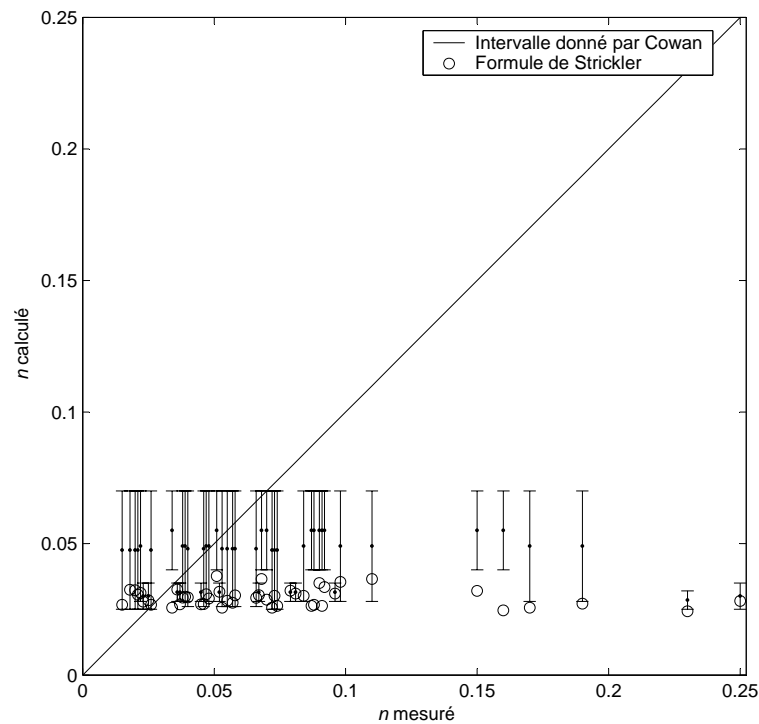


FIG. 3.1 – Comparaison des mesures du coefficient  $n$  avec l'intervalle pour la valeur de base de la formule de Cowan et avec les valeurs données par la formule de Strickler. Lorsque plusieurs mesures donnaient la même valeur de  $n$ , nous avons considéré la valeur moyenne des résultats fournis par la formule de Strickler et les valeurs extrêmes fournies par l'intervalle de Cowan.

### Pertinence d'une valeur constante dans le lit mineur

Nous avons précédemment évoqué l'éventualité de l'influence de la résistance des berges dans l'estimation d'une valeur du coefficient  $n$  relative au lit mineur. Les paragraphes suivants sont destinés à mettre cet aspect en relief dans l'optique d'une analyse des méthodes d'estimation d'une valeur *a priori*.

#### *En fonction du rayon hydraulique*

L'examen des mesures effectuées par Hicks et Mason à plusieurs débits permet de prendre conscience des variations importantes du coefficient  $n$  avec le rayon hydraulique dans le lit mineur de rivières naturelles. Dans la gamme des écoulements retenus ici, cette variation est principalement due à la différence de résistance entre le lit même du cours d'eau et les berges de celui-ci. Sargent (1979) a étudié cette variation sur quelques sites et a remarqué que le coefficient  $n$  de Manning diminue avec la hauteur d'eau pour atteindre une valeur asymptotique à l'approche des conditions de pleins bords<sup>34</sup>. Cette variation peut toutefois s'inverser (voir les nombreux exemples donnés par Hicks et Mason, 1998) lorsque les berges offrent une résistance plus forte que le lit lui-même.

34. Des constatations similaires ont été effectuées par Wallis et Knight (1984) sur des estuaires, avec des courbes aux propriétés différentes selon le sens de la marée.



Yen (1991*b*) propose un schéma de la courbe  $n(h)$  qui reprend les conclusions de Sargent pour des rivières à lit composé. On peut rapprocher ces variations de la figure 2.1(a) p. 40, qui montre un coefficient de Manning composite *constant jusqu'au débordement*. La paramétrisation unique de la résistance à l'écoulement représentée sur la figure 2.1(a) apparaît comme assez éloignée de la réalité. Or, les méthodes basées sur une analyse des composantes de la résistance ou bien sur une typologie de rivières conduisent à une estimation conjointe de résistance du lit et des berges. Ces mêmes méthodes ne donnent heureusement pas une valeur unique, mais un intervalle dont on peut considérer qu'il intègre cette variation avec la hauteur d'eau.

Une question plus importante est soulevée par le fait que les tableaux de valeurs établies pour la formule de Cowan – et notamment le tableau D.6 – comportent des *catégories différentes* pour une végétation identique recouverte de différentes profondeurs d'eau. Si ces distinctions sont fondées sur des considérations physiques, elles posent non plus la question d'une *valeur* constante dans le lit mineur, mais bien celle d'un *intervalle* constant physiquement réaliste donné par cette méthode. On peut effectuer une remarque similaire pour la méthode de Chow, cette fois-ci seulement lors de l'estimation d'une valeur en lit majeur.

#### *En fonction de la saison*

Dans un ordre d'idée voisin, la méthode de Cowan modifiée par Coon (1995) comporte une catégorisation du facteur  $n_4$  dépendant de la densité du feuillage, et donc de la saison de l'année (voir tableau D.6). L'intervalle donné par cette méthode va de fait être foncièrement dépendant d'un facteur supplémentaire. On peut effectuer une remarque identique pour la méthode de Chow, mais encore une fois seulement pour l'estimation du coefficient  $n$  en lit majeur.

Cette caractéristique est prise en compte dans le cadre du projet *Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance* : le facteur  $n_{veg}$  rendant compte de la végétation peut en effet être affecté d'une variation de périodicité annuelle pour rendre compte de l'évolution de la végétation avec la saison (DEFRA/Environment Agency, 2004*a*).

#### **Comparaison semi-quantitative de différentes méthodes**

Les intervalles de variation du coefficient  $n$  obtenu par les trois méthodes décrites page 3.1.5 ont été comparés à l'intervalle d'incertitude de mesure donné par Hicks et Mason. La figure 3.2 permet ainsi de tirer plusieurs conclusions :

- *Les trois méthodes ne sont pas adaptées à des cours d'eau offrant peu de résistance à l'écoulement.* On s'aperçoit que les trois méthodes surestiment largement le coefficient  $n$  de Manning pour des valeurs inférieures à environ 0,03, correspondant à une valeur du coefficient  $K_s$  de Strickler de l'ordre de 30. On peut toutefois noter que rares sont les cours d'eau naturels entrant dans cette catégorie ;
- *L'utilisation d'une typologie de rivière n'est pas adaptée à des cours d'eau offrant une grande résistance à l'écoulement.* On constate ainsi que cette méthode sous-estime fortement le coefficient  $n$  de Manning pour des valeurs supérieures à environ 0,1 ( $K_s \gtrsim 10$ ) ;
- *L'analyse des facteurs de résistance à l'écoulement n'est pas adaptée à des cours d'eau offrant une très grande résistance à l'écoulement.* On s'aperçoit que les valeurs du coefficient  $n$  de Manning sont sous-estimées pour des valeurs supérieures à 0,15–0,17 ( $K_s \gtrsim 6$ ).

- L'utilisation de la formule de Strickler dans l'analyse des facteurs de résistance à l'écoulement permet de préciser nettement l'intervalle de variation. On peut toutefois noter que la robustesse de cet intervalle peut en pâtir, notamment pour des valeurs proches de 0,07 ( $K_s \simeq 15$ );
- L'utilisation d'une typologie de rivière permet d'obtenir un intervalle de variation plus précis que les deux autres méthodes pour des cours d'eau communs. On constate que l'intervalle donné par cette méthode suit de manière régulière l'intervalle d'incertitude de mesure pour des valeurs du coefficient  $n$  de Manning comprises entre 0,04 et 0,08 ( $12 \lesssim K_s \lesssim 25$ ).

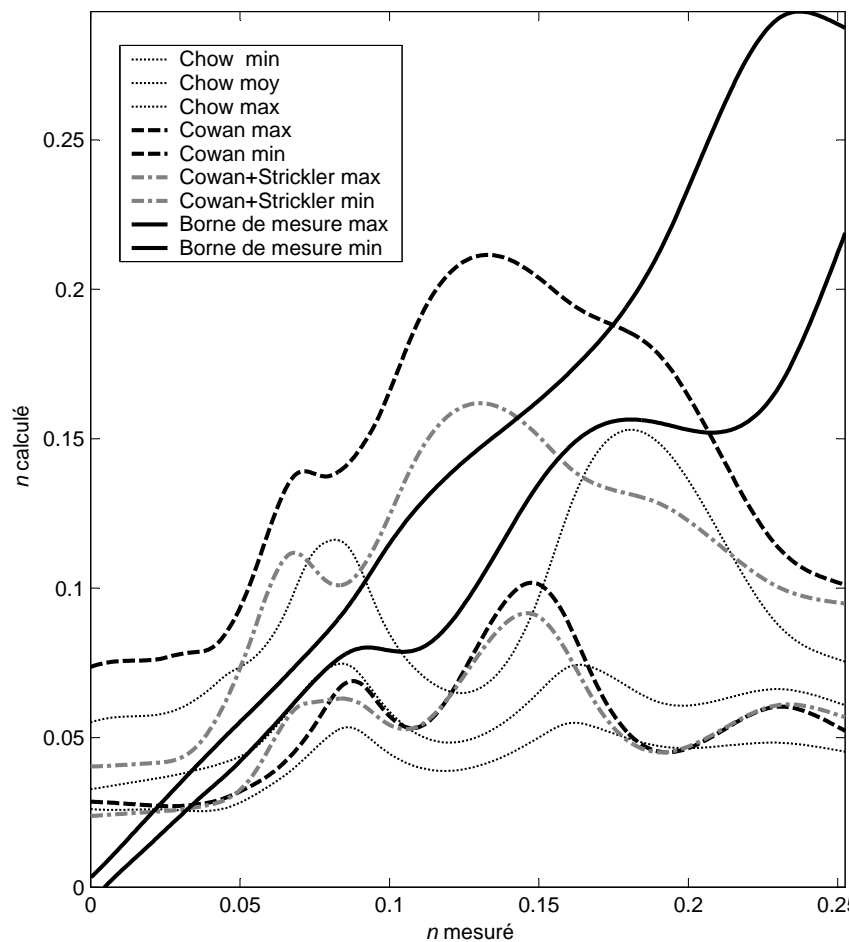


FIG. 3.2 – Comparaison des valeurs du coefficient  $n$  de Manning mesurées par Barnes (1967) et Hicks et Mason (1998) aux valeurs calculées par 3 méthodes d'estimation a priori : typologie de rivière d'après Chow (1973), formule de Cowan (1956) et formule de Cowan couplée avec la formule de Strickler pour l'estimation de la valeur de base  $n_b$ . Les courbes représentées ici ont été fortement lissées par l'intermédiaire de fonctions spline, afin de s'affranchir des importantes fluctuations des valeurs brutes obtenues. À ce titre, elles ne peuvent donc fournir que des indications d'ordre semi-quantitatif.

### Représentativité de cette analyse

Les conclusions énoncées ci-dessus ont été tirées d'une analyse que l'on peut considérer comme fiable du point de vue de la représentativité des données, en utilisant l'échantillon important des mesures récoltées par Barnes, Hicks et Mason. En revanche, on peut se poser la question d'un éventuel biais lié à l'utilisation somme toute considérablement *subjective* des méthodes présentées. En effet, nous donnons ici les résultats obtenus par *un seul* modélisateur. Or, l'implémentation de l'une ou l'autre de ces méthodes dans un système d'assistance au calage doit s'affranchir d'un éventuel biais de ce type.

Nous avons pour cela comparé nos résultats avec une étude statistique d'estimation *a priori* du coefficient  $n$  de Manning réalisé par Burnham et Davis (1986) pour le compte de la *Federal Highway Administration*. 77 ingénieurs expérimentés ont fourni une estimation des valeurs de ce coefficient pour 10 sites très différents, à partir de photographies et de descriptions de ces sites, mais aussi à l'aide des méthodes de référence disponibles dans l'ouvrage de Chow (1973), c'est-à-dire les méthodes mises en œuvre dans notre analyse. Les résultats de cette étude suggèrent que les valeurs estimées du coefficient  $n$  pour un site donné sont distribuées selon une loi log-normale<sup>35</sup> :

$$\ln(n) \sim \mathcal{N}(\ln(n_0) ; 0,582 + 0,10 \ln(n_0)) \quad (3.13)$$

où  $n_0$  valeur du coefficient pour un site donné.

La figure 3.3 compare l'intervalle à 90 % de cette loi avec les intervalles maximums obtenus en combinant les trois méthodes que nous avons mises en œuvre dans notre analyse. On constate que l'intervalle « théorique » encadre de manière satisfaisante nos estimations personnelles, tout du moins pour les valeurs les plus courantes du coefficient  $n$  de Manning. Cette confrontation nous permet d'affirmer que s'il existe indéniablement, le biais lié à la subjectivité de notre analyse ne se ressent pas véritablement dans les résultats obtenus.

#### 3.1.6 Vers une procédure d'initialisation d'un paramètre

L'analyse effectuée dans la section précédente nous permet, après avoir passé en revue les quelques procédures existantes, de mettre en place une méthodologie adaptée au cas particulier de l'initialisation d'un paramètre de modèle numérique.

#### Procédures existantes

Aldridge et Garrett (1973) ont proposé une procédure d'estimation du coefficient  $n$  de Manning pour des lits mineurs composites de cours d'eau, basée sur la formule de Cowan. Arcement et Schneider (1984) ont étendu cette procédure aux rivières composées d'un lit mineur et d'une plaine d'inondation. Cette procédure permet d'estimer une valeur du coefficient  $n$  de Manning pour chaque lit. Jarrett (1985) et Coon (1995) ont compilé les différentes méthodes disponibles – formule de Cowan généralisée par

35. Plusieurs autres études ont utilisé une distribution du coefficient  $n$  de Manning supposée *a priori* comme normale (Cesare, 1991), triangulaire (Yeh et Tung, 1993) et même uniforme (Tyagi et Haan, 2001). Une synthèse de plusieurs de ces travaux est proposée par Johnson (1996). On peut aussi noter une analyse détaillée de Mays et Tung (1992, chap. 5).

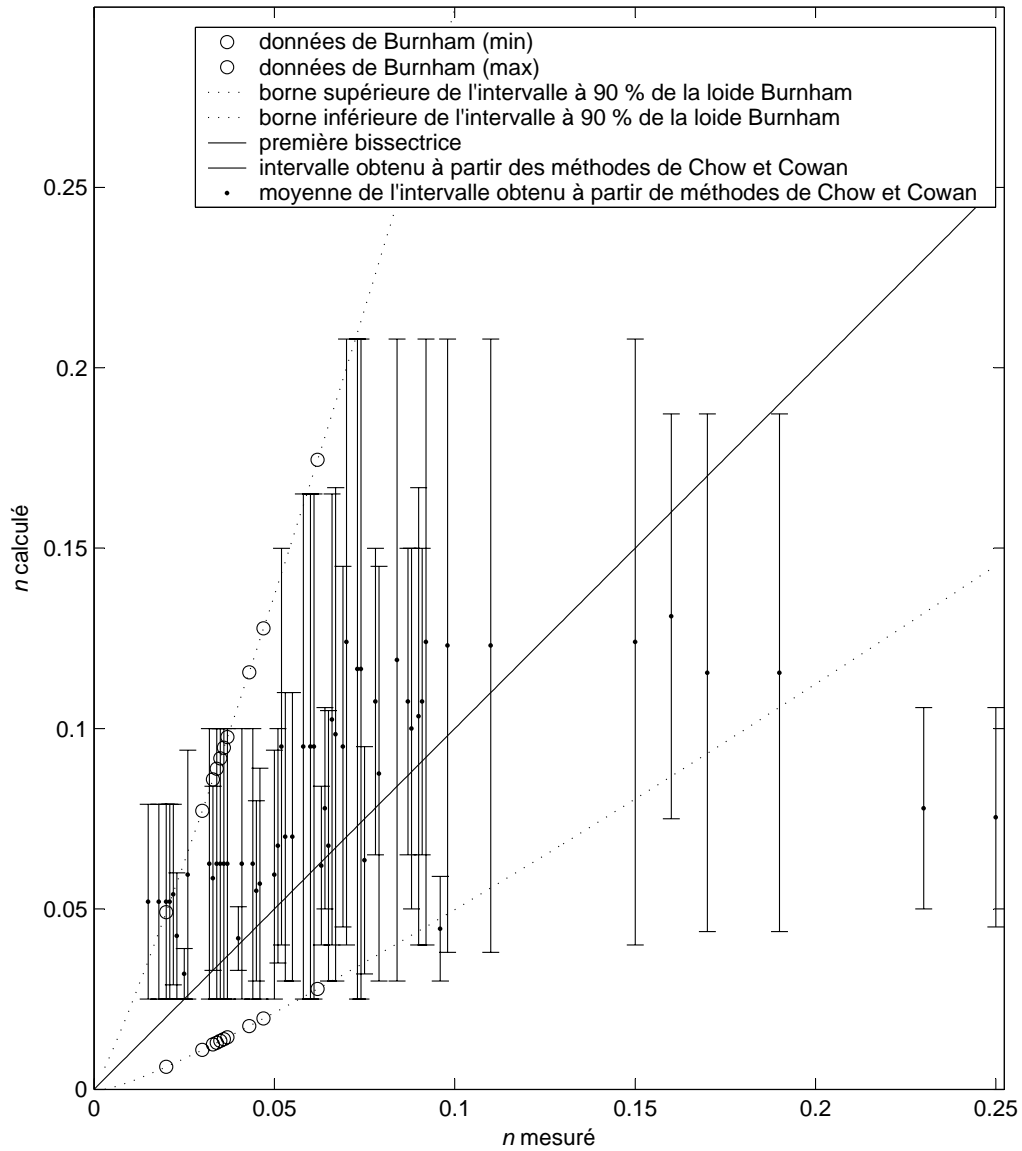


FIG. 3.3 – Comparaison des intervalles obtenus par les méthodes mises en œuvre dans notre analyse avec l'intervalle à 90% de la distribution empirique déterminée par Burnham et Davis (1986). Les intervalles présentés sur cette figure sont construits à partir des extrêmes des intervalles obtenus par les trois méthodes mises en œuvre.

Arcement et Schneider, comparaison à des photographies, tables de valeurs et équations – pour aboutir à une procédure générique d'estimation du coefficient  $n$  pour des rivières naturelles.

Marsh *et al.* (2004) ont récemment compilé des données sur de nombreux sites d'étude, majoritairement aux États-Unis. Soong *et al.* (2004) ont réalisé à partir de ces données un site internet<sup>36</sup> qui permet, via une interface java :

- de consulter pour différents sites les mesures hydrauliques effectuées à plusieurs débits et de visualiser les photos des cours d'eau concernés pour un intervalle donné de valeurs du coefficient  $n$  de Manning ou bien pour une région donnée ;
- de calculer le coefficient  $n$  de Manning à partir d'équations théoriques, notamment celles décrites dans la section 3.1.4, mais aussi à partir de la formule de Cowan à l'aide des tables reproduites en annexe D.1<sup>37</sup> ;
- de visualiser les données – photos incluses – correspondant à des sites correspondant à une valeur précise de  $n$ .

### Notre proposition

L'analyse des différentes méthodes disponibles a permis d'effectuer des choix décisifs pour leur insertion dans une méthodologie d'estimation d'une valeur. Celle-ci est présentée dans la figure 3.4. Cette procédure est adaptée à des cours d'eau hétérogènes et composés comme les cours d'eau naturels, et consacrée à l'initialisation du coefficient  $n$  de Manning dans le cas où celui-ci est un paramètre d'un modèle numérique.

## 3.2 Méthodes d'ajustement des paramètres

Une estimation des valeurs des paramètres d'un modèle numérique par les méthodes répertoriées dans la section 3.1 peut ne pas s'avérer suffisant selon les objectifs de la modélisation. Le modélisateur peut ainsi avoir recours à un ajustement des valeurs de ces paramètres. Dans les sections suivantes sont présentés les principes généraux d'un tel ajustement, ainsi que les deux grandes méthodes – ou familles de méthodes – utilisées actuellement pour réaliser celui-ci. Deux autres approches émergentes en hydroinformatique sont ensuite évoquées.

### 3.2.1 Principes fondamentaux

Les méthodes d'ajustement des valeurs des paramètres d'un modèle numérique reposent sur deux principes fondamentaux :

- *l'utilisation de données de référence* permet de confronter le modèle obtenu à partir des valeurs estimées des paramètres avec le système physique modélisé. Plus précisément, cette confrontation entre *résultats de simulation* et *données de référence* permet de déterminer si le *niveau de correspondance attendu* – tel que défini dans le référentiel de Refsgaard et Henriksen (section 1.2.2, p. 7) – est atteint ou non ;
- *la mise en œuvre d'un processus itératif* permet, si cette condition n'est pas remplie, de modifier les valeurs des paramètres en conséquence. Une nouvelle simulation est lancée avec les valeurs modifiées et les résultats sont à nouveau confrontés aux données de référence.

---

36. [il.water.usgs.gov/proj/nvalues/nvalues.html](http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/nvalues.html)

37. Ce calcul peut seulement être effectué pour le coefficient de résistance du lit mineur.

1. Déterminer un intervalle de variation et une valeur initiale pour le coefficient de résistance du lit mineur en fonction de la nature du cours d'eau considéré :
  - *Si le cours d'eau est un canal bâti ou revêtu*, utiliser la typologie correspondante de Chow (1973) (tableau D.11) pour déterminer un intervalle de variation. Si elle existe dans le tableau, la valeur moyenne correspondante constituera la valeur initiale du paramètre. Dans le cas contraire on prendra le centre de l'intervalle. Lorsqu'une valeur maximum est absente du tableau, on la prendra égale à 2 fois la valeur moyenne.
  - *Si le cours d'eau est un canal creusé ou dragué*, utiliser la typologie correspondante de Chow (1973) (tableau D.10) pour déterminer un intervalle de variation. La valeur moyenne correspondante constituera la valeur initiale du paramètre. Dans le cas contraire on prendra le tiers inférieur de l'intervalle.
  - *Si le cours d'eau est une rivière naturelle offrant visiblement une très forte résistance à l'écoulement* (végétation très importante et/ou beaucoup de rochers apparents) :
    - (a) Déterminer une valeur de base à partir de la formule de Strickler (équation 3.4) si l'on dispose de données granulométriques, sinon à partir du tableau D.1.
    - (b) Déterminer les facteurs d'ajustement à partir des tableaux D.3 à D.2.
    - (c) Appliquer l'équation de Cowan (équation 3.1) pour déterminer un intervalle de variation. Le tiers inférieur de cet intervalle constituera la valeur initiale du paramètre.
  - Enfin, *si le cours d'eau est une rivière naturelle de faciès commun*, utiliser la typologie de rivières de Chow (1973) et déterminer un intervalle de variation à partir du tableau D.12. Si elle existe dans le tableau, La valeur moyenne correspondante constituera la valeur initiale du paramètre. Dans le cas contraire on prendra le tiers inférieur de l'intervalle.
2. Vérifier que les valeurs obtenues sont cohérentes avec les catalogues de tronçons de référence correspondant à la nature du cours d'eau :
  - *Si le cours d'eau est un canal bâti ou revêtu*, comparer au catalogue proposé par Chow (1973), d'après Scobey (1933).
  - *Si le cours d'eau est un canal creusé ou dragué*, comparer au catalogue proposé par Fasken (1963), d'après Ramser (1929), et éventuellement par Scobey (1939).
  - *Si le cours d'eau est une rivière naturelle*, comparer aux catalogues proposés par Hicks et Mason (1998) Barnes (1967), et éventuellement par Coon (1998) ou Aldridge et Garrett (1973).
3. Déterminer un intervalle de variation et une valeur initiale pour le coefficient de résistance du lit majeur par l'une au choix des méthodes suivantes :
  - Utiliser la typologie de plaines d'inondation de Chow (1973) et déterminer un intervalle de variation à partir du tableau D.13. On prendra comme valeur initiale du paramètre la valeur moyenne donnée par le tableau.
  - Utiliser la méthode de Cowan modifiée pour les plaines d'inondation :
    - (a) Déterminer une valeur de base à partir du tableau D.1.
    - (b) Déterminer les facteurs d'ajustement à partir des tableaux D.7 à D.9.
    - (c) Appliquer l'équation 3.2 pour déterminer un intervalle de variation. Le tiers inférieur de cet intervalle constituera la valeur initiale du paramètre.
4. Vérifier que les valeurs obtenues sont cohérentes avec les catalogues de tronçons de référence proposés par Arcement et Schneider (1984) et éventuellement par Aldridge et Garrett (1973).

FIG. 3.4 – Proposition d'une procédure d'estimation de valeurs du coefficient  $n$  de Manning pour un tronçon homogène du point de vue de la résistance à l'écoulement.

On entre ici véritablement dans le concept de *validation opérationnelle* défini dans la section 1.1.3. Il est important de noter que les méthodes d'estimation d'une valeur décrites dans la section 3.1 permettent d'initier le processus itératif au cœur des méthodes d'ajustement.

### 3.2.2 Méthode heuristique

La méthode *heuristique* – connue dans le monde anglo-saxon sous la dénomination *trial-and-error method* – est la méthode d'ajustement « manuel » des valeurs des paramètres. Elle est résumée par la procédure de la figure 3.5.

1. Estimer une valeur initiale des paramètres à l'aide des méthodes décrites dans la section 3.1.
2. Simuler numériquement au moins un événement passé.
3. Comparer visuellement sous forme de graphiques les résultats de simulation avec des données de référence de l'événement considéré.
4. Si le niveau de correspondance attendu n'est pas atteint, modifier les valeurs des paramètres en conséquence en utilisant des connaissances issues de l'expérience, et retourner au 2.

FIG. 3.5 – Méthode heuristique d'ajustement des paramètres.

Cette méthode est largement utilisée dans le milieu de l'ingénierie pour la mise au point de modèles hydrauliques. Elles présente cependant un inconvénient majeur : la dépendance vis-à-vis du niveau d'expertise du modélisateur. En effet, les points 3. et 4. reposent sur des connaissances en partie subjectives et mettent en œuvre des raisonnements éminemment qualitatifs : « La courbe passe à peu près au milieu des points. », « Le coefficient de Manning doit être légèrement augmenté. ». La conséquence est la *non-reproductibilité* de ce processus.

L'utilisation de cette méthode garantit pourtant – en fonction bien évidemment du niveau d'expertise du modélisateur – l'obtention d'un modèle numérique fiable dont les paramètres – et leurs valeurs – sont conformes aux processus physiques dont ils rendent compte. Si le niveau de correspondance attendu est conditionné par des impératifs extérieurs à l'étude – par exemple des seuils réglementaires ou des notions de crédibilité du travail –, le modélisateur peut être tenté de l'atteindre en passant outre les intervalles physiques de variations des paramètres. Dans ce cas, les événements considérés dans la phase de calage seront convenablement reproduits, mais rien ne garantit que le modèle est une image acceptable du système physique considéré. Le modèle ainsi obtenu peut alors s'avérer tout à fait insatisfaisant lorsqu'utilisé comme outil de prédiction.

Nous reviendrons bien entendu sur cette méthode dans la suite du document, puisqu'elle va faire l'objet d'une formalisation complète dans le chapitre 4.

### 3.2.3 Méthodes mathématiques

Afin de pallier les aléas de la subjectivité liées à la méthode heuristique, de nombreuses méthodes automatiques ont été développées au cours des dernières décennies. Ces approches font intervenir une procédure mathématique d'optimisation et sont qualifiées dans la littérature de *problèmes inverses*<sup>38</sup>, par opposition au problème direct

38. On peut noter que cette dénomination est plus restrictive dans ce contexte précis que la définition donnée dans la section 1.2.3.

qu'est l'utilisation prédictive de modèles hydrauliques. Ces méthodes mathématiques reposent sur trois composants principaux :

- *une fonction coût* représente de manière quantitative l'écart entre résultats de simulation et données de référence ;
- *un algorithme d'optimisation* permet de réduire la valeur de la fonction coût en modifiant les valeurs des paramètres ;
- *un test d'arrêt* permet de terminer le processus itératif.

Ces trois composants sont la plupart du temps réunis au sein d'un *code d'optimisation* qui permet de mettre en œuvre une telle méthode selon la procédure détaillée sur la figure 3.6.

1. Estimer une valeur initiale des paramètres à l'aide des méthodes décrites dans la section 3.1.
  2. Retenir un événement de référence.
  3. Utiliser le code d'optimisation qui :
    - (a) simule numériquement l'événement ;
    - (b) calcule la valeur de la fonction coût ;
    - (c) si le test d'arrêt n'est pas vérifié, modifie les valeurs des paramètres à l'aide de l'algorithme pour diminuer la valeur de la fonction coût et retourne au (a).

FIG. 3.6 – *Méthode mathématique d'ajustement des paramètres.*

Il faut noter que cette approche a aussi été utilisée pour ajuster les paramètres de modèles numériques basés sur des modèles conceptuels proches de celui considéré dans cette étude : modèles basés sur les équations de Saint-Venant en régime permanent (Hafez et El Kady, 2001) et modèles basés sur les équations de Muskingum-Cunge (Yoon et Padmanabhan, 1993; Das, 2004*a,b*; Samani et Shamsipour, 2004).

Les paragraphes suivants présentent la problématique du choix de chacun des trois composants des méthodes mathématiques.

### Choix de la fonction coût

La construction d'une fonction coût doit débiter par la détermination de la – ou des – variable à utiliser. Celle-ci dépend bien évidemment des données de référence dont on dispose, mais aussi du domaine d'application visé du modèle, comme rappelé par Green et Stephenson (1986) pour la comparaison d'hydrogrammes de crue :

*The criteria ultimately chosen should depend on the objective of the modelling exercise.*

En hydraulique fluviale, deux types de cas peuvent se présenter : la variable considérée est soit une fonction du temps –  $Q(t)$  ou plus rarement  $h(t)$  ou  $V(t)$  – soit une fonction de l'espace –  $h(x)$  ou plus rarement  $Q(x)$  ou  $V(x)$ . Nous allons seulement considérer dans cette section les deux cas les plus couramment rencontrés. Dans les paragraphes suivants, l'indice « o » indique une valeur observée et l'indice « c » une valeur calculée.  $p$  est le nombre de points d'observations.

### *Comparer des hydrogrammes*

Le cas où les données de référence sont sous la forme  $Q(t)$  correspond à la validation opérationnelle de modèles hydrologiques avec des données *externes*<sup>39</sup>. De nombreuses

39. Suivant la définition donnée dans la section 2.4.2, p. 44.



fonctions coût ont de fait été testées dans la littérature hydrologique pour comparer deux hydrogrammes. Diskin et Simon (1977) et surtout Green et Stephenson (1986) présentent un inventaire critique de ces différents critères. Parmi ceux-ci, on peut relever l'*efficience du modèle* proposé par Nash et Sutcliffe (1970) d'après une analogie statistique avec le coefficient de détermination ( $\bar{Q}_o$  représente la moyenne des débits observés) :

$$R^2 = \frac{\left( \sum_{i=1}^p (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2 \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^p (Q_o^i - Q_c^i)^2 \right)^2}{\left( \sum_{i=1}^p (Q_o^i - \bar{Q}_o)^2 \right)^2} \quad (3.14)$$

La société HR WALLINGFORD a lancé il y a 10 ans de cela une étude sur l'optimisation en hydraulique fluviale, et notamment sur les fonctions coût à utiliser. L'utilisation d'une fonction alambiquée – que nous ne reproduirons pas ici – a ainsi été préconisée pour tenir compte du décalage temporaire éventuel des hydrogrammes (Morris et Anastasiadou-Partheniou, 1994; Lavedrine et Anastasiadou-Partheniou, 1995). Anastasiadou-Partheniou et Samuels (1998) ont finalement mis en œuvre la fonction suivante :

$$J = \frac{1}{p-2} \sum_{i=2}^{p-1} \left[ 1 - [\min(0, K_i)]^4 \right] (Q_o^i - Q_c^i)^2 \quad (3.15)$$

où :

$$K_i = \frac{\frac{Q_o^{i+1} - 2Q_o^i + Q_o^{i-1}}{(\Delta t)^2}}{\left[ 1 + \left( \frac{Q_o^{i+1} - Q_o^{i-1}}{2\Delta t} \right) \right]^{3/2}}$$

#### Comparer des lignes d'eau

Le deuxième cas correspond à l'utilisation de données *internes* au domaine modélisé : soit des niveaux d'eau mesurés le long du cours d'eau à des instants précis, soit des laisses de crue. Des fonctions coût différentes de celles utilisées en hydrologie sont donc à déterminer. Deux fonctions transparaissent de la littérature : le critère des moindres carrés et le critère *minimax*.

Le critère des moindres carrés est le plus couramment utilisé dans ce cas de figure :

$$J = \sum_{i=1}^p (h_c^i - h_o^i)^2 \quad (3.16)$$

Ce critère représente un écart *moyen* entre valeurs observées et calculées. À ce titre, ce critère n'est pas très sensible aux points aberrants ou *horsains* dès lors que le nombre total de points est suffisant. De nombreuses variantes de ce critère ont été employées en hydraulique fluviale :

- normalisé, soit par les valeurs observées (Ramesh *et al.*, 2000), soit par leur moyenne temporelle (Bennett, 1975) ;

- à plusieurs variables (Becker et Yeh, 1972, 1973) ;
- distribué dans l'espace (Davidson *et al.*, 1978) ;
- continu dans le temps (Atanov *et al.*, 1999).

Le deuxième critère le plus utilisé, appelé *minimax*, porte sur le maximum des écarts entre valeurs observées et calculées :

$$J = \max_{i \in [1;p]} |h_c^i - h_o^i| \quad (3.17)$$

Ce critère est parfaitement adapté à des situations où existe une contrainte réglementaire portant sur l'écart maximum autorisé entre niveaux d'eau observés et niveaux d'eau calculés par le modèle. Des variantes adimensionnalisées de ce critère ont aussi été utilisées dans la littérature (voir par exemple Wormleaton et Karmegam, 1980).

### *Commentaires*

Le choix d'une fonction coût s'avère extrêmement difficile, car il dépend à la fois des données de référence considérées, mais aussi du domaine d'application visé. Si l'on suit le raisonnement de Green et Stephenson (1986), il faudrait avoir recours à plusieurs critères pour s'assurer de la crédibilité de résultats de simulation :

*No single statistical goodness-of-fit criterion is sufficient to assess adequately for all purposes the fit between a computed and an observed hydrograph.*

Quoiqu'il en soit, il importe de confronter visuellement le résultat final aux données de référence, comme le rappellent Green et Stephenson :

*Visual comparison of simulated and observed hydrograph provides a quick and often comprehensive means of assessing the accuracy of model output.*

De nombreuses études ont porté sur l'optimisation conjointe de paramètres hydrauliques – le coefficient  $n$  de Manning – et de « paramètres » géométriques (Wormleaton et Karmegam, 1980, 1984; Abida et Townsend, 1992; Atanov *et al.*, 1999). Ces études considèrent ainsi des cours d'eau à section trapézoïdale paramétrée par la largeur au fond et le fruit des berges. D'autres études considèrent l'optimisation de la géométrie seule (Rao *et al.*, 1976). Ces points de vue, vivement critiqués par Cunge (2003), ne peuvent être pris en compte dans la présente étude dans laquelle les données topographiques ne sont pas considérées comme des paramètres du modèle.

Le tableau 3.5 propose un récapitulatif des différentes études d'optimisation réalisées pour le calage en hydraulique fluviale unidimensionnelle. Ce tableau montre la rareté des études réalisées dans un contexte opérationnel, avec des données observées mesurées en quelques emplacements et lors de plusieurs événements.

### **Choix de l'algorithme d'optimisation**

Une fois approuvée la distance mathématique entre données de référence et résultats de simulation, il importe de choisir l'algorithme qui va permettre de minimiser cette fonction. Cette section vise à présenter la diversité des algorithmes utilisés pour le calage en hydraulique fluviale : algorithmes « classiques », mais aussi algorithmes génétiques et algorithmes d'assimilation de données comme le filtre de Kalman.

Références	Section en travers	Données de référence			Paramètres	Algorithme	Fonction coût	
		Nature	Type	Nombre <sup>(1)</sup>			Type	Nature
Becker et Yeh (1972, 1973)	trapézoïdale	–	simulées	–	$\alpha, \beta$ <sup>(2)</sup>	ICA <sup>(3)</sup>	moindres carrés	h et V
Yeh et Becker (1973)	trapézoïdale	–	simulées	–	$\alpha, \beta$ <sup>(2)</sup>	ICA <sup>(3)</sup>	minimax	h et V
Bennett (1975)	artificielle	h(t)	observées	2×4	C(Q)	ICA <sup>(3)</sup>	moindres carrés	h
		Q(t)	observées	2×4 <sup>(4)</sup>			Q	
Davidson <i>et al.</i> (1978)	naturelle	h(t)	observées	5×6	n(x)	LMA <sup>(5)</sup>	moindres carrés	h
Fread et Smith (1978)	trapézoïdale	h(t)	observées	1×1	n(Q)	NRA <sup>(6)</sup>	moindres carrés	h
Holz et Januszewski (1980)	naturelle	h(t)	observées	1×1	f	Powell	moindres carrés	h
Wallis et Knight (1984)	naturelle	h	observées	10×1	n(h)	gradient	valeur absolue	h
Lebossé (1991); Ben Slama et Lebossé (1991)	naturelle	$h_{\max}$	observées	12×1	$n_c, n_f$	gradient	moindres carrés	h
Kharibi <i>et al.</i> (1997)	trapézoïdale	–	simulées	–	n	?	moindres carrés	h
Anastasiadou-Partheniou et Sarmuels (1998)	trapézoïdale	–	simulées	–	$\alpha, \beta$ <sup>(2)</sup>	ICA <sup>(3)</sup>	diverses	h et/ou V
Ramesh <i>et al.</i> (2000)	trapézoïdale	–	simulées	–	n	SQP <sup>(7)</sup>	moindres carrés	h et/ou Q
Ding <i>et al.</i> (2004)	naturelle	h	observées	40×1	n	LMQN <sup>(8)</sup>	moindres carrés	h

TAB. 3.5 – *Récapitulatif des études réalisées selon une méthode automatique à l'aide d'algorithmes classiques.*

(1) Nombre d'emplacements par tronçon homogène × nombre d'événements.

(2) Coefficients de l'équation 2.14.

(3) *Influence Coefficient Algorithm*

(4) Emplacements différents des mesures de hauteur.

(5) *Levenberg-Marquardt Algorithm*(6) *Newton-Raphson Algorithm*(7) *Sequential Quadratic Programming*(8) *Limited-Memory Quasi-Newton*

### *Algorithmes classiques*

Les algorithmes mathématiques classiques ont largement été utilisés depuis le début des années 1970. Le choix de l'algorithme d'optimisation pour le calage en hydraulique fluviale a été discuté par Abida et Townsend (1992). Ils ont ainsi comparé l'algorithme de Powell<sup>45</sup>, l'algorithme de Rosenbrock (1960) et l'algorithme du *simplexe* de Nelder et Mead (1965). Ce dernier semble apporter la meilleure convergence vers le minimum de la fonction. On peut trouver dans le tableau 3.5 les différents algorithmes classiques utilisés dans les calages automatiques en hydraulique fluviale.

Il faut noter que tous les algorithmes présentés dans ce tableau réalisent une optimisation *locale* supposant un minimum unique de la fonction coût, hypothèse réfutée par le principe d'*équifinalité* dont nous reparlerons un peu plus loin. Nous expérimentons dans le chapitre 7 un algorithme de *recuit simulé* qui permet de réaliser une optimisation globale permettant de s'affranchir de cette hypothèse.

### *Algorithmes génétiques*

Plus récemment, quelques travaux ont porté sur l'utilisation d'algorithmes génétiques pour le calage de modèles hydrauliques, en rivière (Sanchez et Westphal, 1999; Chau, 2002) et en estuaire (Passone *et al.*, 2002).

### *Filtre de Kalman*

Le filtre de Kalman est un algorithme d'optimisation particulier qui réalise une régression linéaire incrémentale. Cette méthode a été utilisée par Chiu et Isu (1978) pour caler un modèle hydraulique d'estuaire. Crissman *et al.* (1993) ont repris cet algorithme pour réaliser un calage opérationnel d'un modèle d'hydraulique fluviale en régime transitoire. Cet aspect a été repris récemment par Hartnack et Madsen (2001).

## Choix du test d'arrêt

Troisième choix à effectuer lors d'une approche automatique, celui du test d'arrêt. Ce test va déterminer le moment où le jeu de paramètres est considéré comme satisfaisant. Il peut porter sur des éléments très différents :

- *la valeur de la fonction coût* est un test parfaitement adapté lorsque le niveau de correspondance attendu est représenté par une valeur seuil, par exemple un écart maximal sur les hauteurs d'eau de  $\pm 10$  cm. Le choix d'un tel test est donc intimement lié à celui de la fonction coût ;
- *le gain pendant les dernières simulations* est un test permettant de s'assurer de la convergence de l'algorithme vers le minimum de la fonction coût ;
- *le nombre de simulations effectuées* peut enfin être un critère lorsque des contraintes de temps de calcul sont à respecter.

Le choix de ce test d'arrêt est donc un choix primordial dans une approche automatique, et les résultats de l'optimisation vont en dépendre fortement, tout comme ils vont dépendre du choix de la fonction coût.

45. POWELL, M. J. D. (1970), A new algorithm for unconstrained optimization. Dans : *Nonlinear Programming* (J. B. Rosen, O. L. Mangasarian et K. Ritter, eds.), Academic Press, New-York.

### Équifinalité

On ne peut évoquer les méthodes d'optimisation sans discuter des problèmes d'*équifinalité*. Ce terme, issu de la théorie générale des systèmes, est défini comme suit par von Bertalanffy (1993, p. 44) :

[Dans les systèmes ouverts] le même état final peut être atteint à partir de conditions initiales différentes ou par des chemins différents.

La deuxième partie de cette définition nous intéresse particulièrement dans la problématique du calage de modèles hydrauliques. En effet, ce principe est applicable aux systèmes ouverts – c'est-à-dire à des systèmes non isolés de leur environnement – dont les tronçons de rivières considérés en hydraulique fluviale font naturellement partie. D'autre part, ce principe indique que les réponses de tels systèmes ne sont pas définies de manière unique et peuvent être obtenues à partir de structures de modèle différentes. Cette particularité a été reprise dans le domaine de l'hydrologie par Beven (1993) :

*Equifinality, is [...] an expectation that the same end, in this case an acceptable model prediction, might be achieved in many different ways, i.e. different model structures or parameter sets.*

Les méthodes de calage par optimisation sont directement soumises à ce principe d'équifinalité qui prévoit que plusieurs – ou même une infinité de – jeux de paramètres peuvent conduire chacun à un minimum local – ou global – de la fonction coût (Aronica *et al.*, 1998b) :

*Given that flood models are highly non-linear, we can expect to obtain the same or very similar values of the objective function for different parameter sets (non-uniqueness of the solution of the inverse problem), or different inflow series (for different flood events) can give a different goodness of fit for the same parameter sets.*

On peut voir au travers de ces quelques exemples que ce principe d'équifinalité est susceptible d'être profondément pénalisant pour les méthodes mathématiques d'ajustement.

### Où la subjectivité refait surface

Les méthodes mathématiques décrites dans les paragraphes précédents ne permettent pas, contrairement à leur affirmation initiale, de réaliser un calage de manière totalement objective. En effet, de nombreuses étapes de ce processus doivent être accompagnées d'une expertise permettant de :

- sélectionner l'événement de référence ;
- sélectionner les données de références pour la fonction objectif ;
- déterminer la nature et le nombre des paramètres à ajuster ;
- fournir des intervalles de valeurs physiquement acceptables pour les paramètres ;
- vérifier les résultats de l'optimisation selon des considérations physiques.

### 3.2.4 Position de nos travaux, entre heuristique et automatique

Le tableau 3.6 présente une comparaison synthétique des méthodes décrites dans les sections précédentes.

	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
Méthode heuristique	fiabilité	difficulté
Méthode automatique	reproductibilité	équifinalité

TAB. 3.6 – *Comparaison synthétique des méthodes d’ajustement.*

Ce tableau, s’il ne livre que des raccourcis d’analyse, permet de situer l’enjeu de nos travaux. La réalisation d’un système d’assistance au calage doit permettre de regrouper les bénéfices apportés par chacune des deux approches tout en s’affranchissant autant que faire se peut de leurs défauts.

*L’approche adoptée dans ces travaux consiste ainsi à formaliser la méthode heuristique – et donc tout ce qui fait sa fiabilité – de façon à automatiser le processus de calage et en assurer la reproductibilité.*

### 3.3 Autres approches

Notre revue des pratiques actuelles de calage serait incomplète si nous n’évoquions deux approches émergentes dans le domaine de l’hydraulique fluviale : l’approche statistique – ou probabiliste – et la dérivation de code.

#### 3.3.1 Approches statistiques

Ces approches se basent sur des techniques de Monte-Carlo, qui consistent à analyser de manière statistique les résultats de simulations correspondant à un échantillon – extrait de manière aléatoire ou systématique – de l’espace de paramètres. La méthodologie GLUE (*Generalized Likelihood for Uncertainty Estimation*), développée initialement par Beven et Binley (1992), a ainsi été mise en œuvre à plusieurs reprises pour le calage de modèles hydrauliques. Même si la plupart des modèles calés sont bidimensionnels, cette méthodologie est aisément transposable en hydraulique unidimensionnelle. L’application de cette méthodologie fournit une cartographie de la vraisemblance dans l’espace des paramètres et par suite dans l’espace des résultats, dont la nature dépend des données de références disponibles : hauteurs d’eau (Aronica *et al.*, 1998b), largeurs au miroir (Romanowicz *et al.*, 1996; Romanowicz et Beven, 2003) et cartes d’inondation (Aronica *et al.*, 2002; Bates *et al.*, 2004).

Nous n’utiliserons pas dans nos travaux ces approches probabilistes – au demeurant fort intéressantes – puisqu’elles ne mettent en jeu, outre des théories statistiques et notamment bayésienne, aucune *connaissance experte* supplémentaire par rapport aux méthodes automatiques précédemment évoquées. En fait, les approches statistiques nécessitent quasiment la même expertise complémentaire que les méthodes mathématiques : sélection des données de référence, détermination du nombre de paramètres, détermination d’une intervalle de variation *a priori*, vérification des résultats, etc.<sup>46</sup>

46. Aronica *et al.* (1998b) nous donnent un exemple de cette expertise particulière utilisée lors d’une approche statistique, en considérant que les coefficients de la plaine d’inondation sont supérieurs à ceux du lit mineur :

*The modeller might wish to use a truncated range of parameter values in order to assert some a priori knowledge about the physical situation in the field.*

### 3.3.2 Dérivation automatique du code de calcul

Cette dernière approche pour le calage de modèles hydrauliques consiste à construire – de manière plus ou moins automatique<sup>47</sup> – le code inverse du code de calcul. Ce code inverse est ainsi destiné à produire les *intrants* du code de calcul à partir de ses *extrants*<sup>48</sup>. Une thèse a été soutenue récemment sur la question (Mazauric, 2003) et des recherches se poursuivent actuellement entre le Laboratoire de Modélisation et Calcul<sup>49</sup>, l’Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse<sup>50</sup> et le CEMAGREF (Castaings *et al.*, 2005).

Cette approche nécessite d’entrer dans la structure même du code de calcul, ce qui ne correspond pas à notre vision systémique de la modélisation présentée dans le chapitre 1. Nous ne retiendrons donc pas cette approche dans nos travaux, même si les premiers résultats obtenus par les recherches récentes semblent prometteurs.

## 3.4 Conclusions

Nous avons présenté et analysé dans ce troisième chapitre les différentes approches employées actuellement pour réaliser le calage d’un modèle hydraulique. Nous avons retenu deux démarches distinctes pratiquées par le modélisateur : celui-ci peut soit seulement estimer une valeur *a priori* des paramètres, soit ajuster cette valeur en comparant les résultats d’une simulation avec des données de référence, par une méthode itérative heuristique ou bien automatique.

Nous avons proposé une procédure générique d’estimation d’une valeur *a priori* du coefficient  $n$  de Manning pour différents types de cours d’eau sur la base d’une analyse des méthodes disponibles dans la littérature. Nous avons ensuite positionné notre approche par rapport aux deux principales méthodes d’ajustement des paramètres. Notre démarche consiste ainsi à *formaliser la méthode heuristique* – i.e. la méthode « manuelle » mise en œuvre par l’expert – au sein d’un système d’assistance au calage pour *automatiser le processus de calage* – comme dans les méthodes mathématiques – de façon à en assurer à la fois la *fiabilité* et la *reproductibilité*.

Cette approche, qui s’inscrit dans une démarche d’assurance qualité pour les pratiques actuelles, nous a ainsi permis de dégager la structure générale du processus de calage, représentant la base des *connaissances procédurales* que nous allons développer et formaliser dans le chapitre suivant.

---

47. Le projet TROPICS de l’INRIA Sophia-Antipolis développe depuis quelques années un outil de dérivation automatique appelé TAPENADE (téléchargeable depuis [www-sop.inria.fr/tropics](http://www-sop.inria.fr/tropics)).

48. Voir figure 1.3, p. 9.

49. [www-lmc.imag.fr](http://www-lmc.imag.fr)

50. [www.imft.fr](http://www.imft.fr)

## Deuxième partie

# Développement d'un système d'assistance au calage





## Chapitre 4

# Modélisation des connaissances

« *An equation does not know whether its variables represent anything real at all and it cannot be made responsible for 'predicting' a nonsense, which it sometimes may.* »

Vít KLEMEŠ<sup>1</sup>

LA PREMIÈRE PARTIE de ce mémoire visait à présenter un inventaire des différentes connaissances mises en œuvre par le modélisateur au cours de la tâche de calage. Les chapitres 1 à 3 ont ainsi permis d'aborder des connaissances multiples et diverses sur cette tâche. Le présent chapitre va s'attacher à regrouper de manière homogène et cohérente ces connaissances et à en proposer une formalisation<sup>2</sup>. La formalisation des connaissances permettra ensuite leur *implémentation* dans un système d'assistance au calage dont le développement sera présenté dans le chapitre suivant. Cette formalisation des connaissances a fait l'objet d'une communication à la 7<sup>e</sup> conférence internationale KES'2003 (*International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems*) (Vidal *et al.*, 2003) et d'une communication aux 15<sup>e</sup> journées francophones d'Ingénierie des Connaissances (Vidal et Moisan, 2004).

### 4.1 Processus d'ingénierie des connaissances

Pour reprendre la définition de Charlet *et al.* (2000a, p. 2), l'*ingénierie des connaissances*<sup>3</sup> correspond à l'« étude des concepts, méthodes et techniques permettant de modéliser et/ou d'acquérir les connaissances pour des systèmes réalisant ou aidant des humains à réaliser des tâches se formalisant *a priori* peu ou pas ». Nous nous sommes donc

---

1. Vít KLEMEŠ (2000), Of carts and horses in hydrological modelling. Dans : *Common sense and Other Heresies – Selected Papers on Hydrology and Water Resources Engineering* (C. D. Sellars, éd.), chap. 2.1, p. 53–68, Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ontario.

2. Nous nous intéresserons ici uniquement à la tâche de calage telle que définie dans le chapitre 1 (figure 1.7, p. 19). La tâche de *calage du modèle* se positionne suivant cette définition à la suite du *recueil des données* et de la *préparation du modèle* et présuppose donc l'existence d'un modèle numérique.

3. Pour un état de l'art assez récent de cette jeune discipline, le lecteur intéressé pourra consulter l'ouvrage collectif édité par Charlet *et al.* (2000b).

engagés dans un processus d'ingénierie des connaissances pour parvenir à une *modélisation* des connaissances présentées dans la partie I. Tout au long de ce chapitre, l'emploi du terme « modélisation » fera référence à ce processus d'ingénierie des connaissances.

#### 4.1.1 Sources de connaissances

Les connaissances modélisées ont tout d'abord été extraites de différentes sources en gardant à l'esprit l'objectif de l'étude, c'est-à-dire la réalisation d'un système d'assistance au calage :

- un *corpus bibliographique* important, comprenant des ouvrages de référence, des rapports techniques et des articles de recherche, a été parcouru et analysé, pour aboutir notamment à la synthèse présentée dans les chapitres 2 et 3 ;
- des *entretiens informels avec des experts* en modélisation hydraulique ont permis de s'assurer de l'adéquation des connaissances identifiées à partir du corpus bibliographique avec la réalité pratique et les conditions opérationnelles. Ces experts de l'unité d'accueil (Unité de Recherche Hydrologie-Hydraulique du CEMAGREF) et du groupe Hydrodynamique et Environnement de l'IMFT peuvent être classés en différentes catégories : des développeurs de code de calcul, des utilisateurs de modèles hydrauliques – ici systématiquement modélisateurs eux-mêmes – et des modélisateurs d'autres domaines, notamment l'hydraulique fluviale bidimensionnelle, l'hydraulique souterraine et l'hydrologie.
- l'*expérience personnelle* de construction de modèles hydrauliques a enfin permis d'effectuer des choix importants lors de cette modélisation des connaissances.

L'extrême variété des connaissances extraites nécessite leur structuration préalable à une quelconque formalisation. Notre approche s'est effectuée au travers d'une double classification des connaissances : d'une part d'un point de vue taxinomique, relatif à leur nature, leur type, et d'autre part suivant leur niveau de généralité.

#### 4.1.2 Différents types de connaissances

Les connaissances que nous considérons dans cette modélisation – et qui sont destinées à être intégrées à un système hydroinformatique – sont entendues dans une approche rationnelle, comme le rappelle Amdisen (1994) :

*The knowledge which can be encapsulated in hydroinformatics systems can only be knowledge which represents rational reasoning skills.*

Parmi ces connaissances, Chau *et al.* (2002b) distinguent les trois types suivants : connaissances descriptives (*descriptive knowledge*), connaissances procédurales (*procedural knowledge*), et connaissances de raisonnement (*reasoning knowledge*). Nous avons repris cette typologie en précisant la signification de ces trois catégories :

- les connaissances *descriptives* font référence aux objets – concrets, mais aussi de nature plus conceptuelle – manipulés durant la tâche de calage, c'est-à-dire les éléments décrits dans le chapitre 2 ;
- les connaissances *procédurales* concernent la structure de la tâche en terme de définition et d'enchaînement des sous-tâches. Les procédures d'estimation d'une valeur des paramètres et d'ajustement de ces paramètres décrites dans le chapitre 3 en constituent deux bons exemples ;

- Les connaissances *de raisonnement* représentent quant à elles les heuristiques utilisées pour la réalisation de ces sous-tâches. Nous nous restreindrons dans cette étude aux raisonnements par déduction pure<sup>4</sup>, qui peuvent être représentés par des *règles de production* – suivant le terme consacré en intelligence artificielle – de la forme présentée sur la figure 4.1.

si conditions alors actions

FIG. 4.1 – Règle de production. La lecture doit en être la suivante : les actions définies dans la deuxième partie de la règle sont exécutées dans la situation où les conditions de la première partie sont vérifiées.

Les connaissances procédurales et les connaissances de raisonnement peuvent être regroupées sous le terme de connaissances *inférentielles*. En effet, elles permettent de créer, d'*inférer* de nouvelles connaissances à partir des connaissances descriptives. C'est cette distinction entre connaissances descriptives et inférentielles que nous allons adopter dans la suite de ce chapitre pour décrire notre modélisation.

#### 4.1.3 Différents niveaux de connaissances

Sur la base des travaux de Foucault (1990, p. 86-91), Amdisen (1994) distingue trois catégories de connaissances mises en œuvre pour la modélisation en hydroinformatique : les connaissances de raisonnement indépendantes du domaine (*domain independent reasoning knowledge*), les connaissances de raisonnement spécifiques au domaine (*domain specific reasoning knowledge*) et les connaissances factuelles (*factual knowledge*), c'est-à-dire liées au système particulier étudié<sup>5</sup>. Cette classification nous a servi de base pour établir *quatre* niveaux de connaissances représentés sur la figure 4.2.

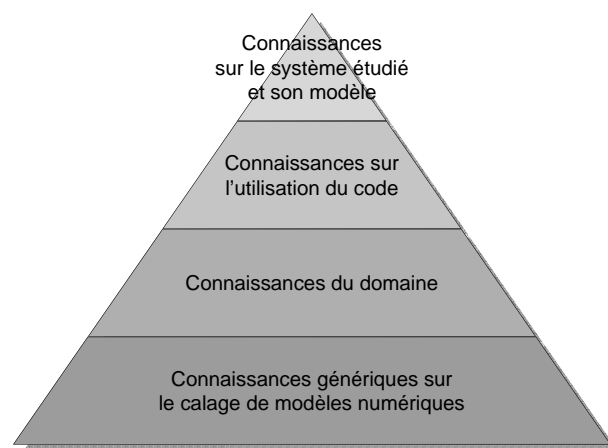


FIG. 4.2 – Pyramide des niveaux de connaissances.

4. Amdisen (1994) prévoit que seuls les raisonnements par déduction – et non par induction ou abduction – peuvent être implémentés dans un système hydroinformatique.

5. Les connaissances factuelles sont identifiées à la *taxonomia* de Foucault, les connaissances de raisonnement indépendantes du domaine à la *mathesis*, et les connaissances de raisonnement spécifiques au domaine à la *genesis*. La référence aux notions de *mathesis* et de *taxonomia* développées par Foucault (1990) avait déjà été utilisée par Abbott (1993).

Les *connaissances génériques* sur le calage de modèle sont un sous-ensemble de la première catégorie identifiée par Amdisen. Ces connaissances sont indépendantes du domaine et englobent notamment la définition d'un modèle numérique, et la description de la tâche de calage de modèle. Nous entendons ici par domaine la discipline considérée : hydraulique fluviale 1D, hydrologie distribuée, etc. Les connaissances relatives à l'hydraulique fluviale 1D ont pour la plupart été recensées dans le chapitre 1.

Nous avons ensuite scindé la deuxième catégorie identifiée par Amdisen en deux niveaux, afin de pouvoir distinguer les connaissances indépendantes du code de calcul utilisé des connaissances spécifiques à l'utilisation de celui-ci.

Les *connaissances du domaine* sont à la fois spécifiques au domaine et indépendantes du code de calcul utilisé. Il est important de noter que seules les connaissances directement mises en œuvre *dans l'optique du calage de modèle numérique* sont prises en compte et formalisées en conséquence. Les chapitres 2 et 3 contiennent une grande partie des connaissances du domaine d'application dont nous proposons une formalisation.

Les *connaissances sur le code de calcul* relèvent de l'utilisation de ce code pour le calage de modèle. Elles portent sur le contenu sémantique – relatif au domaine – des entrées et des sorties du code, mais aussi des heuristiques associées à sa bonne exécution (détection des erreurs et actions conséquentes).

Enfin, les *connaissances sur le système étudié et son modèle* sont constituées des données et des informations recueillies sur le système particulier étudié et sur le modèle numérique que l'on se propose de caler.

## 4.2 Outils de formalisation

Cette section présente les outils utilisés pour formaliser l'ensemble des connaissances évoquées dans les paragraphes précédents. Cette formalisation s'est effectuée en grande partie de manière *graphique* au travers de diagrammes utilisant la notation UML (OMG, 2003, chap. 3), dont l'annexe B propose une introduction.

### 4.2.1 Diagrammes de classes UML

Le langage UML s'est imposé naturellement pour la représentation des connaissances descriptives, puisqu'il est actuellement devenu un standard pour la conception orientée objet de systèmes informatiques (Muller et Gaertner, 2000), standard maintenu par l'*Object Management Group*<sup>6</sup>. De plus, ce langage – et plus précisément ses diagrammes de classes<sup>7</sup> – est depuis peu utilisé pour représenter des connaissances sous forme d'*ontologies* (Cranefield et Purvis, 1999; Kogut *et al.*, 2002). Dans le domaine de l'intelligence artificielle, une ontologie est, pour reprendre la définition de Gruber (1993), la « spécification explicite d'une conceptualisation<sup>8</sup>. » On peut dire plus simplement qu'une ontologie est une description des concepts et de leurs liens au sein d'un domaine donné<sup>9</sup>.

Un diagramme de classes UML peut par ailleurs être accompagné d'un ou plusieurs diagrammes d'objets dans lesquels sont représentées des *instances* des classes. Une

6. [www.omg.org](http://www.omg.org)

7. Voir l'annexe B, p. 233.

8. Proposition de traduction pour « *An ontology is an explicit specification of a conceptualization.* »

9. Le *Grand Dictionnaire Terminologique* ([www.granddictionnaire.com](http://www.granddictionnaire.com)) donne la définition suivante dans le domaine de l'intelligence artificielle : « Ensemble d'informations dans lequel sont définis les concepts utilisés dans un langage donné et qui décrit les relations logiques qu'ils entretiennent entre eux. »

instance d'une classe représente un objet particulier appartenant à cette classe. Les diagrammes d'objet peuvent ainsi être utilisés pour formaliser les connaissances sur le système particulier étudié et son modèle, à partir des classes formalisant les connaissances descriptives des niveaux supérieurs<sup>10</sup>.

Le langage UML se trouve être parfaitement adapté à notre approche, puisqu'il permet à la fois de représenter des concepts d'un domaine – au travers notamment des diagrammes de classes – et de fournir des spécifications pour le système informatique à base de connaissances que nous cherchons à développer.

#### 4.2.2 Diagrammes d'activités UML

Les diagrammes de classes UML ayant été retenus pour représenter les connaissances descriptives, il restait à déterminer un formalisme pour représenter les connaissances inférentielles.

#### Premiers essais avec le langage CML

L'utilisation dans un premier temps du formalisme COMMONKADS (Schreiber *et al.*, 1999) pour représenter les sous-tâches du calage de modèle nous a été suggérée par les premiers travaux menés au LARIA par Bruaux (2001*a,b*, 2002) dans le cadre du projet CLACIC<sup>11</sup>.

La méthode COMMONKADS et le langage associé CML (*Conceptual Modeling Language*) intègrent des diagrammes d'inférence dans lequel sont représentés trois types d'éléments : des *inférences* représentant les différentes sous-tâches, des *rôles de connaissance statiques* et des *rôles de connaissance dynamiques*. Les rôles de connaissance statiques représentent les éléments qui demeurent inchangés au cours de la tâche considérée. Un exemple en est donné par le code de calcul qui ne subit aucune transformation durant ce processus. Les rôles de connaissance dynamiques sont quant à eux affectés par le processus décrit, comme le modèle numérique ou les résultats de simulation.

Ces outils nous ont permis d'initier une modélisation des connaissances inférentielles à travers la formalisation d'un premier niveau de décomposition de la tâche de calage. Cette première modélisation ne nous a pas paru satisfaisante pour des raisons de cohérence avec notre modélisation des connaissances descriptives. En effet, la formalisation de l'enchaînement opérationnel des différentes sous-tâches nécessite la représentation des objets utilisés et produits par chacune d'entre elles, qui appartiennent nécessairement aux classes d'éléments définis dans les diagrammes de classes UML. Or, le langage CML utilise des *rôles de connaissances* statiques et dynamiques pour représenter ces différents objets. La correspondance entre connaissances descriptives et connaissances inférentielles, qui devrait être clairement visible, est ainsi voilée par les rapports ambigus entre classes UML et rôles de connaissances CML.

#### Utilisation des diagrammes d'activités UML

Nous avons alors regardé de plus près les diagrammes d'activités proposés par le langage UML (voir annexe B, p. 234). Dans ce type de diagrammes, les tâches sont représentées par des *activités* qui correspondent de manière satisfaisante aux *inférences*

10. Nous n'avons pas eu recours ici à ce type de diagramme et les caractéristiques de nos différents cas d'étude ont été directement implémentés dans la base de connaissances du système d'assistance.

11. CaLAge de Codes Par Ingénierie des Connaissances ([www.clacic.org](http://www.clacic.org)).

du langage CML. De plus, les objets manipulés par les différentes activités sont représentés par des *instances anonymes* de classes. Ces instances anonymes représentent ainsi des objets – quelconques – appartenant à une classe définie par ailleurs dans un diagramme de classes. L'utilisation conjointe des diagrammes d'activités et diagrammes de classes permet ainsi d'assurer la cohérence et l'homogénéité des représentations des connaissances descriptives et des connaissances inférentielles.

La plupart des connaissances de raisonnement peuvent de plus être représentées au sein même des diagrammes d'activités UML à l'aide du langage OCL (*Object Constraint Language*). Nous avons seulement utilisé le langage OCL pour représenter ce type de connaissances au niveau générique, principalement pour signifier des choix entre différentes sous-tâches. Pour des raisons de lisibilité, la forme classique des règles de production, dans une syntaxe proche du langage naturel, a été utilisée pour les autres niveaux de connaissances.

Bruaux *et al.* (2003) ont quant à eux finalement préféré utiliser les diagrammes SADT<sup>12</sup> (Marca et McGowan, 1988) plutôt que les diagrammes d'activités UML en avançant des arguments concernant la rigueur dans la représentation des flux de données. Bruaux *et al.* avancent d'autres arguments en faveur des diagrammes SADT : une meilleure visibilité globale et l'aspect hiérarchique qui permet de représenter la décomposition des tâches. Une extension du langage CML a par ailleurs récemment été proposée par ces auteurs (Bruaux et Kassel, 2004) afin de distinguer de façon plus précise les différents types de rôles de connaissances. Toutes ces considérations sont tout à fait légitimes dans le cadre d'une approche théorique de l'ingénierie des connaissances, mais elles ne semblent pas véritablement fondées dans une approche opérationnelle du génie logiciel, approche que nous privilégions ici. Morel (2002) propose une illustration de cette différence de points de vue – et une contribution à leur rapprochement – axée sur la modélisation des connaissances pour le développement d'applications techniques.

### 4.2.3 Récapitulatif

Un récapitulatif des formalisations utilisées pour chacun des types et des niveaux de connaissances est proposé par le tableau 4.1.

	Connaissances descriptives	Connaissances inférentielles
Connaissances génériques		
Connaissances du domaine	diagrammes de classes	diagrammes d'activités et règles de production
Connaissances liées au code		
Connaissances sur le système	diagrammes d'objets	–

TAB. 4.1 – *Utilisation des diagrammes UML pour la représentation des différents types et niveaux de connaissances.*

Ce tableau laisse apparaître l'absence de modélisation des connaissances inférentielles sur le système et son modèle. La raison tient en deux points :

- premièrement, *les connaissances inférentielles sur le système n'existent pas dans la plupart des cas et l'obtention de telles connaissances est précisément l'objectif d'une modélisation numérique* du système considéré. Navratil (2005) utilise ainsi un modèle hydraulique pour obtenir une connaissance inférentielle sur un tronçon

12. Pour *Structured Analysis and Design Technique*.

de rivière : quel débit (intrants du système) va provoquer un débordement en lit majeur (extrants du système) sur le tronçon <sup>13</sup> ?

- deuxièmement, *l'établissement des connaissances inférentielles sur le modèle numérique est justement l'objectif de la tâche de calage*. C'est précisément à ce niveau que nos travaux s'insèrent, en proposant une formalisation de toutes les autres connaissances disponibles dans l'optique des les implémenter au sein d'un système d'assistance au calage. Celui-ci va ainsi permettre de vérifier la consistance des connaissances inférentielles sur le modèle numérique en réalisant un calage de celui-ci. Le modèle numérique – une fois calé et validé – va ensuite produire des connaissances inférentielles sur le système par l'intermédiaire de simulations numériques <sup>14</sup>.

La suite de ce chapitre est dédiée aux résultats des modélisations de ces différents niveaux et types de connaissances. Les sections 4.3 et 4.4 sont consacrées respectivement aux connaissances descriptives et inférentielles. Elle s'attachent toutes deux à présenter notre modélisation du niveau générique et à spécialiser cette modélisation dans le domaine de l'hydraulique fluviale unidimensionnelle. Enfin, la section 4.5 propose les résultats de notre modélisation pour les connaissances – descriptives et inférentielles – relatives à l'utilisation du code MAGE.

### 4.3 Modélisation des connaissances descriptives

Les connaissances modélisées dans cette section concernent les différents concepts utilisés dans le cadre d'une validation opérationnelle d'un modèle hydraulique. Dans un premier temps, nous allons considérer la validation opérationnelle d'un système générique et construire une ontologie dans ce cadre générique. Dans un deuxième temps, nous présentons une spécialisation de cette ontologie dans le domaine de l'hydraulique fluviale.

#### 4.3.1 ONTOVAL, une ontologie pour la validation opérationnelle

Nous cherchons ici à décrire et à relier entre eux les éléments utilisés lors d'une validation opérationnelle, et donc notamment lors de la tâche *générique* de calage. Ces éléments constituent une *ontologie* pour la validation opérationnelle qui sera utilisée dans le cas particulier du calage de modèle. Cette ontologie sera référencée dans la suite du document sous le nom ONTOVAL. Une représentation graphique de cette ontologie est proposée sur la figure 4.3. Les paragraphes suivants constituent une sorte de grille de lecture pour l'ontologie générique et se réfèrent aux éléments de la figure 4.3.

#### Éléments du référentiel terminologique de modélisation

Nous pouvons en premier lieu identifier les éléments déjà évoqués lors de l'établissement d'un paradigme pour le processus de modélisation numérique (figure 1.6,

13. On peut noter qu'un modèle numérique n'est pas la seule approche pour obtenir de telles connaissances. Le débit de pleins bords peut par exemple aussi être déterminé à l'aide de mesures adéquates et de la formule de Manning (Powell *et al.*, 2004).

14. La notion de *post-audit*, introduite par Anderson et Woessner (1992b) et évoquée dans le chapitre 1 (section 1.3), correspond à la confrontation des connaissances inférentielles obtenues à partir du modèle numérique avec celles obtenues par observation du système réel.



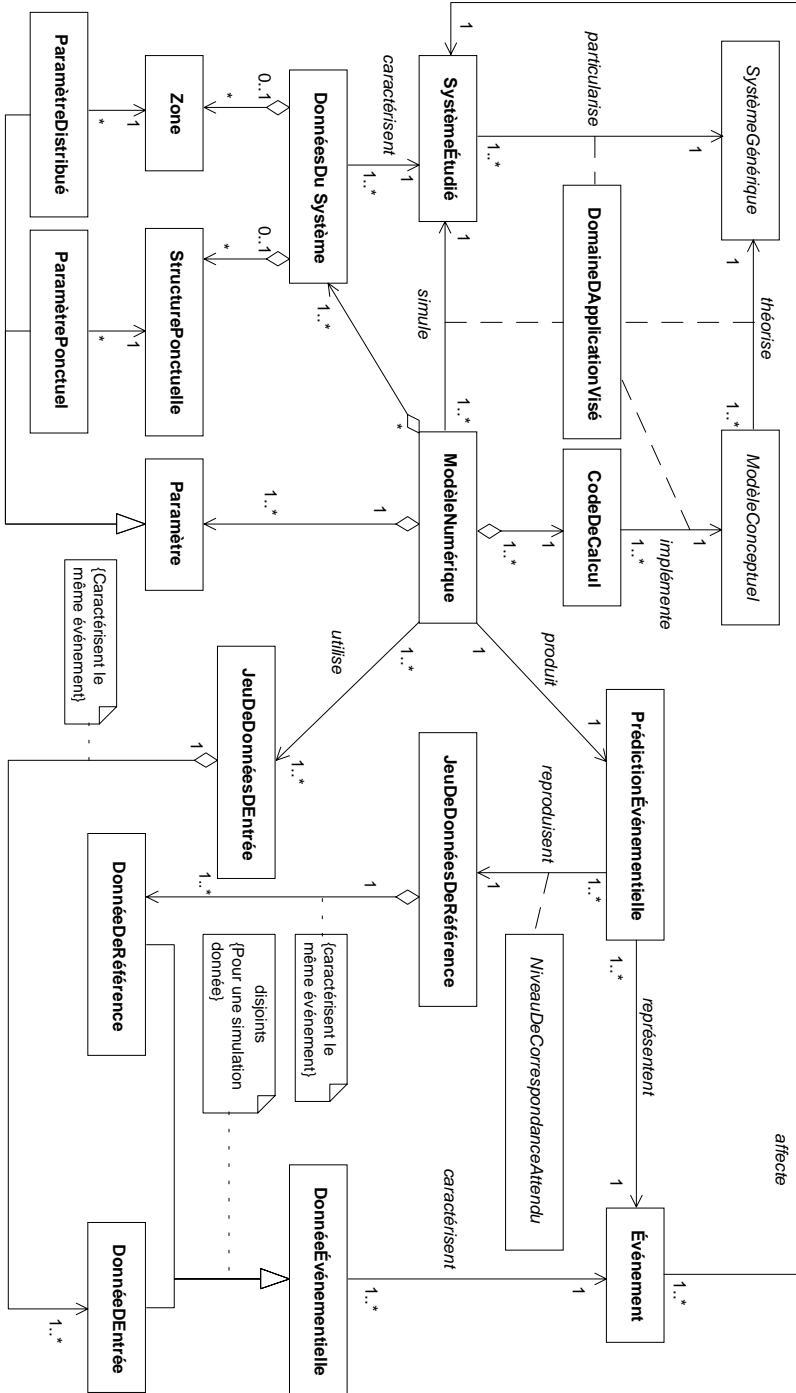


Fig. 4.3 – Ontologie pour la validation opérationnelle – Diagramme de classes UML. Les traits tirets issus de la classe `DomaineDApplicationVise` représentent l'influence de cette classe sur différentes relations entre éléments du référentiel de Røfgaard et Henriksen (2004). De la même façon, le trait tireté issu de la classe `NiveauDeCorrespondanceAttendu` représente l'influence de cette classe sur la relation entre `PredictionEvenementielle` et `JeuDeDonneesDeReference`.

p. 18). Nous retrouvons ainsi les éléments décrits dans le référentiel de Refsgaard et Henriksen : *système générique, système étudié, modèle numérique, code de calcul, etc.*

### Monde réel et monde digital

Le système étudié est caractérisé dans le monde « digital » par des *données du système*, constituées de *zones* découpant le système et éventuellement de *structures ponctuelles* identifiées sur ce même système. En hydraulique fluviale, les zones sont les biefs – au sens numérique du terme – et les structures ponctuelles les différents ouvrages répartis sur le linéaire de la rivière (ponts, seuils, etc.)<sup>15</sup>. De la même façon, un *jeu de données événementielles* va permettre de caractériser un événement dans le monde digital.

Il est important de prendre conscience que la manière dont va s'effectuer le passage du monde réel au monde digital va être conditionnée par le *domaine d'application visé* : en hydraulique, si l'on désire seulement modéliser des crues non débordantes, on pourra se restreindre à la bathymétrie du lit mineur, alors que si le modèle est destiné à prédire les conséquences d'une crue centennale, la description du lit majeur devra faire partie des données du système. De même, si la dynamique de la crue n'est pas essentielle, le débit de pointe enregistré peut s'avérer suffisant pour une simulation en régime permanent. Ce passage dans le monde digital est représenté dans le processus de construction du modèle (figure 1.7, p. 19) par la tâche de *recueil des données*. Il constitue à lui seul une véritable « modélisation » du système physique et des événements qui l'affectent, avec toutes les approximations que cela implique.

Amdisen (1994) distingue quant à lui deux types d'informations dans un système hydroinformatique : information statique et information dynamique. On peut relier ces deux types d'information respectivement aux données du système et aux données événementielles. En suivant ce raisonnement, l'information dynamique comprend aussi les résultats de simulation, puisqu'ils sont eux aussi liés à un événement.

### Différents rôles pour les données

Différents rôles sont attribués aux données événementielles, comme rappelé par l'USACE (1993, p. 4-5) dans le manuel de l'ingénieur pour l'hydraulique fluviale :

*It is useful to think of "data" in three categories: analysis input data, calibration data, and validation or confirmation data.*

Nous distinguons dans ce document les *données d'entrée* et les *données de référence* pour le processus de calage du modèle. La nature de ces différentes données en hydraulique a été détaillée dans le chapitre 2. Les données d'entrée regroupent les informations requises pour lancer une simulation. Les données de référence sont quant à elles d'autres données auxquelles le modélisateur va comparer les résultats de la simulation<sup>16</sup>. Pour une simulation donnée, le même objet ne peut bien évidemment appartenir qu'à une seule – ou aucune – de ces catégories, et tous les objets considérés dans ces données doivent caractériser le même événement, à savoir celui simulé. Ainsi, un calage hydraulique ne peut bien évidemment utiliser comme référence l'hydrogramme d'entrée ou la

15. Les casiers, représentant dans un grand nombre de codes de calcul des zones de stockage d'eau en lit majeur, sont eux aussi des structures ponctuelles.

16. Le processus de validation du modèle, hors du propos de ces travaux, fait effectivement, comme l'indique l'USACE (1993) lui aussi intervenir un concept de données de référence pour un rôle quelque peu différent de celui tenu pendant le calage : si ces données sont bien comparées aux résultats de la simulation, elles ne servent pas dans ce cas à modifier en conséquence les paramètres du modèle.

condition limite aval choisie. De même, la relation entre des laisses de crue et l'événement simulé doit être établie avec certitude, ce qui n'est pas totalement trivial après le passage de plusieurs crues consécutives.

### Définition composite d'un modèle numérique

Le processus de *préparation du modèle* (figure 1.7, p. 19) permet d'obtenir un modèle numérique à partir de deux éléments : un *code de calcul* et des *données du système*. Il est ainsi une « description informatisée du système étudié », suivant la définition du référentiel de Refsgaard et Henriksen. Nous proposons donc ici une définition « composite » d'un modèle numérique. La figure 4.3 présente ainsi un modèle numérique comme une composition d'un *code de calcul*, des *données du système*, mais aussi d'un *jeu de paramètres* à déterminer. Nous avons de plus identifié deux types de paramètres :

- les *paramètres locaux* caractérisent une représentation insuffisamment précise d'un processus physique ponctuel (dans le temps et/ou l'espace) ;
- les *paramètres distribués* rendent compte de la même façon d'une description approximative de processus physiques répartis sur l'ensemble du domaine modélisé.

### Un modèle pour prédire

Le modèle numérique ainsi défini permet de simuler le système étudié, en utilisant des données d'entrée pour produire un *jeu de prédictions événementielles*, agrégat de plusieurs *prédictions événementielles*. En hydraulique fluviale unidimensionnelle, l'ensemble de ces prédictions peut être représenté comme des surfaces dans des espaces 3D  $(x,t,Q)$  et  $(x,t,z)$ , comme celles dessinées sur la figure 2.2 p. 46. Ce jeu de prédictions doit reproduire le jeu de données de référence associé à l'événement simulé avec le *niveau de correspondance attendu*. Le modèle sera ainsi dit « calé » si la surface 3D de la figure 2.2 passe « assez près » des lignes et points représentant les données hydrométriques de référence. Il faut noter que l'utilisation de plusieurs événements pour le calage nécessite le tracé d'autant de surfaces dans ces espaces 3D.

### Exemples de spécialisation dans plusieurs domaines

Pour appréhender le caractère générique de cette ontologie, nous pouvons rattacher ces notions à plusieurs cas concrets de calage de modèles numériques dans différents domaines liés à l'eau : hydraulique fluviale unidimensionnelle, hydrologie distribuée et hydraulique souterraine. Le tableau 4.2 propose un exemple de spécialisation des notions génériques de la figure 4.3 pour chacun de ces trois domaines. Ces exemples ont été tirés de recherches menées récemment au sein de l'unité Hydrologie-Hydraulique du CEMAGREF.

#### 4.3.2 ONTOHYD, une ontologie pour l'hydraulique fluviale 1D

Cette section s'intéresse à développer une ontologie pour la validation opérationnelle en hydraulique fluviale unidimensionnelle, référencée dans la suite du document sous le nom ONTOHYD. Nous ne prétendons pas donner ici une représentation exhaustive des concepts relatifs au domaine de l'hydraulique fluviale, mais seulement de ceux mis en œuvre au cours d'une tâche de calage de modèle ou de validation de modèle.

<i>Notion générique</i>	<i>Exemple en hydraulique fluviale</i>	<i>Exemple en hydrologie distribué</i>	<i>Exemple en hydraulique souterraine</i>
Système générique	Segment de rivière	Bassin versant	Volume de sol
Modèle conceptuel	Modèle conceptuel Saint-Venant 1-D <sup>(1)</sup>	Équations thermodynamiques de bassin versant <sup>(2)</sup>	Équations de l'écoulement en milieu saturé
Code de calcul	MAGE	REW 4.0 <sup>(2)</sup>	MODFLOW-96 <sup>(3)</sup>
Système étudié	Segment de la Lèze (09) entre Lézat-sur-Lèze et Labarthe-sur-Lèze	Bassin versant de la Donga (Bénin)	Volume de sol sous le ruisseau de la Chaudanne (69)
Événement	Crue de février 2000	Années 2002-2003	Années 2003-2004
Modèle numérique	Modèle hydraulique 1D de la Lèze	Modèle hydrologique distribué de la Donga	Modèle d'hydraulique souterraine de la Chaudanne
Domaine d'application visé	Prévision de crue	Reproduction du comportement hydrologique	Analyse du comportement hydraulique de la zone hyporhéique
Niveau de correspondance attendu	Bonne reproduction des gradients de montée de crue	Bonne reproduction de la dynamique du système en surface et dans la nappe	Bonne reproduction des gradients de charge entre 9 piézomètres
Données du système	Topographie du lit et géométrie des seuils	Topographie du bassin versant, etc.	Topographie et géométrie du volume considéré
Jeu de données d'entrée	Hydrogramme de crue à Lézat et courbe de tarage à Labarthe	Chroniques pluviométriques, etc.	Ligne d'eau dans la rivière et flux (estimés) sur les faces du volume
Jeu de données de référence	Hydrogramme de crue à Labarthe	Chroniques hydrométriques et piézométriques en plusieurs points du bassin	Chroniques de charge dans les piézomètres
Paramètres distribués	Coefficient de résistance à l'écoulement	Coefficient de résistance à l'écoulement, évapotranspiration potentielle globale, etc.	Conductivité hydraulique et coefficient d'emmagasinement
Zones	Plusieurs zones homogènes pour la résistance à l'écoulement	Zones de décomposition pour la paramétrisation	Plusieurs zones homogènes pour la conductivité hydraulique et une zone pour le coefficient d'emmagasinement
Paramètres ponctuels	Coefficients de débit des seuils	—	—
Structures ponctuelles	Seuils artificiels en rivière	— <sup>(4)</sup>	— <sup>(4)</sup>

TAB. 4.2 – *Exemples de spécialisations des notions génériques pour trois cas concrets de calage de modèles numériques. L'exemple en hydraulique fluviale sera traité dans le chapitre 6, l'exemple en hydrologie distribuée est tiré de la thèse de Varado (2004) et celui en hydraulique souterraine de la thèse de Ruyschaert (2005).*

<sup>(1)</sup> Voir chapitre 2.

<sup>(2)</sup> Voir Reggiani *et al.* (1998, 1999).

<sup>(3)</sup> Voir Harbaugh et McDonald (1996).

<sup>(4)</sup> Pas de structure ponctuelle dans ce modèle particulier.

Des choix importants ont de fait été effectués dans la construction et la structure de cette ontologie. Nous avons spécialisé pour le domaine de l'hydraulique les différents concepts présentés dans la section précédente, tout d'abord ceux liés aux objectifs du modèle, puis les données du système et les paramètres, et enfin les données et prédictions événementielles.

### Missions d'un modèle hydraulique

Le domaine d'application visé et le niveau de correspondance attendu sont des éléments qui conditionnent l'ensemble du processus de calage. La figure 4.4 représente la spécialisation que nous avons adoptée.

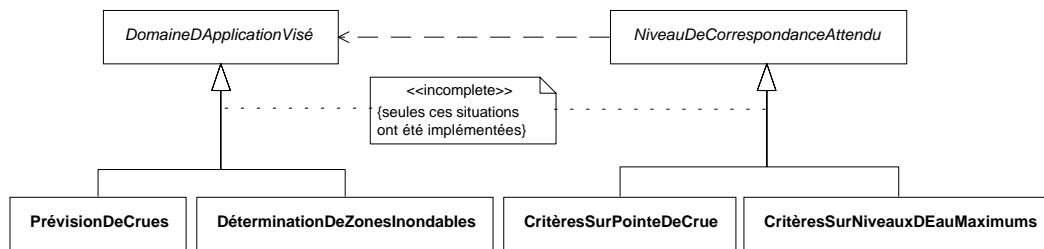


FIG. 4.4 – Spécialisation du domaine d'application visé et du niveau de correspondance attendu pour l'hydraulique fluviale. La flèche tiretée indique une relation de dépendance.

Il faut noter que le niveau de correspondance attendu va en effet – comme indiqué sur la figure 4.4 – fortement dépendre du domaine d'application visé. En effet, si un modèle hydraulique est destiné à identifier des zones inondables, alors le niveau de correspondance attendu devra considérer la qualité de la reproduction des niveaux d'eau maximum atteints pendant les événements de calage. De même, il est opportun dans un tel cas de considérer un critère sur la reproduction de la pointe de crue – au niveau quantitatif et/ou temporel – lorsque le modèle est destiné à être utilisé comme outil de prévision des crues.

### Données du système et paramètres

En hydraulique fluviale unidimensionnelle, on peut regrouper les données du système en trois sous-ensembles :

- les données topologiques incluent la description du réseau hydrographique par l'intermédiaire de *noeuds* et de *biefs* ;
- les données topographiques incluent la description de la géométrie de la rivière grâce à des *sections en travers* ;
- les données sur les ouvrages décrivent les structures hydrauliques (déversoirs, orifices, etc.), présents sur le linéaire modélisé.

Dans le contexte de la validation opérationnelle, cette classification apparaît superflue, et nous avons décidé de définir directement les données du système en hydraulique fluviale comme une aggrégation des éléments évoqués ci-dessus : biefs, noeuds, sections en travers et ouvrages. La modélisation de ces éléments est proposée sur la figure 4.5.

En sus de ces éléments, nous avons défini un tronçon de rivière, modélisé – à l'instar d'un bief – comme un dérivé du concept générique de *zone*. Ce tronçon de rivière, limité par deux sections, a été défini indépendamment des données du système, pour

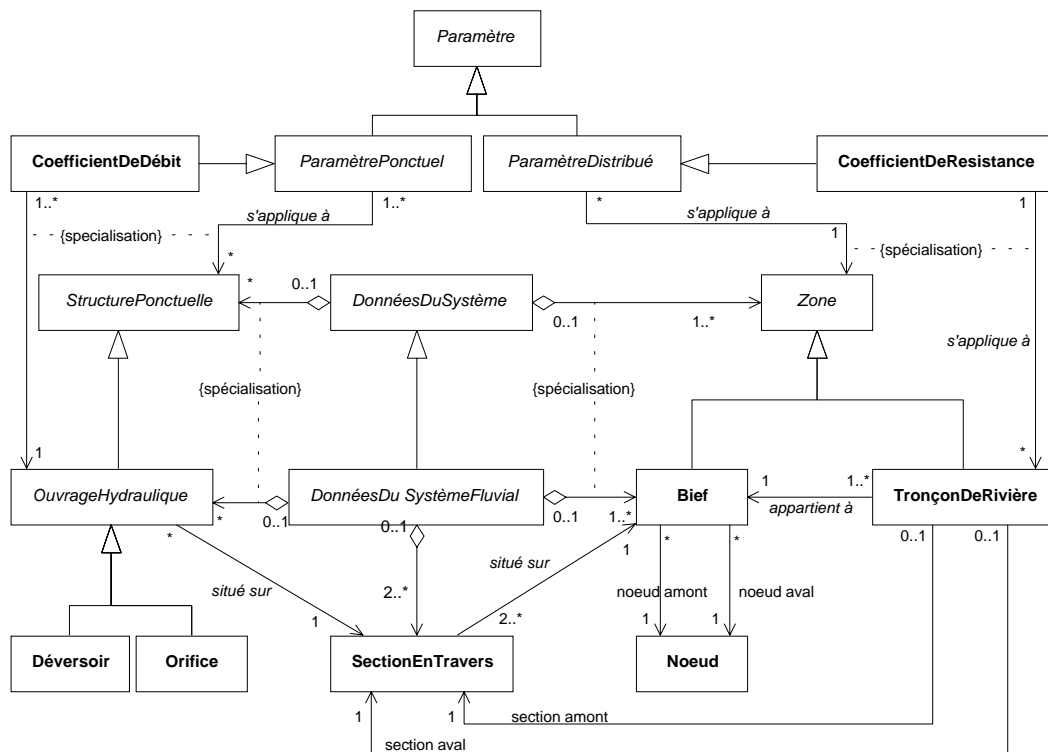


FIG. 4.5 – Spécialisation des données du système et des paramètres pour le domaine de l'hydraulique fluviale 1D, dans une optique de validation opérationnelle. Les classes en italique représentent les concepts génériques.

qu'il puisse librement incarner – notamment – la région d'application du coefficient de résistance, lui-même dérivé du concept de *paramètre distribué*. De la même façon, à un ouvrage hydraulique, dérivé du concept de *structure*, va être associé un coefficient de débit<sup>19</sup>, lui-même dérivé du concept de *paramètre ponctuel*.

### Nature des données et prédictions événementielles

Comme nous l'avons vu au chapitre 2, les données événementielles en hydraulique fluviale peuvent se rapporter à des ensembles de points en deux dimensions, dans un des plans (t,h), (t,Q), (x,h) et plus rarement (x,Q). Ce constat nous a donc conduit à construire, pour représenter les différents éléments liés à une crue – dérivée du concept générique d'*événement* – une arborescence basée sur le concept d'objet graphique bidimensionnel. Cette arborescence est représentée sur la figure 4.6.

Nous distinguons en premier lieu une *courbe* d'un *ensemble de points*, pour marquer la différence entre objets continus – ou quasi-continus – et objets discrets. Cette distinction trouve sa justification dans la différence entre les résultats d'une simulation, qui peuvent être obtenus de manière quasi-continue, et les données de terrain qui sont souvent à la fois peu nombreuses et éparées. Ces concepts de courbe et d'ensemble de points nous seront utiles dans le chapitre 6. Leur spécialisation dans le domaine de l'hydraulique fluviale nous permet ainsi de faire dériver le concept d'*ensemble de points de*

19. Pour la modélisation d'un pont, par exemple, *deux* coefficients peuvent être associés à l'ouvrage : l'un pour l'écoulement sous les arches, et l'autre pour l'écoulement sur le tablier.

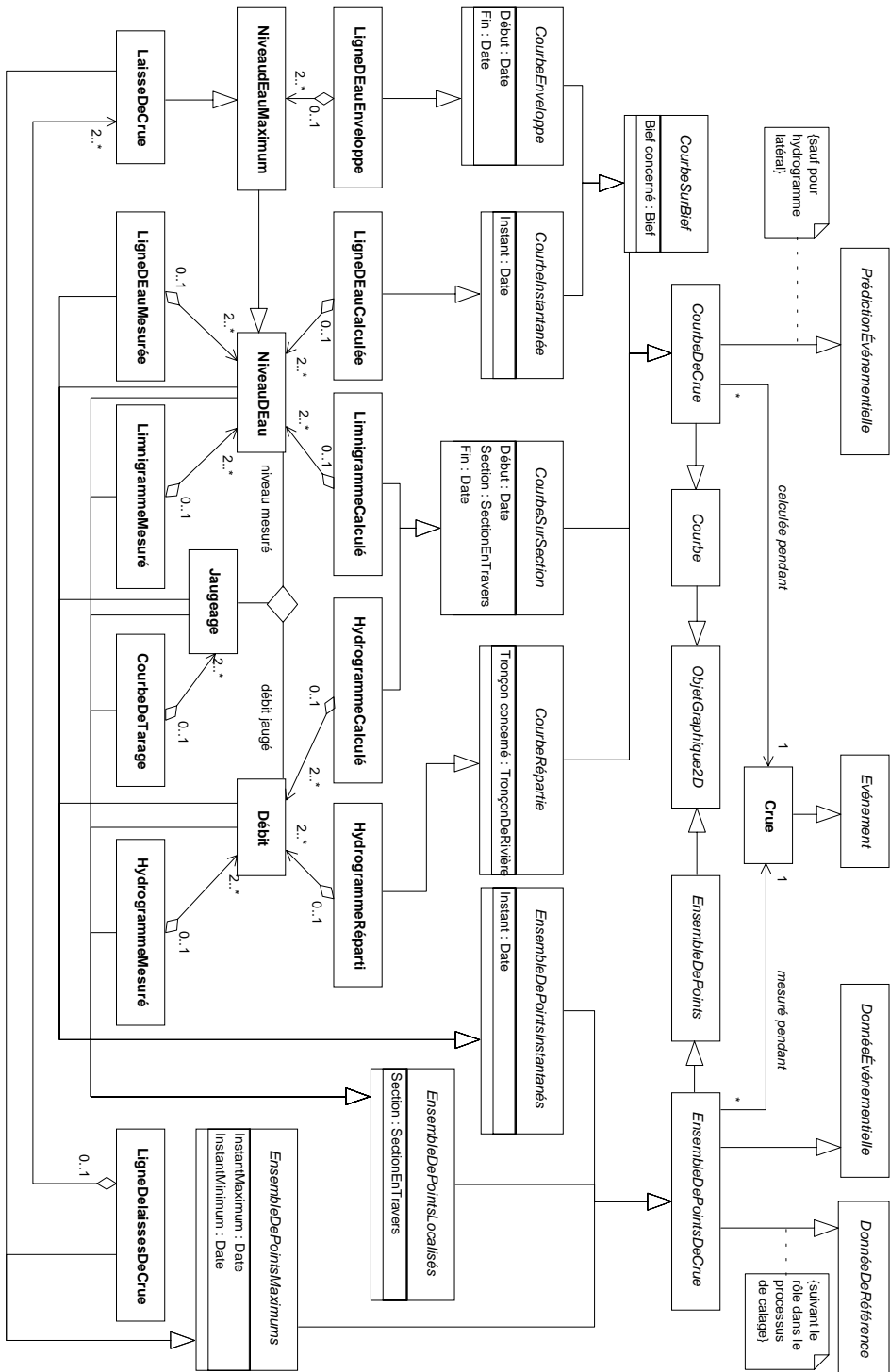


FIG. 4.6 – Nature des données et prédictions événementielles en hydraulique fluviale unidimensionnelle.

*crue* du concept générique de *donnée événementielle*<sup>20</sup> – émanant de l'ontologie générique –, et de façon symétrique, de faire dériver le concept de *courbe de crue* du concept générique de *prédiction événementielle*. Un hydrogramme est par exemple un objet discret s'il est mesuré, alors qu'il peut être considéré comme continu s'il est le résultat d'une simulation numérique.

Nous avons ainsi étendu l'arborescence en fonction des différentes caractéristiques possibles d'un ensemble de points et d'une courbe en hydraulique fluviale unidimensionnelle. Un ensemble de points de crue peut en effet être mesuré à un instant donné (*niveau d'eau, débit, jaugeage*<sup>21</sup> et *ligne d'eau*), dans une section donnée (*niveau d'eau, laisse de crue, débit, jaugeage, courbe de tarage, limnigramme* et *hydrogramme*) ou dans un intervalle de temps donné (*laisse de crue et ligne de laisses de crue*). De la même façon, une courbe de crue peut être calculée à un instant donné (*ligne d'eau*), dans un intervalle de temps donné (*ligne d'eau enveloppe*), dans une section donnée (*limnigramme* et *hydrogramme*) ou encore sur un tronçon donné (*hydrogramme réparti*).

La définition d'un *hydrogramme réparti* à l'aide de sa région d'application propose ainsi une autre fonction du concept de *tronçon* que l'on a utilisé plus haut comme région d'application du coefficient de résistance. On retrouve cette pluralité de définition au niveau « métier » dans l'environnement de modélisation pour MAGE, appelé AM0 et développé par Tardy (2003) et Le Drogo (2004).

### Rôle des données événementielles

Dans la figure 4.6, nous avons utilisé la notion d'héritage multiple pour modéliser à la fois la nature des objets hydrauliques – représentée par l'arborescence décrite dans la section précédente – et leur rôle dans le processus de calage. D'une part, toutes les *courbes calculées* sont des prédictions événementielles, à l'exception de l'hydrogramme réparti, qui est le produit d'une simulation hydrologique. D'autre part, tout *ensemble de points mesuré* peut être considéré – à la discrétion du modélisateur – comme une donnée de référence au cours du processus de calage.

En revanche, le cas est plus complexe pour les données d'entrée (voir figure 4.7). En hydraulique fluviale, un *jeu de données d'entrée* est constitué de *conditions limites amont* (hydrogrammes mesurés), de *conditions limites aval*, (limnigrammes mesurés et/ou courbes de tarage), et éventuellement de *conditions limites intermédiaires* (hydrogrammes répartis) et de *conditions initiales* (lignes d'eau). Seuls quelques types de données mesurées peuvent ainsi jouer le rôle de données d'entrée.

### 4.3.3 Comparaison à d'autres travaux sur des ontologies du domaine

Les sections précédentes ont présenté la construction de deux ontologies distinctes, la deuxième étant la spécialisation de la première pour une discipline particulière. Elles sont toutes deux associées à la résolution d'un problème spécifique, à savoir la validation opérationnelle. Quelques travaux de construction d'ontologies de domaines voisins de l'hydraulique fluviale ont été réalisés récemment et cette section se propose de les comparer à notre approche.

20. On peut noter qu'un ensemble de points de crue peut être réduit à un seul élément.

21. En première approximation, étant donné que la mesure des vitesses est rarement instantanée.



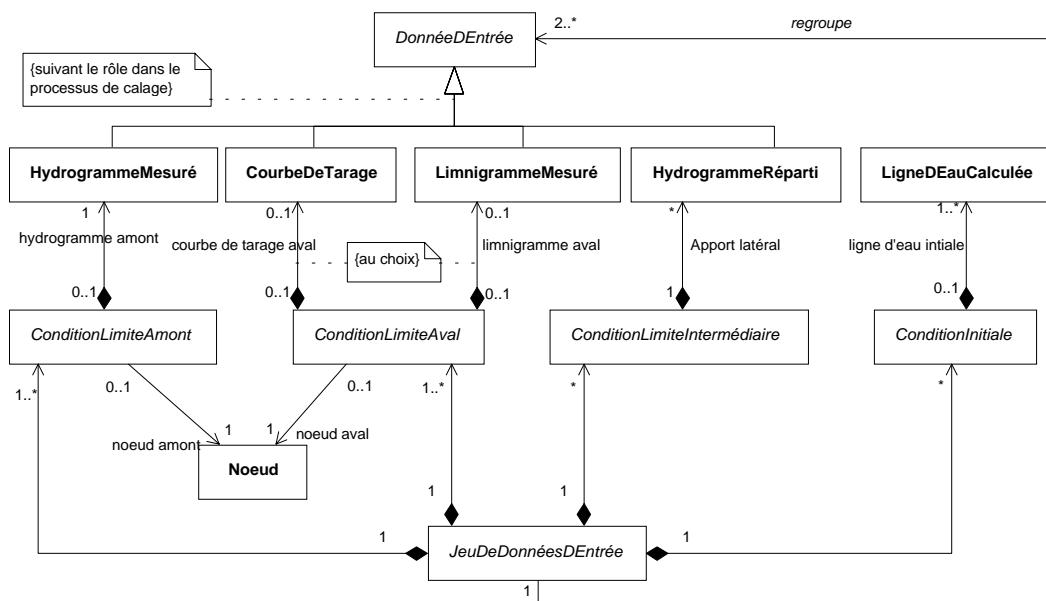


FIG. 4.7 – Nature des données d'entrée pour le calage de modèles hydrauliques.

## HARMONIQUA

Le projet HARMONIQUA s'est bâti avec une approche ontologique (Scholten, 2001; Scholten et Beulens, 2002), aussi bien pour l'ontologie de la tâche – ici la modélisation numérique – que pour l'ontologie du domaine – ici l'ensemble des disciplines liées à la modélisation de bassins versants. L'outil développé, appelé MoST, a été construit à partir de l'éditeur d'ontologie PROTÉGÉ-2000 (Fridman Noy *et al.*, 2000). Il propose ainsi notamment un glossaire de termes à la fois utilisés dans ces disciplines liées à l'eau et reliés à la modélisation numérique (Scholten *et al.*, 2004). L'ontologie du domaine développée dans ce cadre a servi de base à la construction de l'ontologie ONTOVAL présentée dans la section 4.3.1, notamment par l'intermédiaire du référentiel terminologique de Refsgaard et Henriksen (2004). On peut noter qu'ONTOVAL est plus spécialisée, puisqu'elle ne concerne qu'une partie de la tâche de modélisation numérique, à savoir le calage du modèle.

## How

Récemment, une ontologie du domaine de l'hydrologie – appelée How<sup>22</sup> – a été réalisée dans le cadre d'une thèse à l'université de Drexler (Bermudez et Piasecki, 2003, 2004b). Elle a été développée pour fonctionner sur le web et s'appuie sur un langage à balises appelé HYDROML<sup>23</sup> pour les métadonnées en hydrologie (Piasecki et Bermudez, 2003; Bermudez et Piasecki, 2004a). Cette ontologie, au contraire de celles développées dans le cadre du projet HARMONIQUA ou des travaux rapportés dans ce mémoire, n'est pas associée à une ontologie de la tâche. Elle peut de ce fait être considérée comme plus « générique », mais ne prend de fait pas en compte les spécificités associées aux tâches de modélisation numérique ou de calage de modèle.

22. Pour *Hydrologic Ontology for the Web*.

23. Pour *Hydrologic Markup Language*.

## SAPREDI

Dans le cadre d'un DEA (Morel, 1997), puis d'une thèse réalisés conjointement entre le CETMEF et le LARIA, Morel (2002) a développé un Système d'Aide à la Préviation et au Diagnostic (SAPREDI) pour la Loire moyenne. La première version de l'outil a conduit à la mise en place d'une terminologie pour la gestion du risque inondation, modélisée à l'aide du formalisme UML. Cette terminologie est constituée de dix rubriques : hydrographie physique, modélisation hydraulique, aléa de crue, géométrie, temps, ouvrages, territoire administratif, phénomènes hydrauliques, gestion du bassin et diagnostic du risque. Des diagrammes de classes UML interdépendants permettent de représenter chacune de ces rubriques.

Les concepts de l'ontologie ONTOHYD développée plus haut se retrouvent quasiment dans leur ensemble dans cette terminologie, essentiellement au sein des rubriques « modélisation hydraulique » (section, bief, etc.), « aléa de crue » (crue, hydrogramme, etc.) et « ouvrages » (seuil, etc.). L'ontologie mise en place par Morel n'ayant pas été développée précisément dans l'optique d'une modélisation numérique, on n'y retrouve pas le concept de *paramètre*, essentiel dans le cadre de la tâche de calage.

Dans un deuxième temps, une base de connaissances sur le « risque aux échelles d'annonce de crue » a été développée. Les connaissances du domaine contenues dans la première version de SAPREDI ont été restructurées et homogénéisées pour produire une ontologie du domaine « risque inondation » à l'aide du langage de spécification d'ontologies ONTOSPEC (Kassel, 2002).

## Récapitulatif

Le tableau 4.3 propose un récapitulatif des expériences de construction d'ontologies présentées ci-dessus. Le principal enseignement à tirer de ces comparaisons est la diversité des modélisations possibles pour les mêmes objets, en fonction de la *discipline* et du *problème* considéré.

<i>Ontologie ou outil</i>	<i>Discipline</i>	<i>Problème</i>	<i>Langage</i>
MoST	Hydrosciences	Modélisation numérique	PROTÉGÉ-2000
How	Hydrologie	Description de données	HYDROML
SAPREDI	Hydrologie	Gestion du risque inondation	UML
Ontologie « SAPREDI »	Hydrologie	Gestion du risque inondation	ONTOSPEC
ONTOVAL	Générique	Validation opérationnelle	UML
ONTOHYD	Hydraulique fluviale 1D	Validation opérationnelle	UML

TAB. 4.3 – *Comparaison de travaux sur des ontologies de domaine.*

Encore une fois, notre approche n'a pas la prétention de modéliser de façon « universelle » l'ensemble des concepts de modélisation numérique ou d'hydraulique fluviale, mais les deux ontologies ONTOVAL et ONTOHYD constituent une proposition de modélisation de certains de ces concepts *dans l'optique spécifique de la validation opérationnelle*, d'une part dans un cadre générique, et d'autre part pour l'hydraulique fluviale unidimensionnelle.

## 4.4 Modélisation des connaissances inférentielles

Cette section s'attache à présenter notre modélisation du processus de calage. Cette modélisation s'inscrit comme la formalisation du paradigme actuel pour le calage de modèles numériques. Après une présentation du processus dans son ensemble, chacune des étapes du calage est détaillée, à la fois dans un cadre générique et dans le cadre de l'hydraulique fluviale unidimensionnelle.

### 4.4.1 Formalisation du paradigme actuel pour le calage de modèles numériques

Dans le chapitre 3, nous avons distingué différentes étapes dans le processus de calage de modèles hydrauliques. À partir d'entretiens avec des modélisateurs de disciplines connexes comme l'hydrologie ou l'hydraulique souterraine, nous avons constaté que ces différentes étapes étaient présentes – même si elles revêtaient plus ou moins d'importance – dans le processus de calage de chacune de ces disciplines. Nous avons donc identifié à partir de cette analyse un paradigme – au sens du terme anglais *paradigm*<sup>24</sup> – pour le calage de modèles numériques, indépendamment du domaine considéré. Les différentes étapes constituant ce paradigme sont représentées sur la figure 4.8.

#### Prérequis et produits de la tâche de calage

Dans le chapitre 1, nous avons identifié les différents éléments requis pour réaliser la tâche de calage. Il est ainsi nécessaire de disposer d'un *modèle numérique* non calé et d'un ensemble *a priori* non structuré de *données événementielles*. Deux éléments sont de plus indispensables pour mener à bien cette tâche : un *domaine d'application visé* et un *niveau de correspondance attendu*. Le produit de la tâche de calage est un *modèle numérique* calé. Cette mise au point s'avère nécessaire avant toute décomposition de la tâche de calage, et elle constitue l'hypothèse de base de notre paradigme.

#### Connaissances procédurales et connaissances de raisonnement

Dans la figure 4.8, les six étapes principales de la tâche de calage sont représentées par des *états à sous-activités*, dans le sens du formalisme UML. Chacune d'entre elle sera reprise dans un diagramme d'activité propre et détaillé dans les sections suivantes<sup>25</sup>. Ces diagrammes d'activités représentent les connaissances *procédurales* liées à chacune des étapes de la tâche.

Pour chacune de ces étapes est proposée une *description générique* ainsi que les *spécificités en hydraulique* fluviale unidimensionnelle. Ces spécificités sont présentées sous forme de recommandations issues d'entretiens avec des modélisateurs et des quelques guides disponibles en la matière (et notamment Cunge *et al.*, 1980, chap. 5 : *Calibration and data needs*). Ces recommandations seront exprimées pour chacune des étapes *de manière discursive et semi-formelle* et regroupées sous forme de paragraphes, pour une question de lisibilité. Chacun de ces paragraphes représente une *heuristique* ou connais-

24. La première définition donnée par *The Free Dictionary* ([www.thefreedictionary.com](http://www.thefreedictionary.com)) est la suivante : « *Paradigm* : One that serves as a pattern or model ».

25. Cette propriété de décomposition hiérarchique des diagrammes d'activités UML est comparable à celle des diagrammes SADT utilisés par Bruaux *et al.* (2003).

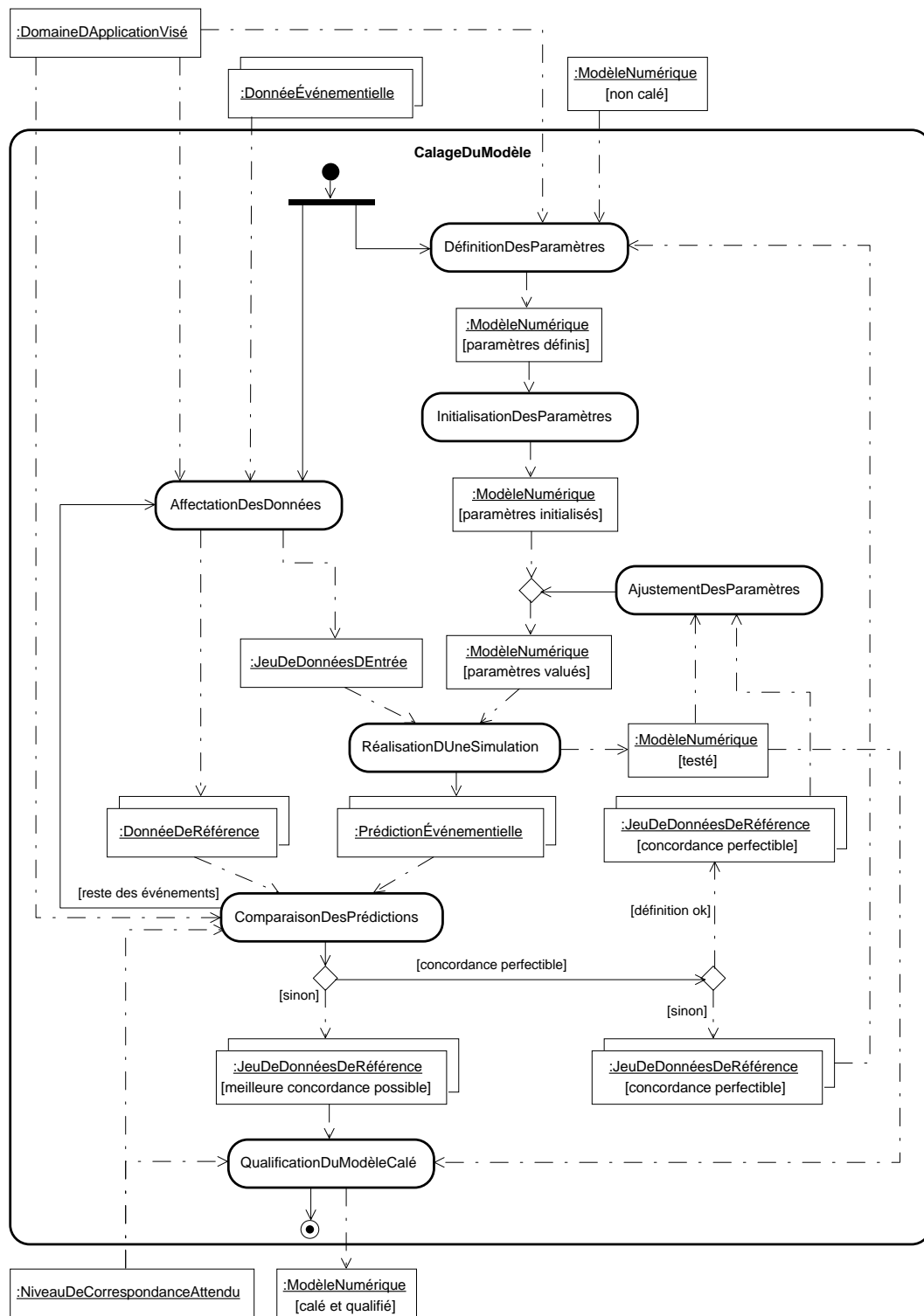


FIG. 4.8 – Processus de calage d'un modèle numérique – Diagramme d'activités UML.

sance de raisonnement, qui sera implémentée sous forme d'une ou plusieurs règles de production dans le système d'assistance au calage.

Il faut noter que les connaissances du domaine de l'hydraulique présentées ici sont loin d'être exhaustives, et qu'elle ne constituent qu'une *fraction* des connaissances utilisées par les experts lors d'un calage de modèle. Nous verrons dans le chapitre suivant que le système d'assistance au calage implémentant ces connaissances est par nature *foncièrement évolutif* et que l'adjonction de connaissances supplémentaires pourra être aisément réalisée par la suite.

#### 4.4.2 Affectation des données

L'étape d'affectation des données représentée sur la figure 4.9 vise à déterminer les données à utiliser lors de la simulation à venir, et le rôle qu'elle vont y tenir. La première sous-tâche consiste à sélectionner un événement, et donc à extraire de l'ensemble des données événementielles disponibles celles qui correspondent à cet événement. Parmi ces dernières, les données d'entrée – à fournir au code de calcul – vont tout d'abord être identifiées et sélectionnées. Enfin, les données de référence peuvent être extraites des données événementielles restantes. Il faut noter que toutes ces sous-tâches dépendent du domaine d'application visé.

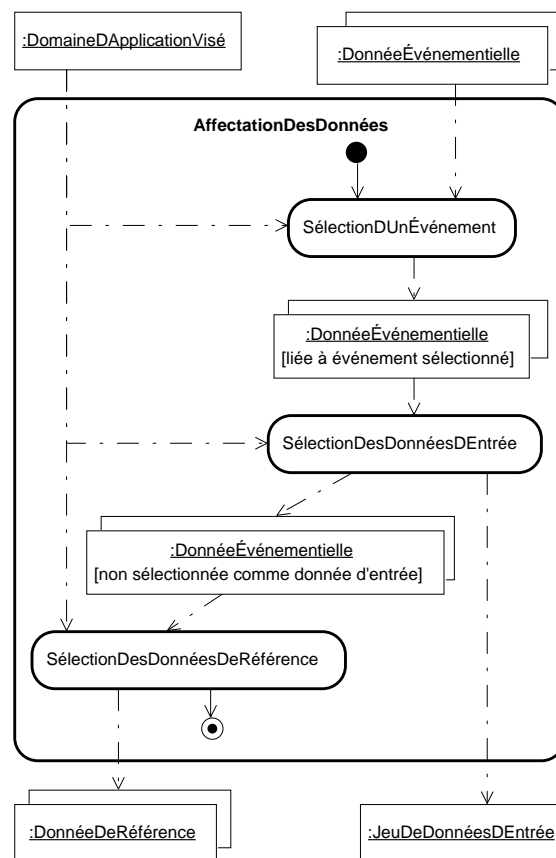


FIG. 4.9 – Étape d'affectation des données – diagramme d'activités UML.

## En hydraulique fluviale

La sélection d'un événement s'effectue sur la base de l'application visée du modèle. Si celui-ci est destiné à la prévention des inondations, on doit réaliser le calage sur l'événement le plus important possible en terme de magnitude. Il est toutefois nécessaire de disposer pour un tel événement de suffisamment de données pour constituer à la fois un jeu de données d'entrée et un jeu de données de référence.

S'il existe un hydrogramme enregistré à l'amont du domaine modélisé, celui-ci devra être utilisé comme condition limite amont. Si ce n'est pas le cas, on devra prendre l'hydrogramme enregistré au plus près de cette limite amont, en faisant l'hypothèse qu'il ne subit pas de déformation. Il devra être translaté dans le temps pour prendre en compte le temps de propagation de la crue. La crédibilité de cette condition limite amont pourra être vérifiée par comparaison de l'hydrogramme enregistré à la station hydrométrique utilisée avec l'hydrogramme calculé dans la même section. Dans le cas où plusieurs conditions limites amont sont nécessaires, les mêmes règles doivent être suivies pour chacun des biefs.

Pour la condition limite aval, on utilisera de préférence un limnigramme si disponible. En effet, ce type de mesure contient moins d'incertitude qu'une courbe de tarage le plus souvent extrapolée pour le type d'événement considéré. Si aucune station hydrométrique n'est présente à l'extrémité aval du bief considéré, le modèle doit être revu pour par exemple disposer d'un régime uniforme dans la section aval. Dans le cas où plusieurs conditions limites aval sont nécessaires, les mêmes règles doivent être suivies pour chacun des biefs.

Les conditions limites latérales peuvent être nécessaires lorsque le domaine modélisé est relativement important. Les apports latéraux doivent provenir d'une modélisation hydrologique préalable de l'événement considéré et représenter le ruissellement sur le bassin versant intermédiaire et, à défaut d'enregistrements ad-hoc, les apports des affluents.

Les conditions initiales sont la plupart du temps calculées par le code de calcul sur la base d'une hypothèse de régime permanent avec le débit de base avant l'événement.

Les données de référence seront extraites des données restantes en fonction de l'objectif du modèle : si celui-ci est destiné à la détermination des zones inondables, les laisses de crue seront par exemple privilégiées, mais la priorité sera donnée aux courbes fonction du temps (hydrogrammes ou limnigrammes) si le domaine d'application visé est la prévision de crue.

### 4.4.3 Définition des paramètres

La tâche de définition des paramètres représentée sur la figure 4.10 vise à déterminer quels vont être les paramètres considérés dans la tâche de calage. L'identification de deux types de paramètres dans la construction de l'ontologie induit l'existence de deux sous-tâches menées en parallèle : d'une part, la définition des paramètres ponctuels, et

d'autre part, la définition des paramètres distribués. Ces sous-tâches dépendent bien évidemment du domaine d'application visé.

Si les données du système comprennent des structures ponctuelles mettant en œuvre des processus physiques paramétrables, le modélisateur devra effectuer une sélection de celles de ces structures auxquelles devront être attribués un – ou des – paramètres de calage.

Si les données du système comprennent des processus physiques paramétrables de manière distribuée, le modélisateur devra réaliser une étape supplémentaire : la définition des zones homogènes, ou *zonation*. Cette sous-tâche est cruciale dans le processus de calage, puisqu'elle va déterminer à la fois le niveau de granularité – ou *résolution* – de la paramétrisation distribuée et la répartition de ces paramètres sur le domaine modélisé. Une attention toute particulière devra y être apportée pour éviter la surparamétrisation.

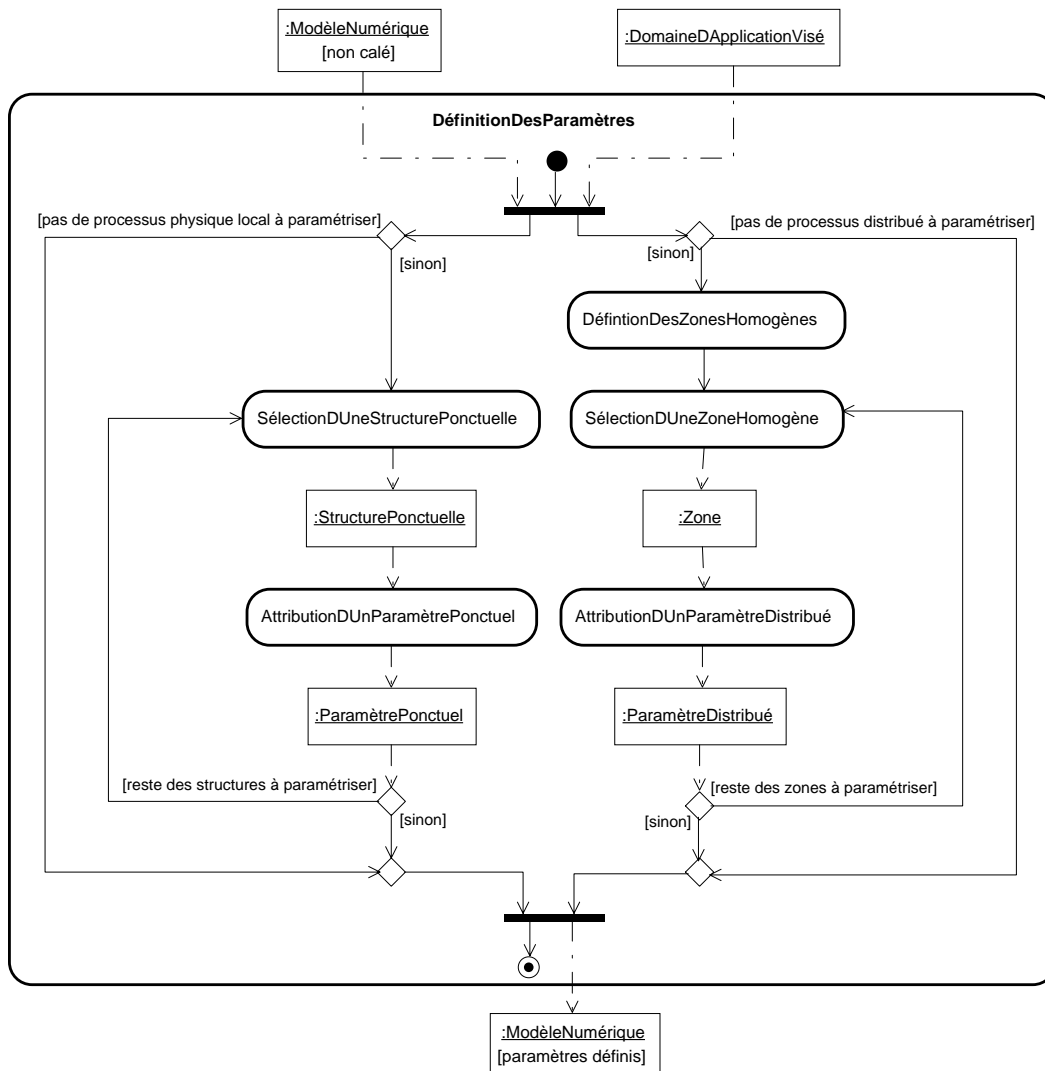


FIG. 4.10 – Étape de définition des paramètres – diagramme d'activités UML.

## En hydraulique fluviale

Pour chaque ouvrage hydraulique élémentaire est défini un coefficient de débit. Ces coefficients peuvent ne pas être considérés comme des paramètres lorsque les structures considérées sont bien définies, comme par exemple un seuil artificiel mince perpendiculaire à l'écoulement. Toutefois, les coefficients associés à des structures plus complexes et éloignées des structures de référence peuvent être considérés comme des paramètres de calage.

La définition des paramètres de résistance à l'écoulement constitue un point critique dans le calage de modèles hydrauliques. Cette définition doit être basée sur l'examen des données du système, principalement sur les données d'ordre qualitatif. En effet, la question est d'identifier des tronçons de rivière homogènes du point de vue de la résistance à l'écoulement, et donc du point de vue de chacune des sources de cette résistance présente dans la formule de Cowan (1956) : rugosité, irrégularité et variation des sections, obstructions et végétation. Ces considérations doivent être appliquées de manière simultanée au lit mineur et à la plaine d'inondation.

Si aucune photographie ou observation de terrain n'est disponible, la définition des tronçons homogènes peut s'effectuer sur la base d'une analyse du profil en long du fond de la rivière. En effet, on a vu dans le chapitre 3 (p. 59 et suivantes) que le coefficient  $n$  de Manning dépend, au-delà de la granulométrie, de la pente de la ligne d'eau (équation 3.9 et équation 3.10). Les ruptures de pente du cours d'eau peuvent être un bon indicateur *a priori* des transitions d'une zone de résistance homogène à une autre.

### 4.4.4 Initialisation des paramètres

La tâche d'initialisation des paramètres représentée sur la figure 4.11 consiste à attribuer une valeur par défaut aux paramètres précédemment définis. L'initialisation de chacun de ces paramètres doit être effectuée successivement, car elle requiert des informations spécifiques à chaque structure ponctuelle et à chaque zone homogène. L'attribution d'une valeur par défaut à un paramètre peut être accompagnée de la détermination d'une plage de variation. Cette plage de variation va alors contraindre l'ajustement des valeurs de ce paramètre dans la suite du processus de calage.

## En hydraulique fluviale

L'initialisation des coefficients de débit des ouvrages peut être effectuée à partir des tableaux 2.3 et 2.4 présentés à la page 38 du chapitre 2.

L'initialisation des coefficients de résistance peut être effectuée à partir de la procédure développée au chapitre 3 et décrite dans la figure 3.4 pour chacun des tronçons homogènes identifiés. Cette procédure permet d'attribuer à la fois une valeur initiale et un intervalle de variation pour chaque coefficient de résistance.



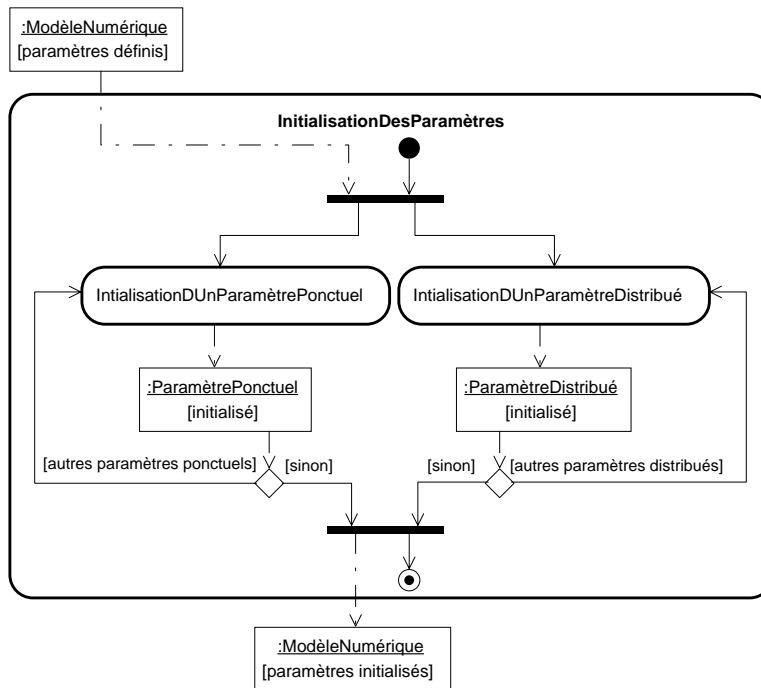


FIG. 4.11 – Étape d'initialisation des paramètres – diagramme d'activités UML.

#### 4.4.5 Réalisation d'une simulation

L'étape de réalisation d'une simulation, représentée sur la figure 4.12, consiste à exécuter le code de calcul à l'aide d'un jeu de données d'entrée, correspondant à l'événement sélectionné dans l'étape d'affectation des données. Le résultat de cette simulation va être un jeu de prédictions rapportées à l'événement considéré. Afin d'exécuter le code, un pré-traitement doit être effectué, notamment pour réécrire les données d'entrée dans un format lisible par celui-ci. De la même façon, un post-traitement doit être effectué pour extraire des produits de la simulation les prédictions événementielles. Une description plus fine de cette étape sera présentée dans la section 4.5 consacrée aux connaissances sur l'utilisation du code MAGE.

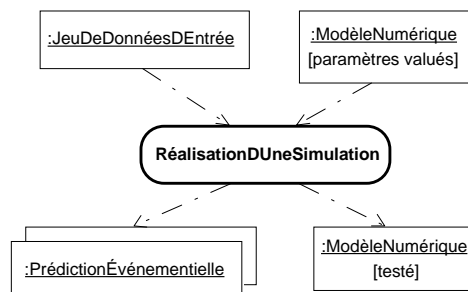


FIG. 4.12 – Étape de réalisation d'une simulation – diagramme d'activités UML.

#### 4.4.6 Comparaison des prédictions

L'étape de comparaison des prédictions, représentée sur la figure 4.13, vise à confronter le jeu de prédictions événementielles obtenu à l'étape précédente avec le jeu de données de référence sélectionné au cours de l'étape d'affectation des données. Les premières sous-tâches consistent à sélectionner une donnée de référence, puis à sélectionner la prédiction événementielle à laquelle elle va être confrontée. La comparaison en elle-même consiste à identifier, en fonction du niveau de correspondance attendu, la nature et l'intensité de l'écart entre prédiction et donnée de référence. Toute cette procédure doit être réalisée jusqu'à ce que toutes les données de référence disponibles – pour tous les événements considérés – soient confrontées à des prédictions<sup>26</sup>. L'ensemble des écarts constatés est ainsi compilé pour conduire à une différence globale entre prédictions du modèle et données de calage.

#### En hydraulique fluviale

Dans certains cas, la sélection d'une prédiction événementielle peut être triviale : la prédiction correspondant à un hydrogramme mesuré sera l'hydrogramme calculé dans la même section. En revanche, lorsque la donnée de référence est une hauteur d'eau mesurée par exemple, on peut la comparer à deux objets : un limnigramme au point de mesure ou bien une ligne d'eau au temps de la mesure (cf. figure 2.2(b), p. 46). Le choix va ainsi dépendre du domaine d'application visé.

Une typologie sommaire des écarts entre donnée de référence et prédiction est présentée dans le tableau ci-dessous.

<i>Donnée de référence</i>	<i>Écart éventuel</i>
Niveau d'eau	Sur niveau
Laisse de crue	Sur niveau
Ligne d'eau	{ Systématiquement de même sens sur niveaux Alterné sur niveaux
Ligne de lasses de crue	{ Systématiquement de même sens sur niveaux Alterné sur niveaux
Hydrogramme	Systématique en temps
Limnigramme	Systématique en temps

La compilation des comparaisons intra-événements s'effectue en fonction du domaine d'application visé. On donne ainsi en général plus d'importance à une comparaison de lignes d'eau à fort débit lorsque le modèle est destiné à la détermination de zones inondables. En revanche, une ligne d'eau à débit plus faible peut être utilisée pour déterminer la valeur du coefficient de résistance du lit mineur avant débordement.

La compilation des comparaisons inter-événements privilégiera ainsi de la même façon les crues importantes – ou tout du moins débordantes – lorsque l'application visée est la détermination des zones inondables.

26. Dans le cadre restreint de la tâche de *calage*. D'autres données de référence et d'autres événements peuvent être disponibles par ailleurs pour d'autres tâches, et notamment la tâche de validation du modèle.

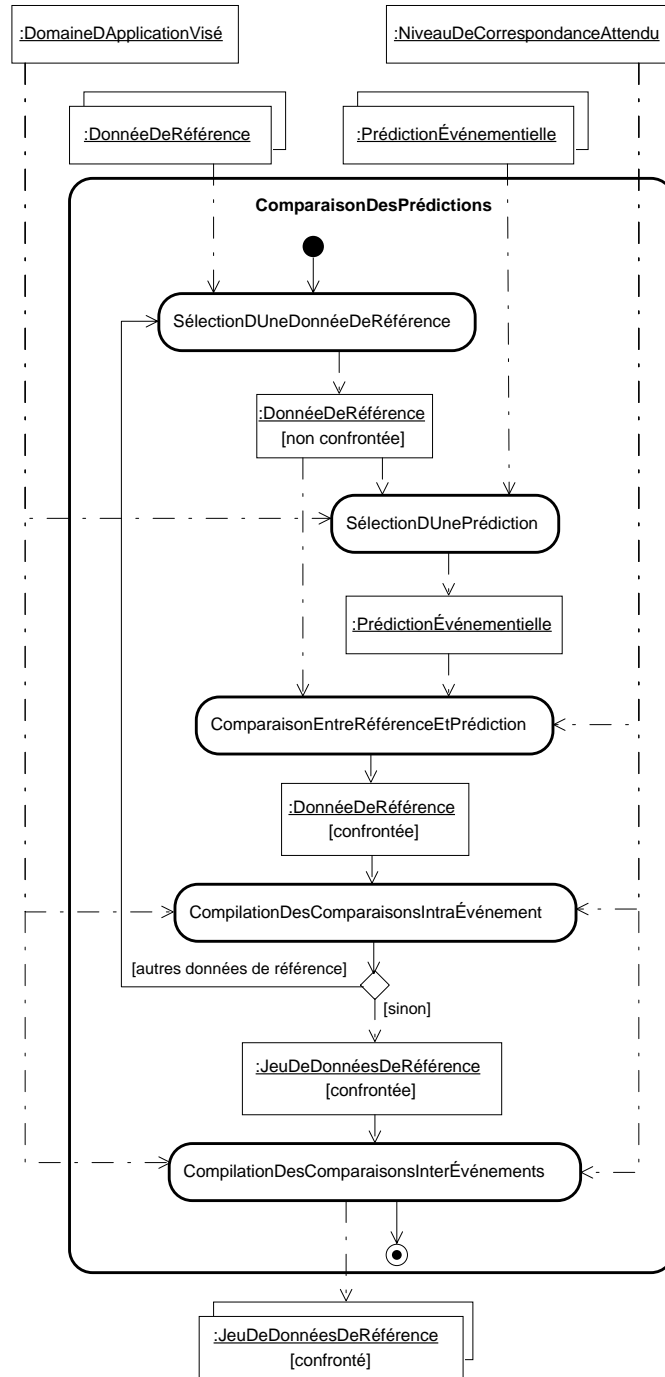


FIG. 4.13 – Étape de comparaison des prédictions – diagramme d'activités UML.

### 4.4.7 Ajustement des paramètres

L'étape d'ajustement des paramètres, représentée sur la figure 4.14, consiste à modifier les valeurs de certains paramètres en fonction des problèmes identifiés lors de la comparaison des prédictions événementielles aux données de référence. Trois types d'ajustement sont envisageables :

- *l'ajustement d'un type entier de paramètres distribués* vise à réduire un écart systématique sur l'ensemble du domaine modélisé ;
- *l'ajustement d'un seul paramètre distribué* s'applique dans le cas d'une divergence plus localisée, sans toutefois être obligatoirement sur la zone d'application de ce paramètre. L'effet de ce paramètre peut tout à fait s'étendre au-delà ;
- *l'ajustement d'un paramètre ponctuel* peut permettre de réduire un écart similaire au cas précédent en agissant uniquement sur la modélisation d'une structure ponctuelle.

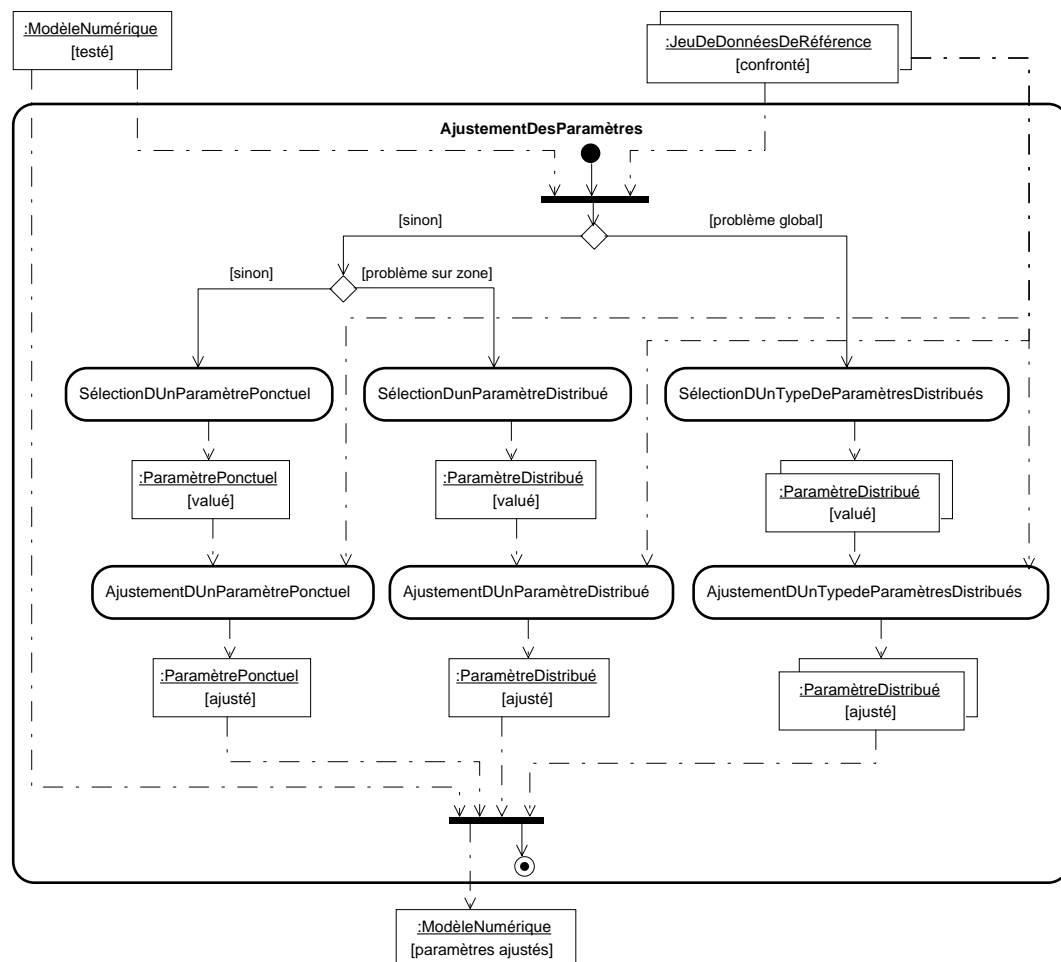


FIG. 4.14 – Étape d'ajustement des paramètres – diagramme d'activités UML.

## En hydraulique fluviale

Le type d'ajustement des coefficients de résistance est intimement lié au type d'écart identifié entre donnée de référence et prédiction correspondante, comme le montre le tableau ci-dessous. Il faut noter que les raisonnements indiqués dans ce tableau ne sont valables que lorsqu'un seul événement est utilisé pour le calage et que l'on ne dispose que d'une seule donnée de référence sur cet événement.

<i>Écart identifié</i>	<i>Type d'ajustement</i> <sup>27</sup>
Sur un niveau d'eau inférieur au niveau de débordement	Global sur $n_c$
Sur un niveau d'eau au-dessus du niveau de débordement	Global sur $n_c$ et $n_f$
Sur une laisse de crue	Global sur $n_c$ et $n_f$
Systématiquement de même sens sur les niveaux d'une ligne d'eau mesurée sous le niveau de débordement	Global sur $n_c$
Alterné sur les niveaux d'une ligne d'eau mesurée sous le niveau de débordement	Local sur $n_c$ du tronçon de résistance homogène le plus à l'aval parmi ceux concernés par l'écart
Local à l'amont d'un ouvrage complexe	Ponctuel sur $\mu$ de l'ouvrage
Systématiquement de même sens sur les niveaux d'une ligne d'eau mesurée sous le niveau de débordement	Global sur $n_c$ et $n_f$
Alterné sur les niveaux d'une ligne d'eau mesurée sous le niveau de débordement	Local sur $n_c$ et $n_f$ du tronçon de résistance homogène le plus à l'aval parmi ceux concernés par l'écart
Local à l'amont d'un ouvrage complexe	Ponctuel sur $\mu$ de l'ouvrage
Systématique en temps sur un hydrogramme d'une crue non débordante	Global sur $n_c$ des tronçons à l'amont
Systématique en temps sur un limnigramme d'une crue non débordante	Global sur $n_c$ des tronçons à l'amont
Systématique en temps sur un hydrogramme d'une crue non débordante	Global sur $n_c$ et $n_f$ des tronçons à l'amont
Systématique en temps sur un limnigramme d'une crue non débordante	Global sur $n_c$ et $n_f$ des tronçons à l'amont

Un ajustement local d'un coefficient de résistance peut être remplacé par celui d'un coefficient de débit d'un ouvrage situé à l'aval immédiat du tronçon concerné. L'ajustement d'un coefficient de débit ne doit bien sûr s'effectuer que si l'ouvrage considéré est éloigné des standards pour lesquels des valeurs théoriques ont été déterminées.

27. Les notations  $n_c$ ,  $n_f$  et  $\mu$  représentent respectivement un coefficient de résistance du lit mineur (*channel*), un coefficient de résistance du lit majeur (*floodplain*) et un coefficient de débit d'un ouvrage.

#### 4.4.8 Qualification du modèle

La tâche de qualification du modèle, représentée sur la figure 4.15, consiste à émettre un avis sur le modèle numérique calé, en fonction du domaine d'application visé et du niveau de correspondance attendu. Cet avis va dépendre de la concordance entre le niveau de correspondance attendu et les écarts obtenus entre jeux de données de référence et prédictions événementielles. Tous ces éléments peuvent être numériques ou symboliques (Refsgaard *et al.*, 2004, p. 11) :

*Performance statistics must comprise quantifiable and objective measures. However numerical measures cannot stand alone. Often expert opinions are necessary supplements.*

L'avis donné sur le modèle va bien sûr aussi dépendre du domaine d'application visé pour le modèle, comme l'a été la compilation des comparaisons effectuées entre données de référence et prédictions.

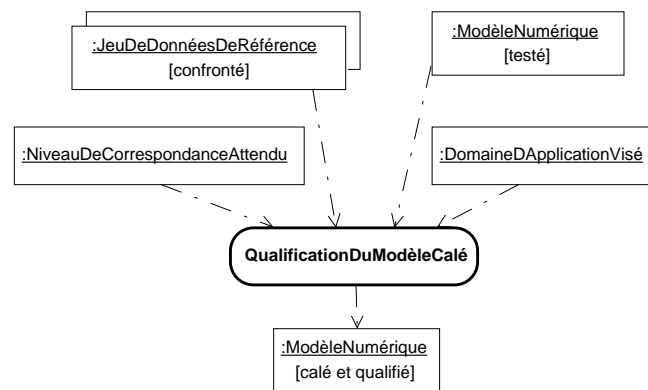


FIG. 4.15 – Étape de qualification du modèle – diagramme d'activités UML.

#### En hydraulique fluviale

Un modèle destiné à la prévision de crues peut être qualifié de bon s'il reproduit de manière satisfaisante – en terme de gradient de montée et/ou de pointe de crue – des hydrogrammes et/ou des limnigrammes mesurés à l'aval du domaine modélisé, et ceci pour différents types de crues.

Un modèle destiné à la détermination de zones inondables peut être qualifié de bon s'il reproduit de manière satisfaisantes des lignes d'eau mesurées au-dessus du niveau de débordement et/ou des laisses de crue, et ceci pour des crues importantes.

#### 4.4.9 Comparaison à d'autres travaux sur la formalisation du processus de calage

La tâche de calage de modèles numériques a fait l'objet de plusieurs travaux de formalisation, notamment au sein du projet HARMONIQUE, mais aussi dans le projet CLACIC.

## HARMONIQUA

La tâche de calage modélisée dans le cadre du projet HARMONIQUA est représentée sur la figure 4.16. Deux observations peuvent être effectuées : premièrement, dans la version finale, la tâche de calage est intimement liée à la tâche de validation de modèle et elles forment à elles deux la quatrième étape du processus de modélisation numérique appelée *Calibration and Validation*. Nous avons choisi dans ce mémoire de considérer la tâche de calage comme une entité propre afin de restreindre notre champ d'investigation. Nous avons ainsi préféré suivre de manière plus rigoureuse le référentiel terminologique de Refsgaard et Henriksen (2004) qui associe la tâche de calage à la construction du modèle et la tâche de validation à celle de simulation prédictive.

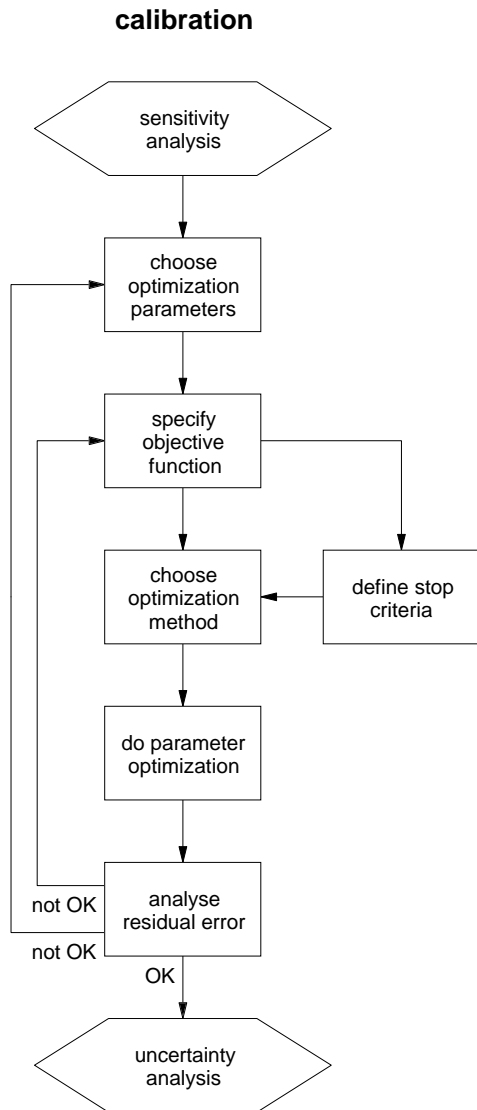
Deuxièmement, la tâche de calage modélisée dans le projet HARMONIQUA fait intervenir une sous-tâche d'« optimisation » qui inclut à la fois la méthode « manuelle » et l'optimisation automatique. Notre approche considère uniquement une approche manuelle puisqu'elle vise à modéliser les connaissances d'un expert devant réaliser cette tâche. Nous verrons dans le chapitre 7 comment prendre en compte l'utilisation d'une méthode d'optimisation automatique comme aide au calage.

## CLACIC

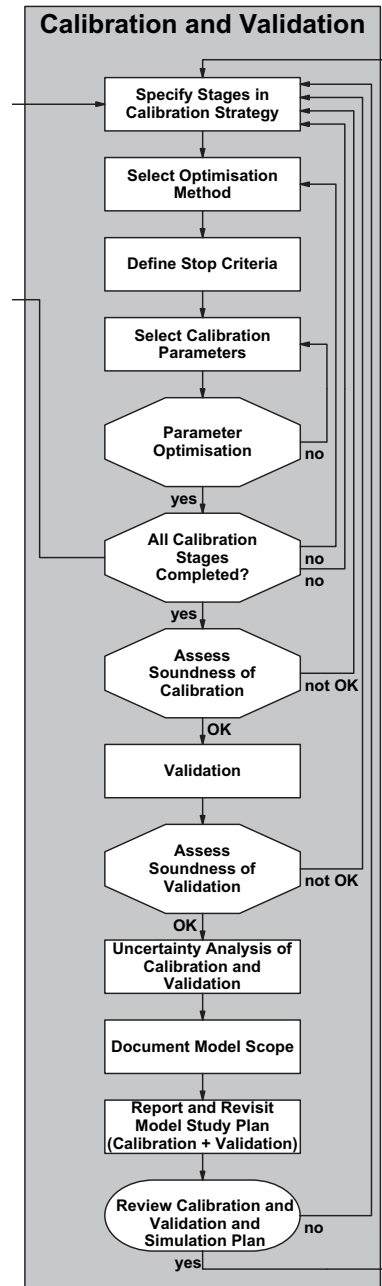
Sur la base d'entretiens avec des experts de plusieurs disciplines, Bruaux *et al.* (2003) définissent cinq sous-tâches – représentées dans la figure 4.17 – pour le calage de modèles :

- Préparer le calage correspond peu ou prou à la définition du domaine d'application visé et du niveau de correspondance attendu, que nous avons choisi de représenter en amont – et donc en dehors – de la tâche de calage. Elle inclut de plus implicitement la tâche d'affectation des données de notre paradigme et la partie de définition des paramètres consacrés aux paramètres ponctuels ;
- Initialiser le calage correspond à la sous-tâche d'attribution d'une valeur par défaut restreinte aux paramètres ponctuels ;
- Localiser le calage se rapporte à la définition des paramètres distribués et leur attribution d'une valeur par défaut ;
- Affiner le calage regroupe la tâche de lancement de simulation, la tâche de comparaison des prédictions et la sous-tâche d'ajustement des valeurs des paramètres ;
- Terminer le calage correspond à la tâche de qualification du modèle.

Par cette rapide comparaison des deux paradigmes, on constate que la modélisation d'une tâche repose sur des choix qui ne sont ici visiblement pas les mêmes. Ceci ne veut pas dire que l'un ou l'autre des paradigmes soit à rejeter. Ils correspondent seulement à deux visions de la même tâche qui privilégient chacune des aspects spécifiques. Cette comparaison montre aussi que les deux paradigmes contiennent substantiellement les mêmes éléments, ce qui permet de vérifier *a posteriori* la propriété paradigmatique du processus de calage que nous avons mise en avant par l'intermédiaire d'exemples d'autres domaines dans le tableau 4.2 p. 91.



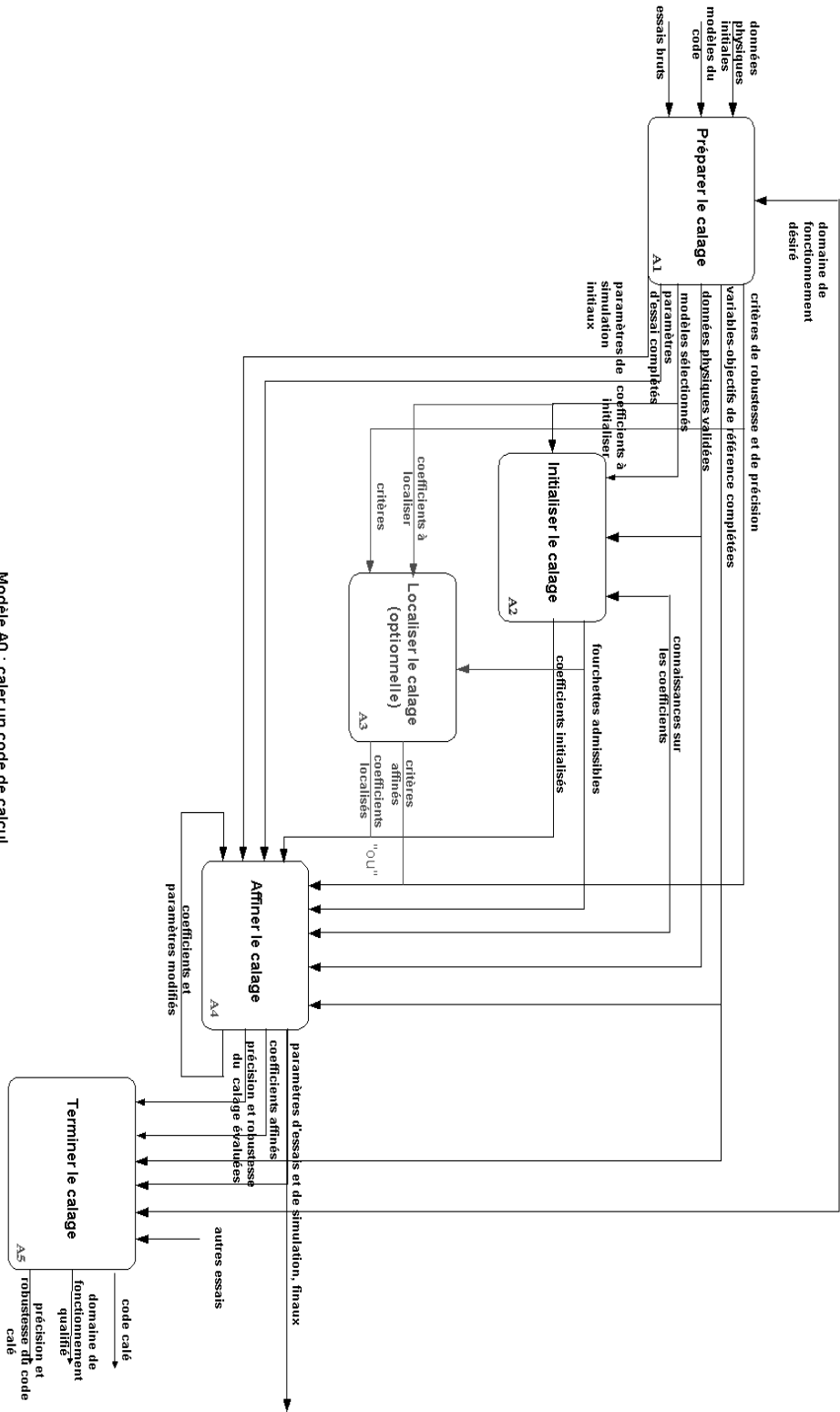
(a) En amont du projet, d'après van Waveren *et al.* (1999).



(b) Version finale du projet, d'après HARMONIQUA Consortium (2004).

FIG. 4.16 – Représentation de la tâche de calage au sein du projet HARMONIQUA. Dans la figure de droite, la flèche sortant vers la gauche est un retour vers la tâche Specify or Update Calibration + Validation Targets and Criteria de l'étape Model Set-Up. La flèche rentrant depuis la droite provient d'une décision « bad » par la tâche Assess Soundness of Simulation de l'étape Simulation and Evaluation.





Modèle A0 : caler un code de calcul

FIG. 4.17 – Représentation de la tâche de calage au sein du projet CIAGIC, d'après Bruaux et al. (2003) – Actigramme SADT.

## 4.5 Modélisation des connaissances sur l'utilisation du code MAGE

Les deux sections précédentes ont permis d'aborder l'essentiel des connaissances nécessaires pour effectuer un calage de modèle en hydraulique fluviale unidimensionnelle. Mais la *mise en œuvre opérationnelle* d'un calage nécessite l'utilisation du code de calcul à la base du modèle numérique concerné, pour réaliser la sous-tâche de *lancement de simulation*. Nous nous sommes concentrés sur un code de calcul afin de pouvoir réaliser un prototype opérationnel de système d'assistance au calage. Après avoir justifié le choix du code MAGE, cette section propose donc notre modélisation des connaissances descriptives et inférentielles sur son utilisation, puis une spécialisation de l'étape de réalisation d'une simulation avec ce code.

### 4.5.1 Choix du code MAGE

Parmi l'ensemble des logiciels présents sur le marché, dont un aperçu a été donné au chapitre 2, notre choix s'est porté sur le code MAGE pour les raisons suivantes :

- premièrement, ce code implémente le modèle conceptuel communément admis pour les écoulements unidimensionnels et décrit dans le chapitre 2. Ses spécificités concernant la détermination de la débitance ont été évoqués dans ce même chapitre ;
- deuxièmement, la structure de ce code permet une intégration aisée dans une chaîne de traitement. En effet, il se présente sous la forme de programmes exécutables en ligne de commande. De plus, ces exécutables utilisent et produisent des fichiers texte, ce qui facilite la lecture et l'écriture d'informations et leur traduction en terme d'objets du domaine ;
- enfin, ce code a été créé au CEMAGREF et son développement est assuré par un chargé de recherche de l'unité Hydrologie-Hydraulique. La proximité du développeur du code utilisé a été un avantage majeur dans la modélisation des connaissances associées. En effet, le développeur d'un code est son premier utilisateur et connaît donc mieux que quiconque les heuristiques associées à son utilisation.

### 4.5.2 Connaissances descriptives – fichiers

Les fichiers informatiques regroupent toute la connaissance sur les éléments liés à l'utilisation du code. Un extrait de notre modélisation de ces fichiers est donné sur la figure 4.18. L'annexe F propose un aperçu de la modélisation de l'ensemble des types de fichiers utilisés par le code MAGE. Trois types de fichiers peuvent ainsi être identifiés :

- les fichiers contenant des représentations des *objets du domaine*, dans un format spécifique au code. Les représentations des données du système ainsi que celles des paramètres du modèle sont contenues dans des fichiers d'entrée. Les représentations des objets constituant les données d'entrée sont elles aussi contenues dans des fichiers d'entrée, alors que ceux constituant les prédictions événementielles sont contenus dans des fichiers de sortie ;
- les fichiers des différents programmes exécutables formant le code de calcul même, avec d'autres fichiers nécessaires à leur exécution : fichiers de paramètres numériques et fichiers « input » en mode batch ;

- les fichiers de listing de la simulation, incluant non seulement des informations sur sa progression, mais aussi les avertissements et éventuelles erreurs survenues au cours de celle-ci.

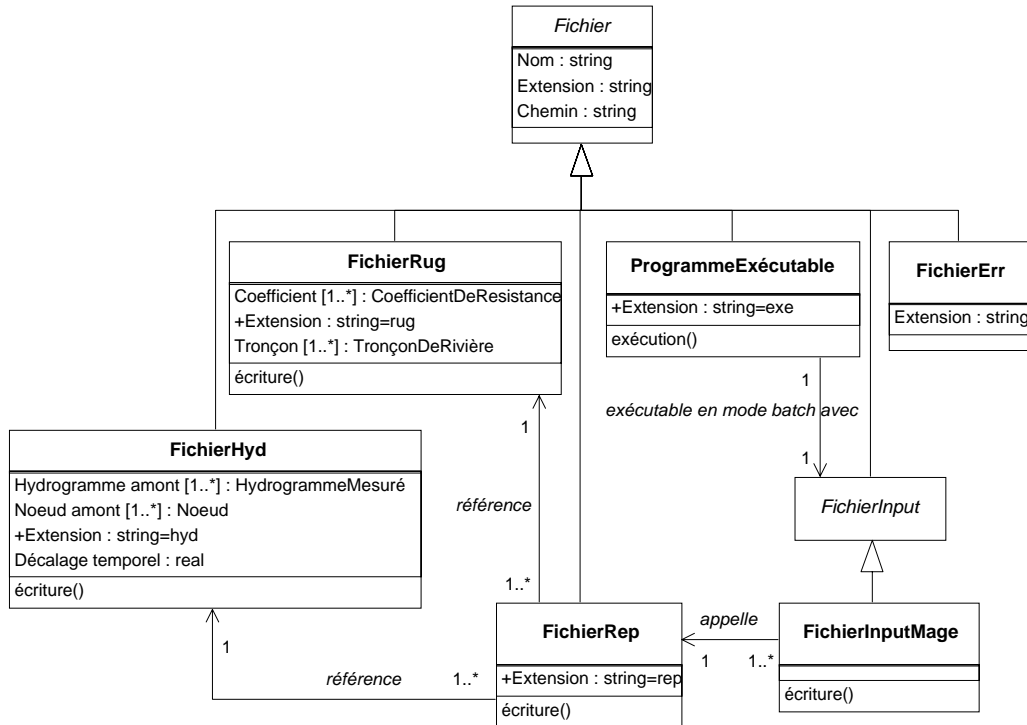


FIG. 4.18 – Extrait de notre modélisation des fichiers utilisés par le code MAGE. Les fichiers *FichierHyd* et *FichierRug* contiennent respectivement les représentations des hydrogrammes d'entrée et des coefficients de résistance. L'exécution d'un *ProgrammeExécutable* s'effectue par l'intermédiaire d'un *FichierInput*. Pour le programme *Mage5.exe*, le fichier *InputMage* fait appel au fichier répertoire *FichierRep* référençant notamment les fichiers *FichierHyd* et *FichierRug*.

### 4.5.3 Connaissances inférentielles – exécution des programmes

Lors d'une simulation, ce sont les programmes, les exécutables, qui permettent de créer, d'inférer de nouvelles connaissances à partir de celles contenues dans des fichiers d'entrée. La description précise du fonctionnement *externe* de chacun des programmes est donnée en annexe G. Le code de calcul MAGE est ainsi composé de plusieurs programmes, pour la plupart compilés à partir de code écrit en langage FORTRAN et exécutables en ligne de commande. L'entrée peut ainsi être redirigée vers un fichier « input » pour permettre une exécution en mode batch.

Les sections 4.5.4 et 4.5.5 présentent l'utilisation de ces différents exécutables pour la réalisation de deux sous-tâches du calage dont la spécialisation pour le code utilisé s'est avérée nécessaire : la *réalisation d'une simulation*, et la *comparaison entre référence et prédiction*.

#### 4.5.4 Modélisation de l'étape de réalisation d'une simulation

La figure 4.19 présente un exemple de spécialisation de l'étape de *réalisation d'une simulation* avec le code MAGE dans sa version 6. Nous avons ainsi modélisé un opérateur d'interopérabilité pour passer des objets du domaine nécessaires à la réalisation de cette étape (jeu de données d'entrée) aux fichiers d'entrée requis pour l'exécution du code. De la même façon, un autre opérateur d'interopérabilité permet de passer des fichiers de sortie du code aux objets du domaine correspondants (jeu de prédictions événementielles).

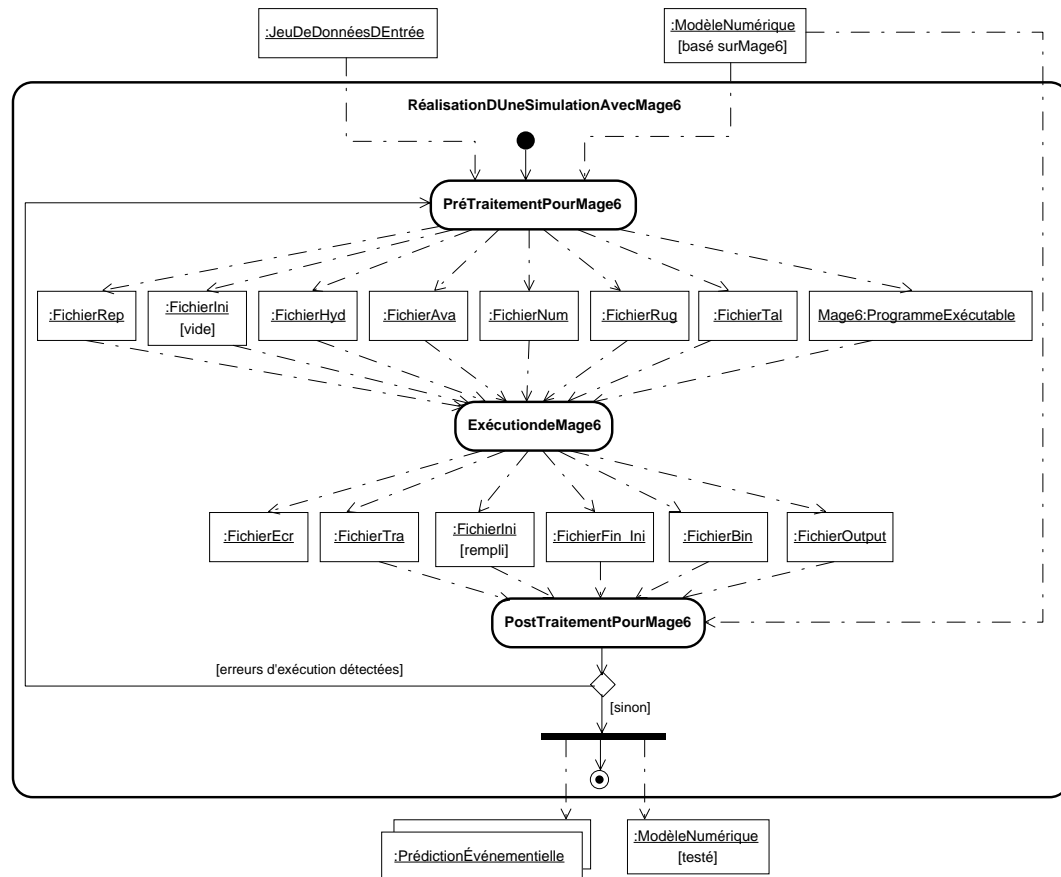


FIG. 4.19 – Modélisation simplifiée de l'étape de réalisation d'une simulation, spécialisée pour le code MAGE dans la version 6. Pour des questions de lisibilité, nous avons représenté ici seulement le jeu de fichiers minimum pour faire fonctionner le code.

#### 4.5.5 Modélisation de la sous-tâche de comparaison entre référence et prédiction

Si la mise en œuvre de l'étape de réalisation d'une simulation nécessite clairement sa spécialisation pour un code donné, il en va autrement d'une autre tâche du processus comme la comparaison entre référence et prédiction, qui pourrait être réalisée de manière indépendante du code de calcul utilisé. Nous avons choisi ici d'utiliser une *méthode visuelle de comparaison* entre une donnée de référence et la prédiction associée. La mise en œuvre d'une telle méthode était facilitée par l'utilisation de deux exécutable

appartenant à la chaîne de traitement du code MAGE : `Mage_Extraire.exe` permet d'obtenir un fichier texte du type `FichierRes` correspondant à une prédiction donnée, et `ResView` permet ensuite de visualiser graphiquement le contenu de plusieurs `FichierRes` simultanément. Nous avons donc encapsulé ces exécutables et créé une procédure de conversion d'une donnée de référence en `FichierRes`. La figure 4.20 présente notre modélisation de la sous-tâche de comparaison entre référence et prédiction.

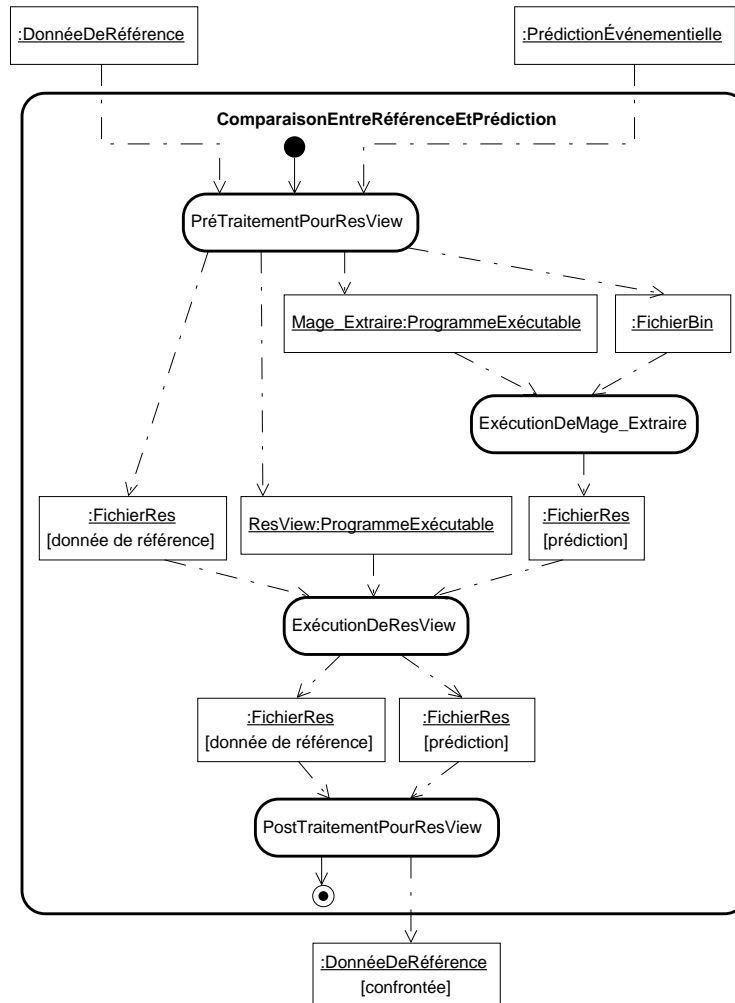


FIG. 4.20 – Modélisation simplifiée de la sous-tâche de comparaison entre référence et prédiction, spécialisée pour le code MAGE. On peut noter ici encore la présence nécessaire d'opérateurs d'interopérabilité (`PréTraitementPourResView` et `PostTraitementPourResview`), pour le passage entre connaissances du domaine et connaissances liées au code de calcul MAGE.

#### 4.5.6 Comparaison à d'autres travaux sur la formalisation de connaissances sur des codes

Dans les sections précédentes, nous avons présenté une modélisation de connaissances sur l'utilisation d'un code de calcul. À ce titre, nous nous sommes intéressés quasiment uniquement au fonctionnement externe de ce code et de ces différents exé-

cutables. Nous n'avons donc pas considéré les connaissances *contenues* dans ce code de calcul. Cette section vise à présenter des recherches complémentaires à celles présentées ici, et qui concernent de manière plus générale la représentation de connaissances liées à un code de calcul. Ces recherches sont ainsi orientées sur la capitalisation de connaissances sur un code de calcul au sein d'une entreprise. Elles utilisent ainsi des méthodes issues du domaine de la gestion des connaissances<sup>28</sup> (voir par exemple Ermine, 2003).

## MASK

La gestion des connaissances au sein d'une entreprise a fait l'objet de nombreuses recherches depuis le début des années 1990, pour permettre à l'entreprise d'explicitier et de mémoriser ses savoir-faire. Dans cette optique, plusieurs générations de méthodes ont été développées en France : la méthode MKSM<sup>29</sup> (Ermine *et al.*, 1996) a ainsi évolué pour laisser la place à la méthode MASK<sup>30</sup> (Barthelmé *et al.*, 1998).

MASK est une « méthode d'analyse préalable à la mise en place d'un système opérationnel de gestion des connaissances » Ermine (2003, p. 122). Cette méthode est basée sur l'explicitation de connaissances – recueillies principalement à partir d'entretiens – sous forme de *modèles de connaissances*. Chacun de ces modèles permet d'explicitier un type précis de connaissances sous forme d'un ou plusieurs diagrammes.

La compilation de ces modèles constitue un *livre de connaissances* matérialisant les connaissances jusqu'alors tacites sur le système considéré. Ce système peut être une structure industrielle, comme on peut le voir au travers des différentes applications des méthodes MKSM et MASK dans de grandes entreprises françaises, mais aussi un « simple » objet comme un code de calcul.

## Application à des codes de calcul

Dans un travail de thèse, Picard (2002) a utilisé la méthode MKSM pour la capitalisation de connaissances sur des codes de calcul, au sein d'EDF et du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA-DAM). Il a ainsi élaboré une méthode opérationnelle pour réaliser cette capitalisation en adaptant la méthode MKSM aux connaissances sur les logiciels de calcul scientifique (Picard *et al.*, 1999*a,b*).

### *Étude d'un code de calcul au microscope*

La méthode MKSM se base sur les différentes visions d'un système apportées par un *microscope* (voir Ermine, 1996). Le système est ainsi étudié selon les trois<sup>31</sup> points de vue du triangle sémiotique utilisé par Le Moigne (1990) : *information*, *contexte* et *signification*. L'adaptation de ce microscope à l'étude des codes de calcul par Picard *et al.* (1999*a*) est présentée sur la figure 4.21.

### *Méthode de construction d'un livre de connaissance sur un code*

À l'aide des différents points de vue de ce microscope, Picard (2002) a pu proposer de nouveaux modèles de connaissances de la méthode MKSM spécifiques à l'étude de

28. Le terme anglais est *Knowledge Management*.

29. Pour *Methodology for Knowledge System Management*.

30. Pour Méthode d'Analyse et de Structuration des Connaissances.

31. Nous ne rentrerons pas ici dans le détail des points de vue *ontologique*, *phénoménologique* et *génétique* décomposant chacun des points de vue principaux. Le lecteur intéressé est invité à se rapporter à l'ouvrage d'Ermine (1996).

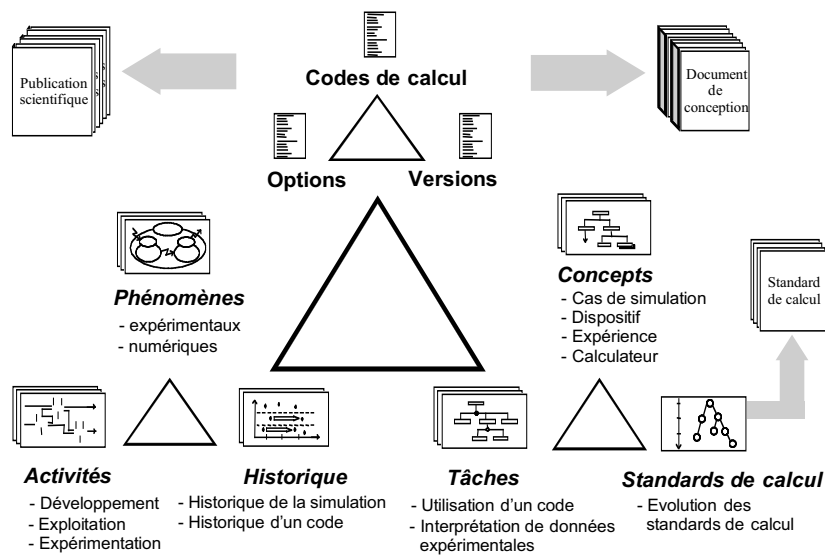


FIG. 4.21 – *Macroscopie MKSM adaptée aux codes de calcul, d'après Picard et al. (1999a).* A chaque sommet du triangle central correspond un point de vue : le sommet supérieur représente le point de vue information, le sommet inférieur gauche représente le point de vue contexte et le sommet inférieur droit le point de vue signification.

codes de calcul. Tous ces modèles permettent de *structurer* les connaissances liées à un code de calcul à partir d'entretiens avec les concepteurs et les utilisateurs de ce code, et de les exprimer sous forme de diagrammes spécialisés. Un livre de connaissances sur un code se compose ainsi de cinq parties : un historique de simulation numérique, une présentation générale du code de calcul, l'évolution des versions et les choix de conception, la présentation générale d'une option du code, et enfin l'exploitation du code.

La dernière partie d'un livre de connaissances concernant l'exploitation du code nous intéresse particulièrement, puisqu'elle vise à présenter le contexte des études dans lesquelles est employée la simulation numérique. Malheureusement, Picard (2002) propose seulement des éléments prospectifs sur ces aspects<sup>32</sup> et n'a pu mettre en œuvre cette partie du livre de connaissances au travers de ses cas d'étude. Nous n'avons donc pas pu nous inspirer de ces travaux pour réaliser notre modélisation des connaissances liées au calage de modèles numériques.

### Commentaires

L'approche décrite dans les paragraphes précédents permet d'avoir une vision plus globale de la gestion opérationnelle des connaissances sur un code. Cette gestion peut ainsi débiter par une capitalisation dans un livre de connaissances. Cette première étape peut permettre soit de coupler le code de calcul à un système d'aide à la décision existant (voir par exemple Picard *et al.*, 1997), soit d'utiliser un système informatique approprié pour les mettre en œuvre de manière opérationnelle (Moisan et Ermine,

32. Il propose d'utiliser le modèle de l'historique de la méthode MKSM pour « placer en regard des différentes versions d'un code les différents "cas de simulation" valides (ou non) » et « donner une traçabilité de la qualification des modèles de simulation ».

2000). Un tel système peut ainsi être un système à base de connaissances pour le *pilotage de programmes*. Nous utiliserons dans le chapitre suivant des outils d'intelligence artificielle basés sur des techniques de pilotage de programmes pour construire notre premier prototype de système d'assistance au calage.

## 4.6 Conclusions

Ce chapitre a permis de construire une formalisation cohérente des connaissances inventoriées et analysées tout au long des chapitres de la partie I, sous une forme essentiellement graphique à l'aide du formalisme UML. Nous disposons à présent d'une modélisation des connaissances *descriptives* et *inférentielles* mises en œuvre au cours de la tâche de calage de modèles hydrauliques.

Cette modélisation constitue à elle seule un résultat important de cette thèse, puisqu'elle permet de transmettre aisément un savoir-faire qui s'acquiert actuellement uniquement au prix de longues années d'expérience. Elle constitue donc une véritable *capitalisation de connaissances* sur trois sujets complémentaires :

- *le calage d'un modèle numérique* dans un cadre générique, par l'intermédiaire de l'ontologie ONTOVAL et la formalisation du paradigme actuel de calage. Ces éléments peuvent ainsi être aisément spécialisés pour construire une formalisation du calage de modèles numériques dans d'autres domaines ;
- *le calage d'un modèle hydraulique unidimensionnel*, avec l'ontologie ONTOHYD et les connaissances du niveau précédent. Cette partie constitue les bases d'un « code de bonnes pratiques » pour le calage de modèles hydrauliques ;
- *l'utilisation du code MAGE*, par la représentation des fichiers et de leurs liens avec l'ontologie ONTOHYD et par l'insertion de l'exécution des programmes dans le paradigme pour le calage de modèles numériques. Nous proposons ainsi une alternative à la partie du traditionnel manuel de l'utilisateur concernant le déroulement d'une simulation.

Cette modélisation de connaissances fournit ainsi toutes les *spécifications* pour la construction d'un système d'assistance au calage de modèles hydrauliques. Nous présentons dans le chapitre suivant l'implémentation de ces connaissances au sein de prototypes d'un tel système.





## Chapitre 5

# Implémentation d'un système opérationnel

« *Fifth-generation modelling [...] can be characterised as a fusion of earlier work in the area of Computational Hydraulics (CH) and work in the area commonly referred to nowadays as Artificial Intelligence (AI):*

Fifth-generation modelling = (CH)  $\cup$  (AI) »

Michael Barry ABBOTT<sup>1</sup>

C E CHAPITRE est consacré à l'implémentation au sein d'un système informatique des connaissances modélisées dans le chapitre précédent. Cette implémentation vise à mettre en œuvre de manière *opérationnelle* le « code de bonnes pratiques » pour le calage de modèles hydrauliques développé dans le chapitre 4. Elle doit constituer une intégration de raisonnements symboliques – les connaissances descriptives et inférentielles – et numériques – le code de calcul. Après avoir présenté les différentes voies envisageables pour cette intégration, nous nous intéressons plus spécifiquement aux techniques de *pilotage de programmes* développées à l'INRIA. Nous utilisons ensuite ces techniques pour la réalisation d'un premier prototype de système d'assistance au calage de modèles hydrauliques. Les grandes lignes de ce prototype ont fait l'objet d'un article dans le *Journal of Hydroinformatics* (Vidal *et al.*, 2005). Enfin, nous abordons le développement d'outils d'intelligence artificielle dédiés à la problématique spécifique de calage de modèles numériques. Ces techniques sont mises en place pour faciliter le développement de systèmes à base de connaissances pour le calage de modèles numériques, indépendamment du domaine considéré.

### 5.1 Intégration symbolique/numérique

L'intelligence artificielle et la simulation numérique tendent toutes deux à proposer des solutions pour l'aide à la décision, suivant des approches différentes mais complémentaires. Alors que la simulation numérique apporte des informations foncièrement

---

1. *Hydroinformatics – Information Technology and the Aquatic Environment*. Avebury Technical, Aldershot, U.K., p. 28.

quantitatives, l'intelligence artificielle s'attache à des aspects plus qualitatifs pour la résolution de problèmes similaires (Doukidis et Angelides, 1994).

Nous tentons dans ces travaux de tirer parti de la complémentarité de ces deux approches pour l'aide à la résolution de la tâche de calage de modèles numériques. Cette section vise à présenter notre approche de l'intégration de ces deux domaines au niveau conceptuel. L'intégration au niveau technique sera abordée dans la section 5.2.

### 5.1.1 Définition des connaissances à intégrer

Le prototype d'assistance au calage doit ainsi intégrer deux types de connaissances : tout d'abord celles que nous avons modélisées dans le chapitre précédent, et qui concernent les aspects heuristiques liée à la résolution de la tâche de calage, mais aussi *indirectement* celles contenues dans le code de calcul lui-même. En effet, un code de calcul n'est qu'une synthèse de connaissances accumulées notamment sur le domaine, par la programmation informatique d'un modèle conceptuel. Abbott (1993) décrit cette *encapsulation des connaissances* du domaine dans les codes de calcul dans les disciplines liés à l'étude du cycle de l'eau : hydraulique, hydrologie et ressources en eau. Cette encapsulation, si elle permet de produire de nouvelles connaissances, provoque malheureusement un masquage des connaissances qui ont servi à la construction du code de calcul (Abbott, 1993, p. 24) :

*The relevant knowledge has gone into hiding.*

En effet, quel utilisateur d'un code d'hydraulique peut aujourd'hui se targuer de maîtriser l'ensemble des lois et hypothèses hydrauliques implémentées<sup>2</sup>? Picard (2002) a utilisé des techniques d'ingénierie des connaissances pour tenter de rendre à nouveau *visible et réutilisable* ce type de connaissances encapsulé dans les codes, par le biais de la construction d'un *livre de connaissances* (cf. chapitre précédent, section 4.5.6). Comme évoqué plus tôt, cette problématique n'est pas abordée dans nos travaux, et nous considérons ici le code de calcul comme une boîte noire, une « méthode de résolution fermée », pour reprendre les termes de Morel (1997).

### 5.1.2 Objectifs d'intégration

Des expériences d'intégration des domaines de l'intelligence artificielle et de la modélisation numérique ont été effectuées depuis une vingtaine d'années selon divers objectifs. Nous nous positionnons ici par rapport aux initiatives réalisées dans le sens d'une assistance globale à la modélisation et plus précisément à celles réalisées dans le sens d'une assistance à la validation opérationnelle.

#### Assistance à la modélisation numérique

Häuslein et Page (1991) distinguent sept points de la modélisation numérique pour lesquels les systèmes à base de connaissances peuvent apporter une aide : la sélection de méthodes et de langages de simulation appropriés, la sélection de modèles et de composants existants, des instructions pour la construction de modèles<sup>3</sup>, la conception

---

2. Et l'on pourrait aussi parler des compétences en informatique et en calcul numérique nécessaires au codage de ces lois et hypothèses.

3. Sur ce point précis, le lecteur pourra se référer à un article de Murray et Sheppard (1988).

d'essais de simulation, l'analyse des résultats de simulation, l'utilisation du code de simulation, et enfin le lancement d'essais de simulations.

Si les trois premiers points identifiés par Häuslein et Page concernent des procédures hors de notre champ d'étude, les deux suivants s'inscrivent tout à fait dans la problématique de calage de modèle. La *conception d'essais de simulation* correspond au choix des événements à simuler et à la détermination de la manière de les simuler : en hydraulique, les crues utilisées pour réaliser un calage doivent tout d'abord être choisies, puis les données d'entrée idoines – conditions limites et éventuellement condition initiale – déterminées. De même, la comparaison des résultats de simulation avec des données de référence fait partie intégrante de l'*analyse des résultats de simulation* décrit par Häuslein et Page. Le système d'assistance au calage devra ainsi fournir une aide sur ces deux sous-tâches du calage de modèle.

Les deux derniers points concernent quant à eux uniquement le code de simulation, mais l'on a vu dans les conclusions du chapitre précédent que l'*utilisation du code de simulation* et le *lancement d'une simulation* font partie intégrante du processus de calage. Ces deux points vont de fait eux aussi être abordés dans le cadre du système développé pour l'assistance à l'utilisation du code de calcul MAGE.

Plusieurs environnements à base de connaissances pour la modélisation numérique ont été développés dans la dernière décennie (Zeigler *et al.*, 1991; Rozenblit et Janowski, 1991; van Zuylen, 1993; Williams *et al.*, 1996). La section suivante s'intéresse aux travaux portant plus spécifiquement sur la validation opérationnelle.

### Assistance à la validation opérationnelle

Sargent (1986) a exploré les différents apports possibles de l'intelligence artificielle en terme d'aide à la mise en œuvre des différentes procédures d'évaluation du référentiel de Schlesinger *et al.* (1979) – décrit à la page 5 du chapitre 1 – et notamment pour la validation opérationnelle. Il recense ainsi pour cette procédure trois objectifs d'assistance éventuels :

- *identifier les techniques de validation appropriées à la problématique considérée.* Dans nos travaux, cette identification a été réalisée dans le chapitre 1 (figure 1.4, p. 10) : la validation opérationnelle inclut les techniques de calage de modèle, de validation de modèle et partiellement de vérification du code. Nos travaux s'intéressent ici seulement à la technique de calage de modèle ;
- *déterminer les procédures et les tests à réaliser dans le cadre de la technique considérée.* Nous avons déterminé ces éléments dans le chapitre précédent, suivant un processus « manuel » d'ingénierie des connaissances. Nous avons considéré des tests et procédures basés sur une connaissance du domaine, ici l'hydraulique fluviale<sup>4</sup> ;
- *assister l'opérateur dans la réalisation de ces tests et procédures.* Ce dernier objectif correspond tout à fait à celui des travaux présentés dans la suite de ce chapitre. Nous visons en effet à développer un système permettant d'assister un utilisateur d'un code d'hydraulique à mener à bien la tâche de calage de modèle. La section 5.3 présentera un prototype d'un tel système, appelé CARMA-1.

4. Une étude de la littérature montre deux autres angles d'attaque de ce sujet : tout d'abord une approche purement statistique de comparaison entre résultats et données de référence (voir par exemple Schruben, 1980; Deslandres et Pierreval, 1991), mais aussi quelques travaux basés sur une caractérisation du comportement du modèle (voir Findler et Mazur, 1989; Birta et Nur Özmizrak, 1996)

### 5.1.3 Modes d'intégration

Une fois l'objectif déterminé, l'utilisation conjointe d'un code de calcul et d'un système à base de connaissances passe par le choix d'un mode d'intégration de ces deux entités.

#### Choix du mode d'intégration

O'Keefe (1986) a proposé une classification des modes d'intégration d'un tel couple, qui peut se ramener aux quatre situations suivantes :

1. *le système à base de connaissances sert d'interface intelligente* au code de calcul (voir par exemple van Zuylen, 1993). La plupart des interfaces des codes de calcul en hydraulique comportent aujourd'hui une part plus ou moins grande de connaissances, représentées le plus souvent sous la forme d'*objets*. Une telle interface commune à l'exécution de simulations avec les codes MAGE et RUBARBE<sup>5</sup> a ainsi été réalisée au CEMAGREF parallèlement à nos travaux (Tardy, 2003; Le Drogo, 2004) ;
2. *les deux coopèrent*, éventuellement à l'intérieur d'un système d'aide à la décision. Ce mode nécessite un couplage « fort » entre les deux systèmes, opposé à notre vision systémique de la simulation, dans lequel le code de calcul est considéré comme une boîte noire ;
3. *l'un est inclus dans l'autre*. Ce dernier cas de figure implique un couplage encore plus fort que dans la situation précédente entre code de calcul et système à base de connaissances ;
4. *l'un peut faire appel à l'autre*, pour résoudre un problème particulier. Nous avons choisi ce dernier mode d'intégration suivant l'analyse effectuée dans le chapitre précédent. Notre système à base de connaissances fera donc appel au code de calcul pour les tâches de réalisation d'une simulation et de comparaison entre référence et prédiction. Les paragraphes suivants présentent d'autres exemples d'un tel mode d'intégration dans le domaine de l'hydroinformatique.

#### Comparaison à d'autres expériences d'intégration en hydroinformatique

Au début des années 1990, des travaux de recherche se sont engagés au CETMEF sur le pilotage de codes numériques. Cette première approche s'est concrétisée par un prototype de pilote de codes hydrodynamique et sédimentaire au fonctionnement en grande partie interactif (Brunelli, 1993; Brunelli *et al.*, 1994). Les fonctionnalités attendues d'un tel prototype portaient sur trois phases principales de pilotage : le pré-traitement, le calcul et le post-traitement. Seule la phase de calcul a été mise en œuvre dans le prototype, qui permet grâce à une architecture de type « *blackboard* » de piloter les deux codes – hydrodynamique et sédimentaire – en parallèle. Le système pilote décide ainsi à partir du tableau noir de faire appel à l'un ou à l'autre des codes, et ce à différentes étapes de la simulation.

Morel (1997) a quant à lui mis en place le pilotage d'un code de calcul d'hydraulique fluviale unidimensionnelle appelé CODE1D<sup>6</sup>. Le pilotage de ce code s'inscrit dans

5. RUBARBE est un code d'hydraulique unidimensionnelle fonctionnant en régime transitoire fluvial et torrentiel, et intégrant des équations de transport solide (voir El Kadi Abderrezzak et Paquier, 2004).

6. Ce code est actuellement distribué par le CETMEF sous le nom de LIDO (pour plus de précisions, voir Lebossé et Ladreyt, 2000; Goutx et Ladreyt, 2000).

un Système d'Aide à la Prévision et au Diagnostic<sup>7</sup> pour la gestion du risque inondation. Le code de calcul intervient donc seulement comme une méthode de résolution d'une sous-tâche spécifique d'un système d'aide à la décision (Morel et Rouas, 1998). L'intégration est réalisée par les données, suivant une approche orientée objet similaire à celle que nous avons décrite dans le chapitre précédent.

Cette dernière expérience fait de plus intervenir la notion d'encapsulation d'un code de calcul sous forme d'un *composant* décrit par sa fonction et ses arguments (entrées et sorties). Cette approche correspond à celle adoptée par l'INRIA pour le *pilotage de programmes*, approche que nous allons détailler dans la section suivante et utiliser pour la réalisation du prototype CARMA-1.

## 5.2 Notions de pilotage de programmes

Des recherches sont menées depuis plus de 10 ans à l'INRIA – et plus précisément au sein du projet ORION<sup>8</sup> – sur la réutilisation de programmes à l'aide de systèmes à base de connaissances. Ces recherches, résumées ci-dessous, ont conduit à la mise au point d'outils dédiés au pilotage de programmes que nous décrivons ensuite succinctement.

### 5.2.1 De la réutilisation de code au pilotage de programmes

Le passage de la deuxième à la troisième génération de modélisation en hydroinformatique correspond à l'apparition de codes de calcul *indépendants* du système modélisé. Ces codes de calcul peuvent ainsi être réutilisés pour la construction de différents modèles numériques. Un thème de recherche en intelligence artificielle s'est ainsi mis en place autour de la réutilisation de programmes divers (van den Elst *et al.*, 1994).

#### Principe du pilotage

La tâche de *pilotage de programmes* consiste à utiliser au mieux des programmes existants pour satisfaire une requête de l'utilisateur (Marcos *et al.*, 1998). Cette tâche doit tout d'abord produire un plan d'exécution, c'est-à-dire un enchaînement donné de programmes, nécessaire pour satisfaire l'objectif considéré. Ensuite, le déroulement de ce plan doit être contrôlé pour aboutir aux résultats escomptés.

Le mécanisme de résolution de problème associé à la tâche de pilotage de programmes est représenté sur la figure 5.1. La première phase de cette résolution correspond à l'*identification* d'un objectif à réaliser par un enchaînement de programmes à partir de la requête de l'utilisateur. La deuxième phase consiste en la *construction* de l'enchaînement des programmes selon un plan. Chaque programme de ce plan va faire l'objet d'une *exécution* pour produire des résultats. Des jugements sont ensuite effectués sur les résultats produits par ce programme au cours de la phase d'*évaluation*. Si ces jugements l'autorisent, le programme suivant dans le plan est exécuté, et ceci jusqu'à la fin du plan. Dans le cas de jugements défavorables, une *réparation* est lancée pour soit réexécuter le programme courant en vue d'obtenir de meilleurs résultats, soit reconsidérer le plan établi et construire un nouvel enchaînement de programmes.

7. Le système SAPREDI a été évoqué précédemment (chapitre précédent, p. 97) au sujet de la terminologie pour la gestion du risque inondation sur laquelle il se base.

8. Environnements de résolution de problème pour des systèmes autonomes ([www-sop.inria.fr/orion/](http://www-sop.inria.fr/orion/)).

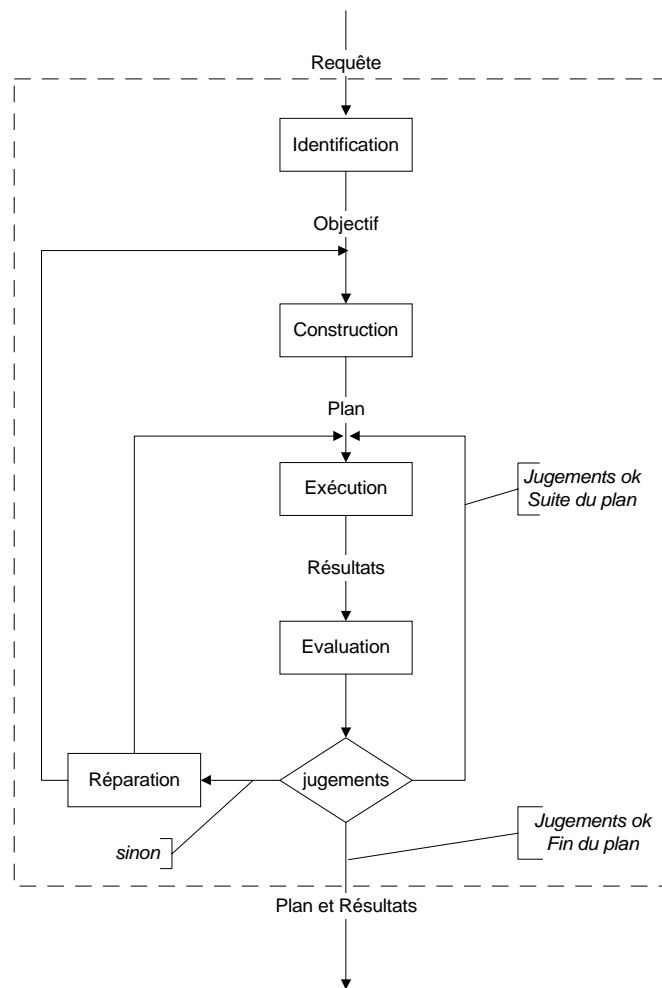


FIG. 5.1 – Mécanisme de résolution de problème pour la tâche de pilotage de programmes. Le trait pointillé correspond à l'étendue du moteur de pilotage de programmes.

### Premiers moteurs

Si les quelques expériences en hydroinformatique évoquées dans la section précédente s'étaient effectuées avec un code unique, les travaux menés à l'INRIA sont quant à eux consacrés à une chaîne complète de traitement, et donc à un enchaînement de programmes. Des moteurs de systèmes à base de connaissances pour le pilotage de programmes ont ainsi été développés suivant cette approche. Parmi eux, on peut citer OCAPI<sup>9</sup> (Clément et Thonnat, 1993; Thonnat *et al.*, 1994; van den Elst *et al.*, 1995) et PLANETE (Shekhar *et al.*, 1994; Moisan *et al.*, 1995*b*). Ces moteurs de pilotage de programmes permettent d'automatiser la planification et le contrôle d'exécution de programmes existants, indépendamment de toute application (Thonnat et Moisan, 1995; Moisan *et al.*, 1995*d*).

9. Pour *Outil de Contrôle Automatique de Procédures Images* (Moisan *et al.*, 1995*a,c*).

## Une plate-forme pour la génération de moteurs

L'expérience accumulée avec le moteur OCAP a permis de définir une librairie d'éléments communs pour construire des moteurs de pilotage de programmes (Vincent *et al.*, 1996). Cette librairie a été intégrée dans une plate-forme – nommée LAMA – d'aide à la construction de moteurs de systèmes à base de connaissances (Moisan, 1998). De nombreux moteurs ont pu être construits à partir de cette plate-forme (Crubézy *et al.*, 1998; Thonnat *et al.*, 1999) : PULSAR (van den Elst, 1996), appliqué à la détection d'obstacles pour la conduite de véhicules, MEDIA (Crubézy *et al.*, 1995, 1997), appliqué à la gestion d'images médicales, mais aussi PEGASE+.

### 5.2.2 Outils pour le pilotage de programmes

Cette section vise à décrire plus précisément les deux outils qui vont nous servir pour la construction du système d'assistance au calage CARMA-1 : le moteur d'inférence PEGASE+ et le langage textuel de représentation de connaissances associé, appelé YAKL<sup>10</sup>. Ceux-ci sont décrits précisément par Moisan (2003)<sup>11</sup> et nous reprenons ici seulement les grandes lignes de ces deux outils, retracées par ailleurs dans différents articles (Moisan et Ziébelin, 2000; Thonnat et Moisan, 2000; Moisan, 2002).

#### YAKL, un langage de représentation de connaissances

Le langage YAKL permet de rendre compte de manière à la fois lisible et formelle des connaissances nécessaires à la tâche de pilotage de programmes (Moisan *et al.*, 1997). Sa proximité du langage « courant » permet une capitalisation de ces connaissances en vue d'un échange, tout comme les *livres de connaissances* proposés par Picard (Moisan et Ermine, 2000), et son caractère formel facilite la traduction de ces connaissances dans un langage de programmation – ici le C++ – en vue de leur opérationnalisation. Ce langage comporte trois types principaux d'éléments : les *arguments*, les *opérateurs* et les *critères*, auxquels se rajoutent les *fonctionnalités* et les *requêtes*.

#### *Arguments*

Les arguments permettent de décrire les éléments utilisés et produits par les différents programmes. La figure 5.2 présente un exemple de déclaration d'une part d'un type d'argument et d'autre part d'une instance de ce type d'argument. Dans le sens des langages orientés objet, un type d'argument correspond à une *classe* et une instance d'argument à un *objet*, c'est-à-dire une instance d'une classe.

#### *Opérateurs*

Un opérateur correspond soit à un programme – il est désigné sous le nom de *Primitive Operator* – soit à un enchaînement de programmes – il est alors décrit comme un *Composite Operator*. Un opérateur composite peut représenter différents types d'enchaînements de programmes : exécution séquentielle, alternative ou parallèle. La figure 5.3 représente l'arborescence des opérateurs utilisés pour réaliser une simulation avec le code MAGE.

10. Pour *Yet Another Knowledge Language*.

11. Le rapport est téléchargeable sur [www.inria.fr](http://www.inria.fr)



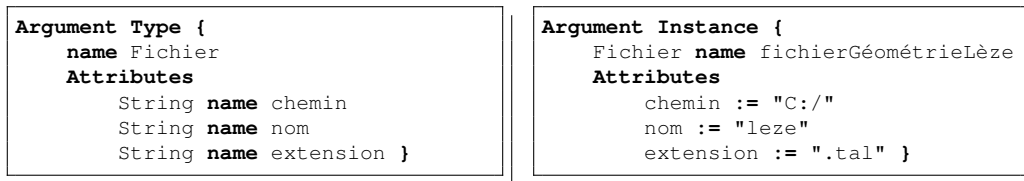
(a) Déclaration d'un *type* d'argument.(b) Déclaration d'une *instance* d'argument.

FIG. 5.2 – Exemple de déclaration d'un argument. Le type `Fichier` a ainsi trois attributs de type chaîne de caractères (`String`) qui représentent ses chemin d'accès, nom et extension. La notation « `:=` » permet de donner une valeur à un attribut.

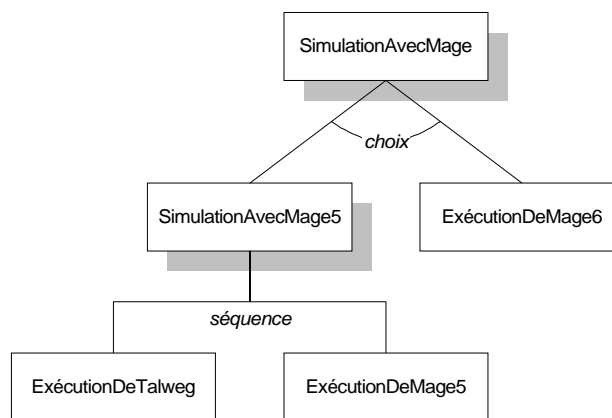


FIG. 5.3 – Arborescence des opérateurs de simulation pour le code MAGE. Les opérateurs composites sont représentés par des rectangles ombrés. Un choix est possible entre une simulation avec les versions 5 ou 6 du solveur. L'utilisation de la version 5 nécessite la mise en œuvre séquentielle des opérateurs exécutant les programmes Talweg et Mage5.

Un opérateur possède trois types d'arguments : des *données d'entrée* (Input Data), des *résultats* (Output Data) et des *paramètres* (Input Parameters). Les paramètres sont des arguments propres à l'opérateur dont les valeurs peuvent varier durant le processus d'exécution de l'opérateur, contrairement à celles associées aux données d'entrée, qui elles sont fixes durant ce processus.

La figure 5.4 présente un exemple de description en langage YAKL d'un opérateur primitif : le programme Talweg. La figure 5.5 présente quant à elle un exemple d'opérateur composite : l'exécution séquentielle de Talweg et Mage5.

### Critères

L'exécution d'un opérateur, qu'il soit primitif ou composite, s'effectue en fonction de critères dont un exemple est donné sur la figure 5.4. Ces critères sont composés d'un ensemble – éventuellement vide – de règles de production. Ces critères appartiennent à différentes catégories qui se rapportent chacune à une étape du mécanisme de résolution de problème :

- les *critères d'initialisation*, comme celui de la figure 5.4, permettent d'attribuer

```

Primitive Operator {
  name Talweg
  Input Data
    Fichier name tal
  Input Parameters
    Fichier name entrée_talweg
  Output Data
    Fichier name min
    Fichier name tit
  Initialization Criteria
    Rule {
      name creation_du_fichier_entrée_de_talweg
      If true
      Then  entrée_talweg.chemin := tal.chemin ,
           { {écriture_entrée(tal.nom); } }
    }
    ...
  Call
    Syntax ./Talweg.exe < entree_talweg.get_filename()
    EndSyntax }

```

FIG. 5.4 – Exemple d'opérateur primitif. La partie `Call` représente la commande qui doit être exécutée en mode batch. Cet exemple contient une règle d'initialisation qui permet de définir le paramètre `entrée_talweg` sur lequel va être redirigée l'entrée du programme `talweg`. Cette initialisation est effectuée ici par l'intermédiaire d'une procédure externe codée en C++. Remarque : la notation « . » permet de considérer les attributs d'une classe, comme dans les langages orientés-objet standards.

```

Composite Operator {
  name ExécutionDeTalwegPuisMage5
  Functionality LancerUneSimulationAvecMage5
  Input Data
    Fichier name tal
    Fichier name hyd
    ...
  Output Data
    Fichier name bin
    ...
  Body
    Talweg - Mage5
  Distribution
    ExécutionDeTalwegPuisMage5.tal / Talweg.tal
    ExécutionDeTalwegPuisMage5.hyd / Mage5.hyd
    ExécutionDeTalwegPuisMage5.bin / Mage5.bin
    ...
  Flow
    Talweg.min / Mage5.min
    Talweg.tit / Mage5.tit
    ... }

```

FIG. 5.5 – Exemple d'opérateur composite. La partie `Body` représente l'enchaînement – ici séquentiel – des opérateurs-enfants `Talweg` et `Mage5`. La partie `Distribution` représente comment sont passés les arguments de l'opérateur-parent aux opérateurs-enfants : le fichier `tal` est passé à l'opérateur `Talweg` alors que le fichier `hyd` est passé à l'opérateur `Mage5`. De la même façon, le fichier `bin` est récupéré à la sortie de l'opérateur `Mage5`. Enfin, la partie `Flow` représente les transmissions d'arguments entre les différents opérateurs-enfants : les fichiers `min` et `tit` sont ainsi transmis de `Talweg` à `Mage5`.

- une valeur aux *paramètres* de l'opérateur ;
- les *critères d'évaluation* produisent des jugements sur les produits de l'opérateur ;
- les *critères de réparation* utilisent les éventuels jugements défavorables pour soit réexécuter l'opérateur courant avec d'autres valeurs des paramètres, soit revenir dans le plan d'exécution à l'opérateur jugé responsable des défauts des résultats obtenus ;
- les *critères d'ajustement* permettent, dans le cas d'une réexécution de l'opérateur, de modifier les valeurs de ses paramètres suivant les jugements portés sur les résultats ;
- les *critères de choix* et les *critères d'optionnalité* permettent de formaliser respectivement le choix entre plusieurs opérateurs-enfants et le choix de l'utilisation d'un opérateur-enfant optionnel. Ces deux derniers critères se rencontrent bien entendu uniquement dans les opérateurs composites.

#### *Fonctionnalités et requêtes*

Les deux derniers éléments importants dans le langage YAKL correspondent aux concepts de fonctionnalité et de requête. Une *fonctionnalité* permet de définir un point d'entrée dans l'arborescence des programmes. Une requête est l'application de cette fonctionnalité à un exemple précis. La figure 5.6 représente un exemple d'une telle fonctionnalité et d'une requête associée.

La syntaxe du langage YAKL comporte de nombreuses autres propriétés que nous ne décrivons pas ici. Le lecteur intéressé pourra se référer au manuel de référence de ce langage (Moisan, 2003, chap. 5 : *YAKL grammar*).

#### **PEGASE+, un moteur de pilotage de programmes**

Le moteur d'inférence PEGASE+ se base sur des techniques de planification hiérarchique pour la construction du plan d'exécution des programmes. Nous ne détaillons pas ici l'algorithme présenté en détail par Moisan (2003, p. 41). Cet algorithme reprend les grandes lignes du mécanisme de pilotage de programmes représenté sur la figure 5.1. Une première version de ce moteur a notamment été utilisé pour la construction d'un système nommé PROGAL destiné au traitement d'images de galaxies (Vincent *et al.*, 1997).

Un système à base de connaissances créé avec PEGASE+ est construit à partir de trois éléments :

- une *base de connaissances* constituée de fichiers texte dans lesquels sont déclarés dans la syntaxe du langage YAKL les types d'arguments, les opérateurs et les fonctionnalités ;
- une *base de faits* constituée elle aussi de fichiers texte, et dans lesquels sont déclarées les instances d'arguments et les requêtes dans la syntaxe du langage YAKL ;
- et bien sûr le *moteur d'inférence* PEGASE+, sous forme d'une bibliothèque codée en C++.

### **5.3 CARMA-1, un prototype en pilotage de programmes**

Cette section s'attache à décrire CARMA-1 (Calibration of River Model Assistant), un système d'assistance au calage de modèles hydrauliques basés sur le code MAGE.

```

Functionality {
  name LancerUneSimulationAvecMage5
  Achieved by
    ExécutionDeTalwegPuisMage5
  Input Data
    Fichier name tal
    Fichier name hyd
    ...
  Output Data
    Fichier name bin
    ... }

```

(a) Déclaration d'une fonctionnalité.

```

Request {
  LancerUneSimulationAvecMage5 name SimulerLaCrueDe2000SurLaLeze
  Attributes
    tal := fichierGéométrieLèze
    hyd := fichierCrue2000Lèze
    ... }

```

(b) Déclaration d'une requête.

FIG. 5.6 – Exemple de déclaration d'un objectif. La fonctionnalité représentée sur la figure du haut permet d'entrer dans l'arborescence de la figure 5.3 par l'opérateur `ExécutionDeTalWegPuisMage5`, et la requête présentée sur la figure du bas représente l'utilisation de cette fonctionnalité avec des éléments précis contenus dans la base de faits, correspondant à un système donné – la rivière Lèze – et à un événement donné – la crue de 2000.

Ce prototype est un système à base de connaissances bâti avec le moteur PEGASE+ et fonctionne suivant le mécanisme de pilotage de programmes décrit dans la section 5.2. Après une description de l'implémentation technique réalisée pour obtenir ce prototype, cette section présente les principes de la construction d'une base de connaissances dans le langage YAKL et les principes de fonctionnement du prototype.

### 5.3.1 Principe d'implémentation technique

L'implémentation technique du prototype CARMA-1 s'est déroulée selon plusieurs phases, comme présenté par la figure 5.7. L'ensemble des connaissances décrites dans le chapitre précédent selon le formalisme graphique UML ont tout d'abord fait l'objet d'une traduction dans le langage YAKL, traduction sur laquelle nous allons revenir dans la section suivante. La base de connaissances ainsi obtenue est ensuite traduite automatiquement en langage C++ par un interpréteur – ou *parser* – du langage YAKL. Les fichiers ainsi obtenus sont alors compilés conjointement avec la librairie du moteur PEGASE+ de manière à produire un système à base de connaissances exécutable.

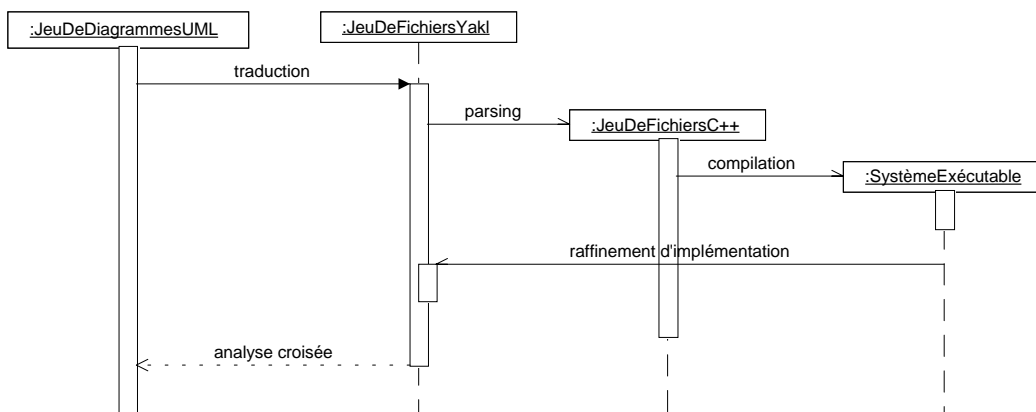


FIG. 5.7 – Principe de l'implémentation technique du prototype de système d'assistance au calage – Diagramme de séquences UML.

Les problèmes d'implémentation technique d'une base de connaissances ont été mis en relief par Morel (2002). Il souligne notamment le nécessaire rapprochement entre les domaines de l'Ingénierie des Connaissances et du Génie Logiciel pour parvenir à une chaîne cohérente d'opérationnalisation des connaissances. La principale différence entre la chaîne « UML–YAKL–C++ » utilisée ici et celles préconisées par Morel et Kassel (1999, 2001) est l'utilisation de la norme UML comme outil de spécification. Cette démarche, adoptée par Cranefield et Purvis (1999) et Kogut *et al.* (2002), est soumise aux ambiguïtés de la notation graphique UML, qui prévoit par exemple une équivalence sémantique entre un attribut et une relation de composition. L'utilisation du langage YAKL comme intermédiaire entre UML et le langage de programmation C++ nous a permis de lever ces ambiguïtés au niveau opérationnel, au prix de l'établissement de conventions strictes pour la traduction UML–YAKL, conventions que nous allons présenter dans la section suivante.

### 5.3.2 Construction d'une base de connaissances en pilotage de programmes

La première étape de développement d'un système à base de connaissances est bien sûr la construction de la base de connaissances elle-même. Disposant par ailleurs d'outils performants comme l'interpréteur du langage YAKL et le moteur d'inférence PEGASE+, la construction de cette base de connaissances a constitué l'essentiel du travail de développement du prototype. La base de connaissances détaillée ici est construite suivant les contraintes associées au pilotage de programmes.

#### De conceptualisation en prototypage, et inversement

La construction de la base de connaissances dans le langage YAKL ne s'est pas effectuée – loin de là – de manière linéaire. Plusieurs étapes ont nécessité des allers et retours pour parvenir à un résultat satisfaisant. On retrouve ici une méthode similaire à celle d'un expert hydraulicien chargé de caler manuellement un modèle numérique. Ces allers et retours se sont déroulés sur deux procédures.

Tout d'abord, la correspondance entre les connaissances initialement décrites dans le formalisme graphique UML et la base de connaissances en pilotage de programmes écrite dans le langage YAKL a nécessité des ajustements de la modélisation initiale pour une traduction cohérente dans le langage YAKL. Les principes de cette traduction sont présentés dans les paragraphes suivants. De même, l'implémentation de certains concepts présents dans le langage UML et nécessaires dans l'objectif fixé ont conduit à étendre la syntaxe du langage YAKL.

Ensuite, la concordance des résultats de l'exécution du système avec les objectifs fixés a été vérifiée sur les cas concrets de calage décrits dans les chapitres 6 et 7. Ces vérifications ont conduit à des raffinements dans la rédaction de la base YAKL.

#### Traduction UML–YAKL

Nous avons vu dans la section 5.2 au travers d'exemples comment les éléments – descriptifs et procéduraux – associés à des *programmes* se traduisaient naturellement dans le langage YAKL, justement destiné à représenter ce type de connaissances pour le pilotage de programmes.

Nous avons ensuite utilisé le langage YAKL pour représenter l'ensemble des connaissances décrites dans le chapitre précédent avec le formalisme graphique UML. Le principe de traduction des diagrammes de classes est présenté sur la figure 5.8. Chaque classe UML – attributs et méthodes compris – a été traduite par un type d'argument. Les méthodes – principalement les procédures de lecture et d'écriture des fichiers – ont été écrites en C++.

Nous avons enfin quelque peu détourné le langage YAKL de ses fonctions initiales pour représenter les diagrammes d'activités UML. Le principe de traduction de ces diagrammes est présenté sur la figure 5.9. Chaque activité a été traduite par un opérateur, et les flots d'objets entrants et sortants par les arguments – `Input Data` et `Output Data` – de cet opérateur.

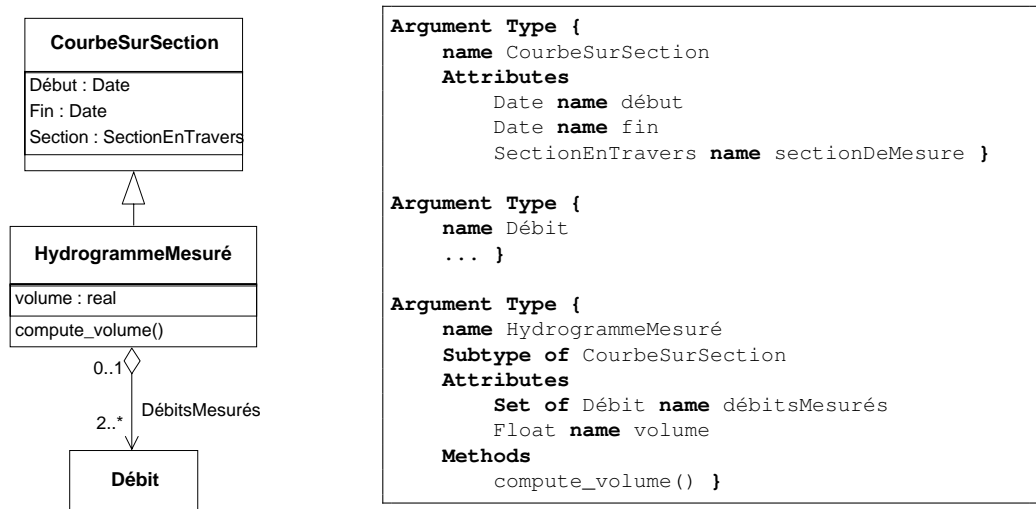


FIG. 5.8 – Exemple de traduction d'un diagramme de classes UML en types d'arguments YAKL. La méthode `compute_volume()` est écrite indépendamment en C++.

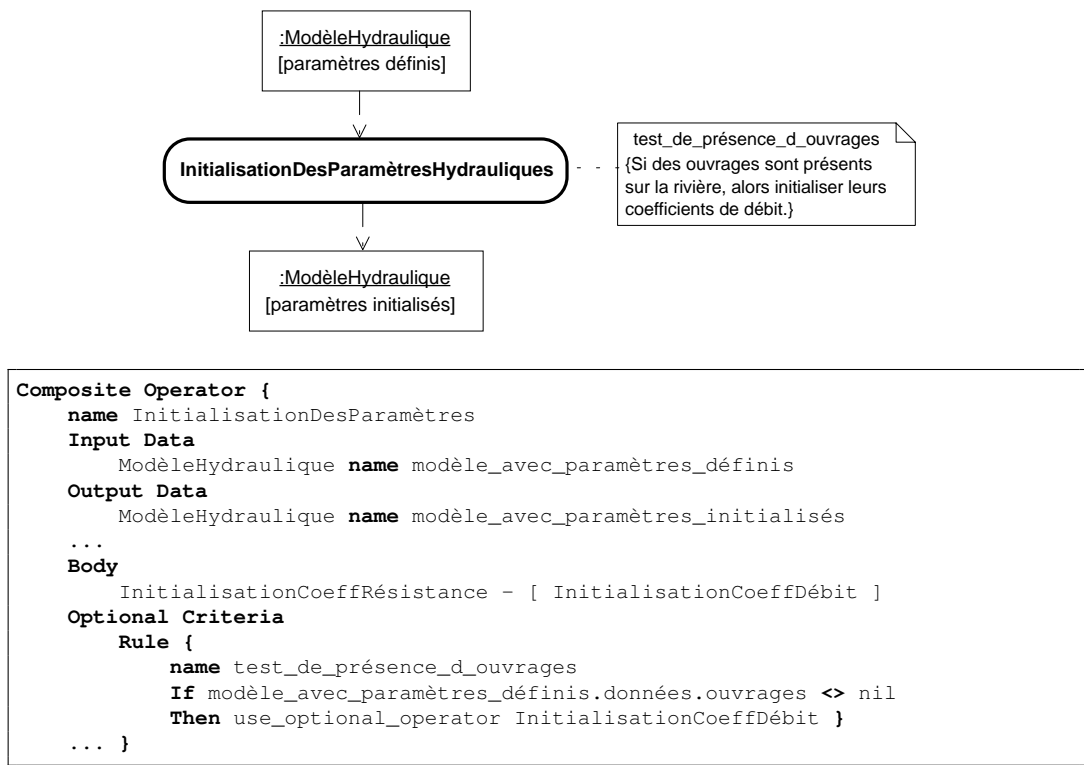


FIG. 5.9 – Exemple de traduction d'un diagramme d'activités UML en opérateurs YAKL. Les crochets entourant `InitialisationCoeffDébit` dans la partie `Body` indiquent un opérateur-enfant optionnel, pris en compte suivant le critère d'optionnalité représentée par la règle nommée `test_de_présence_d_ouvrages`. Cette règle consiste à tester la liste des ouvrages existants dans les données du modèle numérique.

## Évolution du langage YAKL

Comme évoqué précédemment, les besoins en modélisation ont nécessité une évolution du langage YAKL au travers de deux extensions principales :

- l'*ajout d'opérateurs « locaux »* (Local Operator) a permis de représenter des tâches terminales semblables à des opérateurs primitifs, mais au contenu entièrement heuristique. Ce type d'opérateur a ainsi permis de représenter des activités non décomposables qui ne constituent pas une encapsulation de l'exécution d'un programme quelconque, comme par exemple la `SélectionDUnEvénement` ;
- la *prise en compte de collections d'éléments* a quant à elle permis de représenter les différents jeux de données, de paramètres et autres, présents dans notre modélisation. L'exemple de l'utilisation de ces collections pour définir un hydrogramme est donné sur la figure 5.8. Cette notion de collection est primordiale dans le cadre du calage, puisqu'un grand nombre d'objets utilisés sont présents sous cette forme : données de référence, paramètres, etc.

## Structure de la base de connaissances et de la base de faits

Comme vu dans la section 5.2.2 (p. 130), la constitution d'un système à base de connaissances bâti autour du moteur PEGASE+ nécessite d'une part une base de connaissances regroupant des fichiers textes écrits dans la syntaxe YAKL – selon les principes de traduction énoncés au-dessus – et d'autre part une base de faits, regroupant elle aussi des fichiers écrits dans la syntaxe YAKL, et formalisant les connaissances spécifiques au(x) système(s) étudié(s). La figure 5.10 présente la structure de la base de connaissances du système CARMA-1, et la figure 5.11 présente la structure actuelle de la base de faits de ce système.

Un point important est à noter dans la structure de la base de connaissances : nous nous sommes focalisés sur la spécialisation des connaissances pour l'hydraulique et nous avons de fait *immédiatement transposé* les classes et activités génériques dans le domaine de l'hydraulique. Quelques exemples permettent de prendre conscience de cette particularité : aucun opérateur ne représente la tâche générique – c'est-à-dire indépendante du domaine – d'initialisation des paramètres. Un opérateur portant ce nom représente cette tâche directement dans le domaine de l'hydraulique fluviale (voir la figure 5.9). De la même façon, aucun type d'argument ne représente la classe générique *modèle numérique*. Un type d'argument portant ce nom représente en fait le concept de *modèle numérique en hydraulique fluviale*. On ne peut donc pas dériver simplement cette base de connaissances dans un autre domaine.

Cette particularité de la base de connaissances trouve son origine dans deux points différents. D'une part, des problèmes techniques se posent dans la gestion des types et des sous-types. La *spécialisation* explicite dans la base de connaissances de tâches génériques nécessiterait ainsi la mise en place d'opérateurs d'interopérabilité tels que ceux décrits dans le chapitre précédent (section 4.5.4, p. 115) pour passer du niveau des connaissances hydrauliques au niveau des connaissances spécifiques au code MAGE, c'est-à-dire pour passer des objets du domaine aux fichiers utilisés par le code. D'autre part, la base de connaissances s'est construite au fur et à mesure de nos travaux et l'identification d'un niveau générique de connaissances ne s'est pas imposée d'emblée. La lourdeur d'une implémentation systématique *a posteriori* d'opérateurs d'interopérabilité entre le niveau « générique » et le niveau « hydraulique » nous a conduit à cette



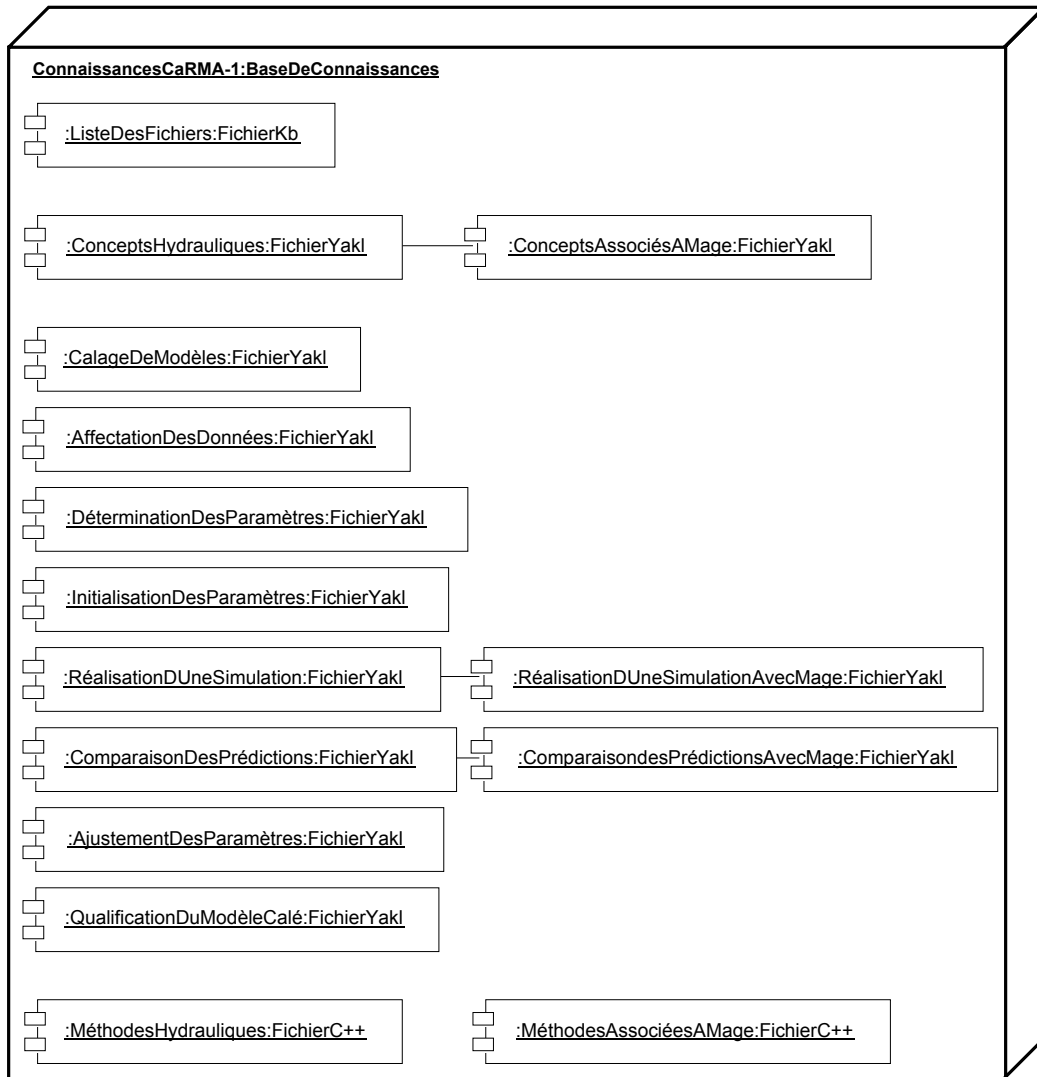


FIG. 5.10 – Structure de la base de connaissances en pilotage de programmes pour CARMA-1 – Diagramme de déploiement UML. Les fichiers représentés sur la droite regroupent les connaissances spécifiques au code MAGE.

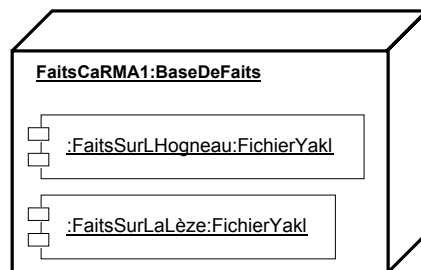


FIG. 5.11 – Structure de la base de faits en pilotage de programmes pour CARMA-1 – Diagramme de déploiement UML.

non-distinction de ces deux niveaux dans la base de connaissances. Nous reviendrons sur cet état de fait dans la section 5.4.

Le tableau 5.1 présente enfin quelques caractéristiques chiffrées de la base de connaissances intégrée dans le système CARMA-1. Nous présentons dans la section suivante le mode de fonctionnement opérationnel de ce prototype.

	Niveaux générique & hydraulique	Niveau du code MAGE	Total
Types d'attributs	75	22	97
Opérateurs	48	15	63
Règles	634	87	721

TAB. 5.1 – *Quelques caractéristiques chiffrées de la base de connaissances en pilotage de programmes.*

### 5.3.3 Fonctionnement

Cette section développe les modalités de fonctionnement opérationnel du prototype CARMA-1 pour le calage de modèles *présents dans la base de faits*. Le tableau 5.2 présente le mode d'exécution – automatique ou interactif – de chacune des sous-tâches du calage de modèle.

La plupart de ces sous-tâches se déroulent de manière automatique. Seules trois d'entre elles nécessitent une intervention de l'utilisateur :

- la tâche de *définition des zones homogènes* est laissée totalement à l'initiative de l'utilisateur. Celui-ci se voit ainsi demander le nombre de zones homogènes, puis les points de transition d'une zone à l'autre. Une assistance plus poussée sur cette tâche pourrait être mise en place par une analyse des faits à disposition, et notamment la topographie du bief modélisé ;
- la tâche d'*initialisation d'un paramètre distribué* est effectuée de manière interactive en posant des questions à l'utilisateur sur les caractéristiques de chaque zone homogène en vue d'estimer *a priori* les valeurs des coefficients  $n$  de Manning, suivant la procédure déterminée dans le chapitre 3 (figure 3.4, p. 69) ;
- la tâche de *comparaison entre référence et prédiction* est réalisée par un affichage graphique de la donnée de référence considérée et de la prédiction associée. Des questions sont ensuite posées à l'utilisateur sur la concordance de ces deux éléments. Trois types de comparaisons sont abordés successivement durant cette tâche :
  1. un *décalage temporel* de la courbe prédite si celle-ci est un hydrogramme ou un limnigramme (voir figure 5.12),
  2. un *écart global* en ordonnées de la courbe prédite si celle-ci est une ligne d'eau ou une ligne d'eau enveloppe (voir figure 5.13(a)),
  3. un *écart local* en ordonnées de la courbe prédite si aucun écart global n'est considéré (voir figure 5.13(b)). Ce type de comparaison est bien entendu itératif depuis l'aval vers l'amont puisque les écoulements simulés sont en régime fluvial.

Étape	Tâche	Exécution	
		Automatique	Interactive
Affectation des données	Sélection d'un événement	○	
	Sélection des données d'entrée	●	
	Sélection des données de référence	●	
Définition des paramètres	Sélection d'une structure ponctuelle	●	
	Attribution d'un paramètre ponctuel	●	
	Définition des zones homogènes		○
	Sélection d'une zone homogène	●	
Initialisation des paramètres	Attribution d'un paramètre distribué	●	
	Initialisation d'un paramètre ponctuel	●	
Réalisation d'une simulation	Initialisation d'un paramètre distribué		●
	Prétraitement	●	
	Exécution du code de calcul	●	
Comparaison des prédictions	Posttraitement	●	
	Sélection d'une donnée de référence	●	
	Sélection d'une prédiction	●	
	Comparaison entre référence et prédiction		●
	Compilation des comparaisons intra-événement	●	
Ajustement des paramètres	Compilation des comparaisons inter-événements	○	
	Sélection d'un paramètre ponctuel	●	
	Ajustement d'un paramètre ponctuel	●	
	Sélection d'un paramètre distribué	●	
	Ajustement d'un paramètre distribué	●	
Qualification du modèle calé	Sélection d'un type de paramètres distribués	○	
	Ajustement d'un type de paramètres distribués	●	
		○	

Tab. 5.2 – *Fonctionnement opérationnel du prototype. Le symbole « ● » dénote une implémentation totalement fonctionnelle, et le symbole « ○ » indique que les connaissances actuellement implémentées ne permettent pas d'apporter une véritable plus-value sur la tâche considérée et que celles-ci représentent une implémentation « par défaut ».*

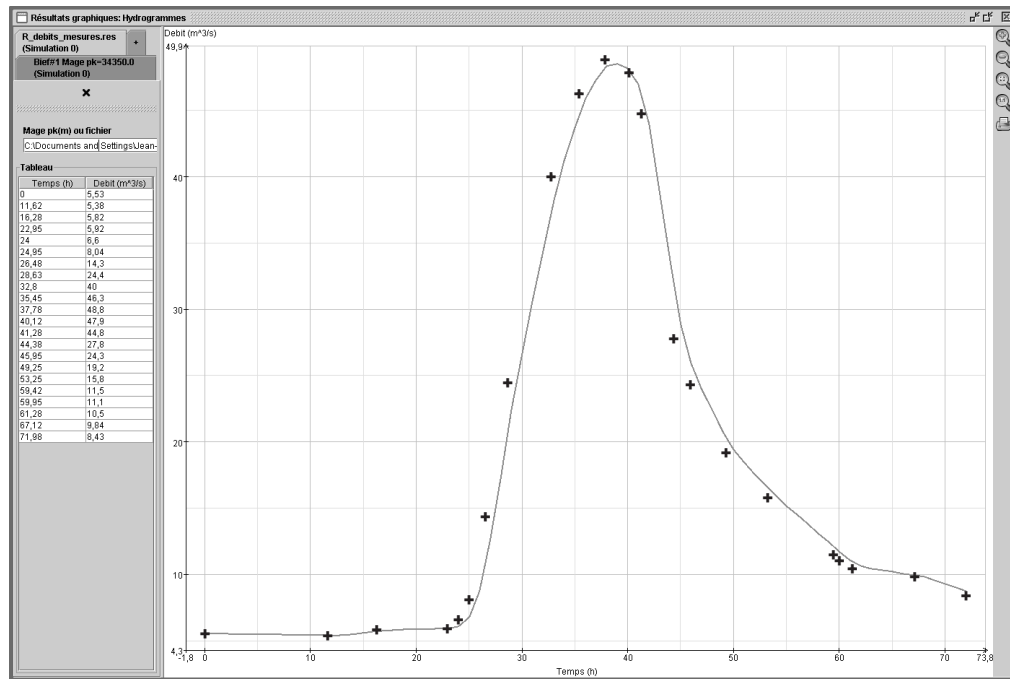


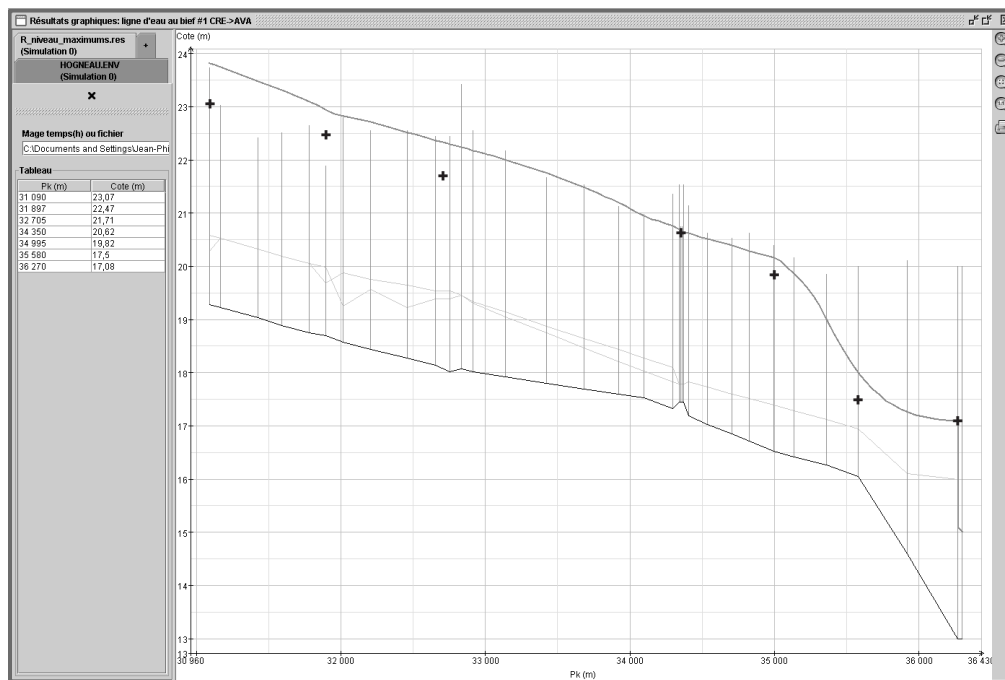
FIG. 5.12 – Identification visuelle d'un décalage temporel. La figure ci-dessus – et les suivantes – sont des captures d'écran du logiciel RESVIEW. Les débits enregistrés sont représentés par des croix noires et l'hydrogramme calculé par un trait fin gris. L'hydrogramme calculé est ici en retard par rapport aux débits mesurés.

Plusieurs autres tâches ont fait l'objet d'une implémentation automatique « par défaut », destinée à être approfondie :

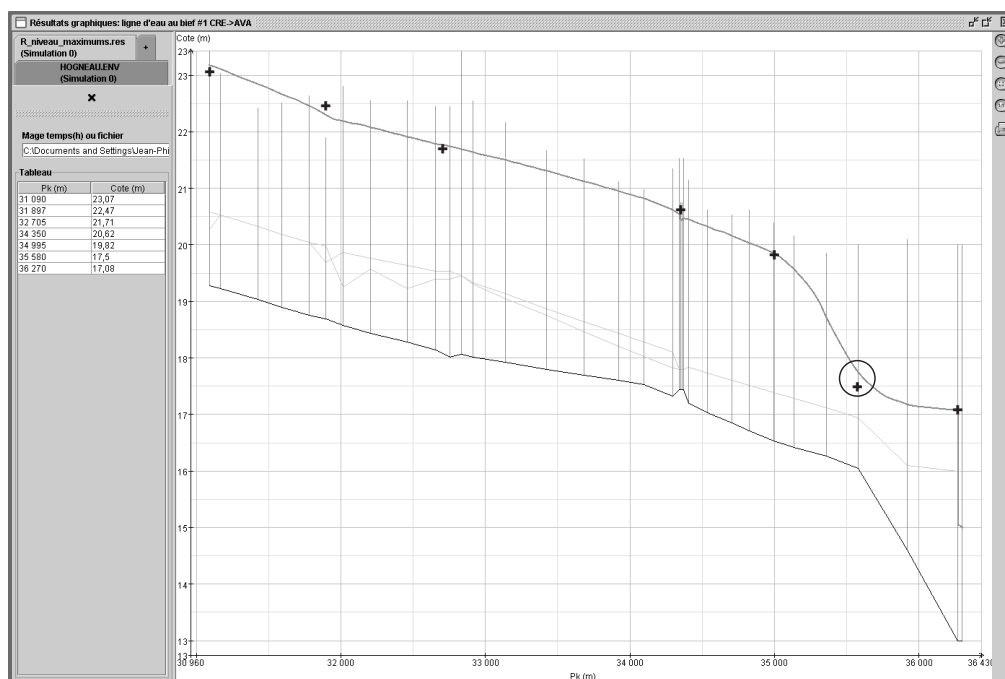
- les tâches de *sélection d'un événement* et de *compilation inter-événements* ont seulement été abordées dans ces travaux. En effet, ces deux tâches nécessitent une extraction de connaissances relatives à des cas de calage pour lesquels on dispose de différents événements pour réaliser le calage. Or, cette situation est assez rare en pratique, même si elle n'est pas exceptionnelle. Ces deux tâches peuvent ainsi largement être approfondies par l'étude d'une ou plusieurs de ces situations ;
- la tâche de *qualification du modèle calé* a elle aussi été seulement abordée pour les mêmes raisons qu'au dessus. En effet, un modèle calé sur un seul événement est aisément qualifiable, et les subtilités n'apparaissent que lors d'un calage réalisé sur plusieurs événements. Que dire en effet d'un modèle destiné à la détermination de zones inondables et reproduisant avec une qualité inégale deux événements de période de retour élevée ?
- la tâche de *sélection d'un type de paramètre distribué* n'a pas vraiment de raison d'exister dans le domaine de l'hydraulique fluviale, puisque – contrairement à l'hydrologie distribuée par exemple – un seul type de paramètre distribué est considéré : le coefficient de résistance à l'écoulement.

Nous présenterons dans le chapitre suivant les détails de sessions d'utilisation de ce prototype, au travers de son application pour le calage des modèles hydrauliques de l'Hogneau – dont sont tirées les figures 5.12 et 5.13 – et de la Lèze.

Il faut noter que le fonctionnement du prototype CARMA-1 décrit ci-dessus s'ap-



(a) Écart global. La ligne d'eau se situe globalement au-dessus des niveaux mesurés



(b) Écart local. La ligne d'eau se situe localement au-dessus d'un niveau mesuré.

FIG. 5.13 – Identification visuelle d'un écart en ordonnées entre les points mesurés et la courbe prédite correspondante. Les figures ci-dessus comparent des niveaux maximums mesurés (croix noires) à une ligne d'eau enveloppe calculée (trait fin gris). Le trait noir représente le profil en long du fond du cours d'eau. Les traits fins horizontaux représentent les sections mesurées.

plique uniquement dans le cas où le modèle à caler est déjà présent dans la base de faits. Mettre en œuvre ce prototype pour caler de nouveaux modèles nécessite donc une mise à jour de la base de faits. Celle-ci s'effectue en écrivant les instances d'arguments correspondant au nouveau système et à son nouveau modèle, ainsi que la requête correspondant au calage de ce nouveau modèle. La procédure indiquée sur la figure 5.14 doit alors être suivie par l'utilisateur.

1. Mettre à jour la base de faits ;
2. Exécuter l'interpréteur sur la nouvelle base (base de connaissances initiale + base de faits mise à jour) ;
3. Lancer une compilation des fichiers C++ produits ;
4. Lancer l'exécutable du nouveau système d'assistance obtenu.

FIG. 5.14 – Procédure d'utilisation du système sur de nouveaux modèles.

## 5.4 Développement d'outils d'intelligence artificielle dédiés au calage de modèles numériques

Dans la section précédente a été présenté un système d'assistance au calage de modèles hydrauliques, réalisé à partir d'outils développés pour une tâche différente : le *pilotage de programmes*. Cette utilisation détournée, si elle a permis d'obtenir un prototype opérationnel, comporte plusieurs points insatisfaisants, non pas du point de vue des résultats fournis par le système, mais du point de vue de son *ergonomie* et de sa *maintenance*. La discussion de ces points nous a ainsi amené à proposer le développement d'outils adaptés à la tâche de calage. Ces outils sont destinés à construire un nouveau prototype de système d'assistance au calage de modèles hydrauliques, implémentant les mêmes connaissances que CARMA-1, mais possédant les propriétés évolutives nécessaires pour pouvoir l'adapter aisément à de nouvelles situations.

### 5.4.1 Discussion sur l'implémentation précédente

La mise au point itérative du prototype CARMA-1 au travers de son expérimentation sur différents cas d'étude a permis de dégager plusieurs freins potentiels à son évolution vers de nouvelles situations de calage. L'examen de ces points ont fait émerger plusieurs grands principes pour la réalisation d'un nouveau prototype, qui vont être détaillés ci-dessous.

#### Utilisation d'un moteur d'inférence adapté à la tâche de calage

L'utilisation d'un moteur de pilotage présente l'avantage du caractère générique de la tâche de pilotage de programmes. Les concepts associés à cette tâche ont ainsi permis de « simuler » la tâche de calage, mais l'approche pourrait être employée pour reproduire d'autres tâches liés à l'utilisation de modèles numériques, comme l'*analyse de sensibilité*, ou encore la *validation de modèle*.

Cette souplesse nous a ainsi imposé de représenter *au sein même* de la base de connaissances la structure d'inférence de la tâche de calage. La base écrite dans le langage YAKL est donc « polluée » par ces connaissances inférentielles génériques : les

connaissances pertinentes pour l'hydraulique se retrouvent dispersées au sein des différents opérateurs implémentant artificiellement les étapes du processus générique de calage.

La solution naturelle adoptée est le développement d'un moteur d'inférence *dédié à la tâche de calage*. Celui-ci doit réaliser non plus une planification hiérarchique d'opérateurs reproduisant des sous-tâches du calage, mais directement la structure du processus tel que nous l'avons modélisé dans le chapitre précédent (figure 4.8, p. 99). Les grandes étapes de ce processus devront ainsi être exécutées et enchaînées *sans avoir à les déclarer dans la base de connaissances*. Celle-ci contiendra alors seulement des connaissances *strictement* du domaine considéré.

### Utilisation d'un langage approprié

Le développement d'un nouveau moteur doit s'accompagner de la construction d'un langage approprié. Le langage YAKL doit ainsi être complété pour prendre en compte les classes primitives d'objets liés au calage de modèles numériques. Le nouveau langage doit ainsi incorporer l'ensemble des connaissances descriptives génériques, c'est-à-dire l'ontologie ONTOVAL décrite dans le chapitre précédent (figure 4.3, p. 88). Ce langage doit ainsi permettre de déclarer simplement qu'une section en travers est un type de *données du système*, qu'un coefficient de résistance est un type de *paramètre* ou encore qu'un hydrogramme est un type de *données événementielles*. Il est important de noter que la syntaxe du langage YAKL devra continuer à être disponible pour pouvoir décrire le code de calcul et les programmes satellites.

L'utilisation conjointe du moteur d'inférence et de ce langage permettra ainsi de faciliter de façon significative le développement de systèmes d'assistance au calage dans d'autres domaines.

### Rattachement des heuristiques aux objets du domaine

Dans le langage YAKL, les connaissances de raisonnement, exprimées sous forme de règles, sont rattachées aux opérateurs représentant les connaissances procédurales. Nous avons observé que ces connaissances devraient être rattachées aux concepts du domaine qu'elles manipulent. Les règles concernant la sélection de données de crue, par exemple, doivent ainsi apparaître *associées à l'objet crue lui-même*. Ce changement de point de vue est suscité par l'intégration de la structure d'inférence – et donc d'une grande partie des connaissances procédurales – dans le moteur même.

La maintenance et l'enrichissement de la base de connaissances en hydraulique fluviale pourront être grandement facilités par cette approche recentrée sur les objets. Prenons un exemple d'une évolution potentielle de cette base : la prise en compte non plus de deux, mais de *trois* coefficients de résistance à l'écoulement par tronçon homogène. Cette fonctionnalité permettrait de considérer indépendamment la résistance du lit, celle des berges et celle de la plaine d'inondation. Pour introduire cette notion au sein de la base de connaissances dans le langage YAKL, une nouvelle définition des paramètres d'un modèle hydraulique doit tout d'abord être établie, par une réécriture des types d'arguments correspondant. Si ceci ne présente aucune difficulté en soi, l'utilisation de ces nouveaux paramètres dans le processus de calage nécessite d'intervenir *à chaque étape du processus* de calage dans lesquels ces paramètres sont considérés. De nouvelles règles prenant en compte ces changements doivent ainsi être ajoutées dans de nombreux opérateurs *disséminés dans la quasi totalité de la base de connaissances*. Le

nouveau langage va ainsi permettre de regrouper ces connaissances sur les coefficient de résistance en les rattachant à un même objet sous forme de critères – au sens d'*ensemble de règles* comme dans le langage YAKL – d'initialisation et de modification.

### 5.4.2 Réalisation

Un nouveau moteur d'inférence et un langage associé ont ainsi été implémentés à partir des idées de base développées au-dessus. La mise au point de ces outils informatiques a été réalisée à l'INRIA Sophia-Antipolis par Sabine Moisan à partir des deux acquis suivants :

- *un modèle conceptuel de la tâche de calage* – défini au chapitre 4 – et en particulier l'ontologie ONTOVAL, qui identifie et décrit les concepts génériques du calage (figure 4.3, p. 88), et une description de la méthode de résolution associée (diagrammes d'activités UML, figures 4.8 à 4.15) ;
- *une plate-forme logicielle* nommée LAMA (Moisan, 1998), qui fournit un environnement unifié et des boîtes à outils pour construire, analyser et adapter tous les éléments logiciels nécessaires à la réalisation de systèmes à base de connaissances (moteurs d'inférence, interfaces, langage de description de connaissances, etc.).

Notre expérience au cours de la réalisation du prototype CARMA-1 nous a permis d'identifier les modifications à apporter, d'une part au langage de description des connaissances fourni aux experts, et d'autre part au moteur d'inférence qui réalise le raisonnement. Ces deux outils doivent permettre de décrire et de manipuler tous les concepts génériques identifiés dans l'ontologie ONTOVAL.

### OVAl, un langage de représentation de connaissances pour le calage

Tout d'abord, le langage doit permettre à un expert d'exprimer des spécialisations des concepts généraux du calage pour son domaine. Pour cela nous proposons une syntaxe simple et lisible.

Le nouveau langage, nommé OVAL – pour *Operational Validation Language* – s'inspire de la syntaxe du langage YAKL, dont il se différencie sur deux points principaux. Tout d'abord, en accord avec le modèle conceptuel, il intègre bien évidemment des éléments syntaxiques pour décrire des concepts du calage – inconnus en pilotage – tels que le *modèle numérique* à caler, le *code de calcul* utilisé, le *système physique* considéré et des *données sur ce système*, des *événements* passés et des *données sur ces événements* etc. Un point important à noter est l'intégration du concept d'*objectif* de la tâche, regroupant le *domaine d'application visé* et le *niveau de correspondance attendu* définis dans le référentiel de Refsgaard et Henriksen (2004).

Le langage OVAL permet de plus d'associer des connaissances de raisonnement à certains de ces concepts, sous forme de nouveaux *critères*, toujours constitués comme dans le langage YAKL de règles de production :

- des critères de *définition*, d'*initialisation*, et de *modification*, associés aux données du système, permettent de décrire comment définir les paramètres à caler, leur attribuer une valeur initiale, et modifier celle-ci si un ajustement est nécessaire ;
- des critères de *sélection*, d'*affectation* et de *comparaison*, associés aux types d'événements (par exemple une crue), permettent de décrire comment choisir tout d'abord un événement particulier comme référence pour un calage et comment, le cas échéant, distribuer les rôles (entrée/référence) aux données événementielles



mesurées correspondantes, et comparer les données de référence aux prédictions du modèle ;

- des critères de *qualification*, associés au modèle, permettent de décrire quand décider de la fin du calage ;
- enfin, des critères de *pré- et post-traitement*, associés au code, pour décrire les formattage/déformattage de données.

Il est à noter de plus que les techniques de pilotage de programmes – et en particulier les *opérateurs* et leurs critères de raisonnement – qui se sont avérés utiles pour décrire certains raisonnements en calage, ont été conservés dans le langage OVAL, avec la même syntaxe qu'en YAKL.

### HYDRE, un moteur d'inférence pour le calage

Le nouveau moteur, nommé HYDRE, possède un algorithme qui implémente les étapes spécifiques au calage décrites au chapitre 4, en s'appuyant sur des structures de données (classes C++) qui implémentent les concepts définis dans le langage.

De plus, le moteur HYDRE incorpore un moteur « annexe » de type PEGASE+ pour traiter les parties de raisonnement expert utilisant des opérateurs de pilotage. La plateforme LAMA, utilisée pour construire le nouveau moteur, fournit en effet des facilités pour le couplage de deux types de moteurs.

Concrètement, quatre points ont été poursuivis en parallèle :

- définition de la syntaxe externe du langage OVAL, afin de couvrir les besoins d'expression d'experts en calage de code ;
- implémentation des structures de données informatiques associées (principalement des classes C++, basées sur les composants fournis par la plate-forme) ;
- conception d'un traducteur de la syntaxe externe vers ces structures informatiques ;
- développement d'un moteur capable de manipuler ces structures et implémentant les activités identifiées au chapitre 4.

Ces deux outils permettent ainsi à un expert d'un domaine donné de construire un système à base de connaissances pour le calage de modèles numériques dans son domaine. Ce système d'assistance au calage peut ensuite être mis en œuvre par un utilisateur final pour mener à bien cette tâche.

#### 5.4.3 CARMA-2, un nouveau prototype pour le calage

La mise au point des deux outils présentés ci-dessus a permis la réalisation d'un second prototype de système d'assistance au calage, que nous avons originalement baptisé CARMA-2. Ce prototype a été construit à partir de trois éléments : une base de connaissances et une base de faits – exprimées toutes deux dans le langage OVAL – et le moteur d'inférence HYDRE.

Nous avons transposé la base de connaissances initialement écrite dans le langage YAKL pour obtenir la nouvelle base de connaissances dans le langage OVAL. Cette traduction a ainsi consisté à garder uniquement dans la base les connaissances spécifiques au domaine de l'hydraulique et les connaissances liées au code MAGE. Nous avons ensuite aisément exprimé ces connaissances à l'aide de la syntaxe adaptée du nouveau langage.

Les figures 5.15 à 5.18 présentent quelques extraits de la base de connaissances écrites dans le langage OVAL.

```

Numerical Model {
  Name mage_river_hydraulic_model
  System rivière
  Simulation Code mage
  Objective calage_hydraulique
  System Data
    bief_étudié name bief
    sections a Set of sections_en_travers
    seuils a Set of déversoir
    ...
  Parameters
    coefficients_de_résistance a Set of coefficient_de_resistance
    coefficients_de_débit a Set of coefficient_de_débit
    ... }

```

FIG. 5.15 – Déclaration dans le langage OVAL du modèle numérique dans le domaine de l'hydraulique fluviale. Les termes en gras sont des mots-clés du langage.

```

Objective {
  Name problème_calage_hydraulique
  Events
    crues_utilisées a Set of crue
  Intended Application
    String name utilisation_du_modèle_hydraulique
    range [ "Prévision de crues" "Détermination de zones inondables" ]
    ... }

```

FIG. 5.16 – Déclaration dans le langage OVAL de l'objectif du calage dans le domaine de l'hydraulique fluviale.

```

Event Type {
  Name crue
  Measured Data
    hydrogrammes_mesurés a Set of hydrogramme_mesuré
    niveaux_d'_eau_mesurés a Set of niveau_mesuré
    ...
  Computed Results
    lignes_d'eau_calculées a Set of ligne_d'eau_calculée
    ...
  Selection criteria
    ...
  Allocation criteria
    Rule {
      name sélection_de_la_condition_limite_ament
      If hydrogrammes_mesurés <> nil
      Then foreach hyd in hydrogrammes_mesurés
        run sélection_hydrogramme_ament hyd/hyd
    }
  Comparison criteria
    ... }

```

FIG. 5.17 – Déclaration dans le langage OVAL d'un type d'événement – une crue – dans le domaine de l'hydraulique fluviale.

```

Local Operator {
  Name sélection_hydrogramme_amont
  Input Data
    hydrogramme_mesuré name hyd
  Call
    Rule {
      name présence_hydrogramme_amont
      If hyd.section_de_mesure.position == mage_river_hydraulic_model.bief.
        position_amont
      Then hyd becomes input }
    ... }

```

FIG. 5.18 – Déclaration dans le langage OVAL d'un opérateur local de résolution d'une sous-tâche spécifique.

L'utilisation du langage OVAL permet de réduire sensiblement la complexité de la structure de la base de connaissances du prototype, présentée sur la figure 5.19. La figure 5.20 présente quant à elle la structure actuelle de la base de faits de ce système. La maintenance de cette deuxième base de connaissances s'en trouve ainsi grandement facilitée, et il est beaucoup plus facile pour l'expert d'avoir une vision globale des connaissances implémentées.

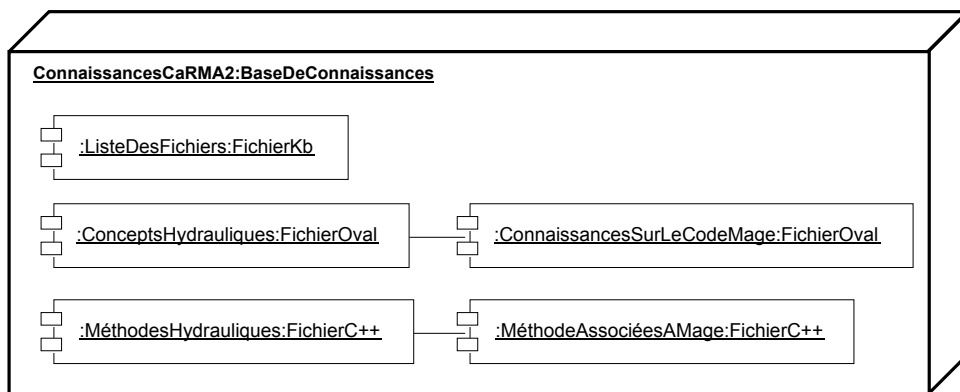


FIG. 5.19 – Structure de la base de connaissances pour CARMA-2.

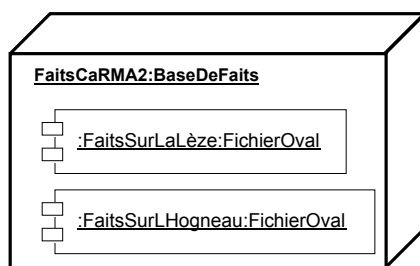


FIG. 5.20 – Structure de la base de faits pour CARMA-2.

Il est important de noter que les connaissances implémentées étant identiques dans les deux prototypes, la mise en œuvre de CARMA-2 par un utilisateur final sera équivalente à celle du premier prototype, aussi bien en terme de *fonctionnalités* que de *résultats obtenus*.

## 5.5 Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre l'implémentation informatique des connaissances modélisées dans le chapitre 4. Le résultat de cette – double – implémentation est un système opérationnel d'assistance au calage de modèles hydrauliques basés sur le code MAGE. Le développement d'un premier prototype nommé CARMA-1 à l'aide de techniques de pilotage de programmes a permis de tester cette mise en œuvre opérationnelle sur des cas concrets de calage. Nous avons détaillé la structure de ce prototype ainsi que l'ensemble du processus de calage mis en œuvre de manière opérationnelle.

Les tests effectués sur ce premier prototype ont permis de déceler les faiblesses de cette implémentation concernant la maintenance et la réutilisation des différents niveaux de la base de connaissances. Ces inconvénients provenant de l'utilisation de techniques développées pour la tâche de pilotage de programmes, la mise au point d'outils d'intelligence artificielle – moteur d'inférence et langage associé – dédiés spécifiquement à la tâche de calage de modèles numériques a été décidée. Le nouveau prototype développé à partir de ces outils – nommé CARMA-2 – permet à l'expert de s'affranchir de l'écriture dans la base de connaissances du niveau générique – représenté par l'ontologie ONTOHYD et par le paradigme de calage de modèles – et de représenter uniquement les connaissances du domaine et les connaissances spécifiques au code utilisé.

Nous disposons donc à présent d'un outil opérationnel d'assistance au calage destiné à un utilisateur final. La réalisation du calage d'un modèle hydraulique à l'aide de cet outil ne nécessite de la part de cet utilisateur ni connaissances sur le calage en tant que procédure générique, ni connaissances poussées en hydraulique fluviale 1-D, ni surtout de connaissances sur le code de calcul MAGE utilisé. Cette affirmation doit être tempérée sur deux points : d'une part, l'assistance fournie par le système n'est pas complète sur l'ensemble des sous-tâches du calage, comme nous l'avons précisé dans la section 5.3.3. D'autre part, les connaissances implémentées sont loin d'être exhaustives et le système ne peut bien entendu pas prétendre prendre en compte l'ensemble des situations de calage qui peuvent se présenter en hydraulique fluviale unidimensionnelle.

Les limites d'utilisation de ce système peuvent fort heureusement être repoussées grâce à la modularité fournie au prototype CARMA-2 : l'extension de la base de connaissances sur laquelle il est bâti peut ainsi permettre d'appréhender aisément de nouvelles situations de calage. Les fonctionnalités actuelles de ces prototypes permettent en outre déjà leur utilisation pour des cas de calage profondément différents, comme le montre l'application de CARMA-1 à deux cas d'étude dans les chapitres suivants.



**Troisième partie**

**Applications du prototype**



## Chapitre 6

# Calage d'un modèle de la Lèze

« Tout le monde raisonne sur l'hydraulique, mais il est peu de personnes qui l'entendent. »

Chevalier DU BUAT<sup>1</sup>

DANS CETTE TROISIÈME PARTIE, nous nous attachons à la mise en œuvre opérationnelle du système d'assistance au calage que nous avons développé. Ce chapitre présente le premier des deux cas d'étude qui ont servi de terrain d'expérimentation pour notre premier prototype : le calage d'un modèle de la rivière Lèze. Le chapitre suivant présentera quant à lui le calage d'un modèle de la rivière Hogneau. Ces deux cas d'étude diffèrent de par le domaine d'application visé des modèles, mais aussi par les données événementielles disponibles pour caler chacun d'entre eux. Ces deux cas d'étude constituent donc *a priori* de bons candidats pour tester notre prototype.

Nous détaillons dans ce chapitre tout d'abord le cadre de l'étude ainsi que les spécificités du calage du modèle de la Lèze. Nous développons ensuite le déroulement de ce calage à l'aide du prototype CARMA-1 ainsi que les retours d'expérience afférents. Nous proposons enfin une extension du système d'assistance au calage.

### 6.1 Présentation du cas d'étude

Cette section s'attache à décrire le bief modélisé de la rivière Lèze (voir la figure 6.1), l'événement de crue utilisé, ainsi que le modèle numérique que nous nous proposons de caler. Nous nous attardons ensuite sur les spécificités de ce calage, relatifs au domaine d'application visé et à la nature des données d'entrée.

#### 6.1.1 La rivière Lèze

Prenant sa source à une altitude de plus de 600 m au nord-ouest de la ville de Foix, la Lèze draine un bassin versant d'environ 350 km<sup>2</sup> avant de se jeter dans l'Ariège

---

1. Pierre-Louis-Georges DU BUAT (Chevalier). (1786), *Principes d'hydraulique vérifiés par un grand nombre d'Expériences faites par ordre du Gouvernement*, vol. 1., Imprimerie de Monsieur, Paris, France, 2<sup>e</sup> éd., p. x, Discours préliminaire.



quelques kilomètres avant la confluence de celle-ci avec la Garonne. Le bief étudié, d'une longueur d'environ 27 km, se situe à l'aval du bassin versant, entre les villages de Lézat-sur-Lèze et Labarthe-sur-Lèze (IGN, 1986, 1991). Ce bief est traversé par de nombreux ponts et est surtout entrecoupé de trois ouvrages hydrauliques imposants tel que celui représenté sur la figure 6.2. Deux grands types morphologiques de tronçons peuvent être identifiés suivant qu'ils sont soumis ou non à l'influence hydraulique de ces barrages. Un exemple de tronçon non influencé est présenté sur la figure 6.3 et un exemple de tronçon supportant un plan d'eau est présenté sur la figure 6.4.

Deux stations hydrométriques sont présentes aux extrémités du bief considéré dans cette étude, l'une à proximité du pont de la RD 19 à Lézat-sur-Lèze, et l'autre sur la face amont du pont de la RD 19 à Labarthe-sur-Lèze. Les principales caractéristiques de ces stations, extraites de la banque HYDRO<sup>2</sup>, sont reprises dans le tableau 6.1. Les bassins versants correspondants sont représentés sur la figure 6.1(b).

### 6.1.2 La crue de février 2000

Le modèle numérique que nous cherchons à caler est destiné à la prévision des crues. Le niveau de correspondance attendu est par conséquent une bonne reproduction de leur dynamique.

Nous avons choisi comme référence la crue de février 2000 pour deux raisons : la première est la *disponibilité des données pluviométriques*. Ces données s'avèrent indispensables à la modélisation de tout événement sur le bief étudié. En effet, le bassin versant intermédiaire est d'une superficie de plus de 100 km<sup>2</sup> et apporte une contribution non négligeable aux débits enregistrés à l'aval du domaine. Ces apports intermédiaires doivent ainsi être calculés à l'aide d'un modèle hydrologique à partir de données pluviométriques sur le bassin versant. La deuxième raison est *l'intensité de l'événement*. La crue de référence devait en effet être à la fois assez forte pour être représentative des événements sur le bassin, mais aussi – pour nos travaux seulement – ne pas conduire à des débordements dans la plaine d'inondation. Nous reviendrons sur cet aspect particulier dans la présentation du modèle numérique que nous avons utilisé.

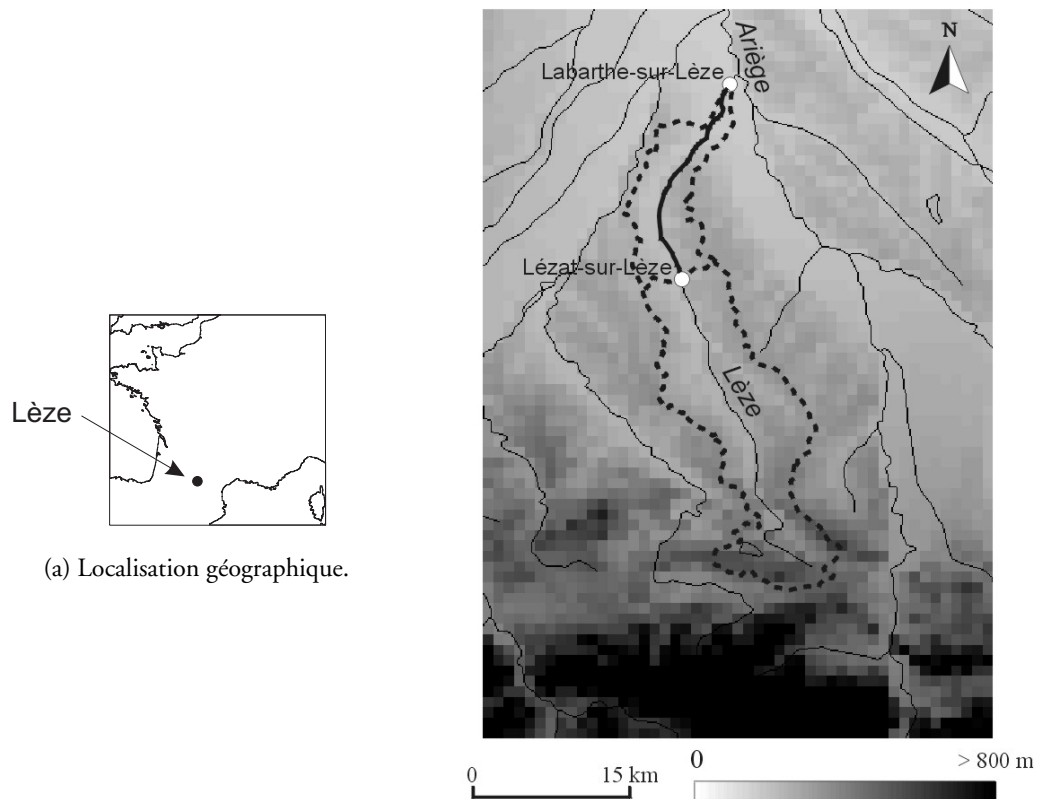
Cette crue particulière a conduit à un débit de pointe de 57,30 m<sup>3</sup>/s à Lézat et 67,50 m<sup>3</sup>/s à Labarthe, correspondant à une période de retour comprise entre 2 et 5 ans. Nous sommes bien loin de l'événement de juin 2000 dont le débit de pointe, enregistré à 144 m<sup>3</sup>/s à Labarthe, approche une période de retour de 50 ans. L'utilisation de la crue de février 2000 plutôt que celle de juin serait évidemment une limite dans le cadre d'une utilisation opérationnelle de notre modèle calé, mais elle ne nuit aucunement à notre propos axé sur l'aspect méthodologique de ce type de calage.

### 6.1.3 Modèle numérique

Après une forte crue en 1992, une étude de définition d'aménagements visant à réduire les inondations dans la vallée de la Lèze a été confiée au bureau d'études SOGREAH (1996, 1997, 1998). À cette occasion a été réalisé – à l'aide du code de calcul CARIMA (Belleudy *et al.*, 1986) – un modèle numérique de la partie de la vallée étudiée dans nos travaux. Plus récemment, un modèle du bief étudié ici et basé sur le code MAGE a été construit à l'IMFT (Béon *et al.*, 2004) dans le contexte de la prévision des crues sur le bassin de la Garonne.

---

2. Banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie ([hydro.rnde.tm.fr](http://hydro.rnde.tm.fr)).



(a) Localisation géographique.

(b) Carte du bassin versant de la Lèze.

FIG. 6.1 – Description du bief étudié de la Lèze. Sur la carte du bassin versant, le réseau hydrographique est représenté en trait plein fin et les bassins versants de la Lèze à Lézat-sur-Lèze et Labarthe-sur-Lèze sont indiqués par des traits forts pointillés. Le bief étudié, situé entre les deux stations hydrométriques, est quant à lui représenté en trait plein fort.

Nom	Lèze à Lézat-sur-Lèze	Lèze à Labarthe-sur-Lèze
Code HYDRO	O1844020	O1874010
Superficie du bassin versant	237 km <sup>2</sup>	351 km <sup>2</sup>
Altitude du zéro de l'échelle	199,00 mNGF	159,00 mNGF
Coordonnées Lambert II	X = 520019 m Y = 1809214 m	X = 524629 m Y = 1828102 m
Qualité des mesures	bonne	bonne

TAB. 6.1 – Descriptif des stations hydrométriques de la Lèze.



(a) Le 31/03/04 ( $Q \simeq 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



(b) Le 24/04/04 ( $Q \simeq 17 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

FIG. 6.2 – Lèze – Photographies du barrage de Beaumont-sur-Lèze. Dans cette figure et les suivantes, la photographie du haut a été prise à faible débit et celle du bas durant une phase de décrue (Béon et al., 2004). La crue en question a atteint  $46,90 \text{ m}^3/\text{s}$  le 23/04/2004 à 13h15 à Lézat et  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  le 23/04/2004 à 15h00 à Labarthe.



(a) Le 31/03/04 ( $Q \simeq 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



(b) Le 24/04/04 ( $Q \simeq 17 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

FIG. 6.3 – Lèze – Photographies d'un tronçon non influencé à l'aval du pont de la RD 43.



(a) Le 31/03/04 ( $Q \simeq 0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ).



(b) Le 24/04/04 ( $Q \simeq 17 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

FIG. 6.4 – Lèze – Photographies du tronçon influencé par le barrage du Moulin des Bures, à l'aval du pont de la RD 622.

Nous avons réutilisé les bases de ce dernier modèle – et notamment les données du système constituées de 120 sections en travers et de la géométrie des différents ouvrages fournies par SOGREA – et nous l'avons adapté à nos besoins. La principale adaptation a concerné l'abandon de la modélisation de la plaine d'inondation. La topographie disponible de celle-ci étant insuffisamment précise, nous avons décidé de nous retrancher à un modèle pouvant seulement prendre en compte des crues non débordantes<sup>3</sup>. Il est important de noter que le débit de débordement – environ  $100 \text{ m}^3/\text{s}$  – correspond tout de même pour cette rivière à une période de retour de l'ordre de 20 ans. C'est pourquoi nous avons choisi comme crue de référence la crue de février 2000.

Si de nombreuses données existent sur la crue de juin 2000 (DIREN, 2000; SCOT-GEOSPHAIR, 2000), les seules données hydrométriques disponibles concernant la crue de février 2000 sont les hydrogrammes enregistrés aux deux stations. À cela on peut rajouter la courbe de tarage de la station de Labarthe fournie par la DIREN. Nous avons de plus utilisé les résultats d'une modélisation hydrologique de cet événement sous forme d'apports latéraux à fournir au code MAGE.

#### 6.1.4 Spécificités du calage

La tâche de calage comporte dans ce premier cas d'étude deux caractéristiques qui sont détaillées dans les paragraphes suivants.

##### Prévision de crues et calage à l'aide de données externes

Les contraintes de disponibilité des données hydrométriques entraînent pour ce modèle un calage uniquement sur des données *externes*. Aucune donnée interne n'est présente pour discriminer différents jeux de paramètres locaux sur le domaine modélisé. Ceci n'est pas véritablement limitant au vu de l'objectif visé qui concerne principalement la dynamique de crue, comme l'affirme Dietrich (2001, p. 81) :

*If the goal of a modelling exercise is to predict solely the time evolution or some bulk property of a complex system, then spatial lumping (or spatial integration) can be invoked to filter out spatial variability.*

Nous disposons tout de même ici d'informations qualitatives pour *définir* (voir les réflexions sur l'influence des ouvrages dans la section précédente) et *initialiser* – à l'aide notamment des photographies des figures 6.3(a) et 6.4(a) – plusieurs paramètres distribués dans ce modèle. L'intégration spatiale suggérée par Dietrich (2001) ne doit donc pas être utilisée à la lettre. Cependant, un raisonnement similaire peut être effectué sur l'*ajustement* éventuel de ces paramètres, qui doit être réalisé – à défaut de données supplémentaires appropriées – de manière *globale* et *homogène* sur l'ensemble du bief modélisé. Dans le même ordre d'idée, les coefficients de débit des ouvrages ne doivent pas être modifiés, puisqu'ils conduisent à une réduction d'écart uniquement locaux (voir section 4.4.7, p. 107).

##### Prise en compte d'apports intermédiaires

La prise en compte des apports intermédiaires a été effectuée à l'aide d'hydrogrammes distribués correspondant à l'événement et calculés à partir des données plu-

3. Le modèle basé sur CARIMA considérait cette plaine comme un ensemble de zones de stockage, et une topographie sommaire de celle-ci – extraite d'un modèle numérique de terrain – a été utilisée dans le modèle mis au point à l'IMFT.

viométriques disponibles. Cette modélisation hydrologique préalable a été effectuée à l'IMFT par Marie-Madeleine Maubourguet à l'aide du code MARINE<sup>4</sup> (Estupina-Borrell, 2004). L'existence de ces apports introduit une augmentation du volume de la crue entre l'amont et l'aval du domaine. Une bonne reproduction du volume de la crue enregistrée à l'aval du domaine, s'il constitue un critère de qualité d'un modèle *hydrologique* (voir Green et Stephenson, 1986), ne peut servir à la qualification d'un modèle *hydraulique*. Les critères de qualification du modèle hydraulique calé pourront ainsi se fonder uniquement sur le décalage temporel entre hydrogrammes aval calculé et enregistré<sup>5</sup>.

## 6.2 Construction de la base de faits

L'ensemble des *faits* décrits dans la section 6.1 a été modélisé au préalable dans le langage YAKL pour constituer la base de faits de ce cas d'étude. Cette base regroupe les déclarations des instances des classes d'objets – classes définies dans le chapitre 4 – spécifiques au cas d'étude de la Lèze. Les paragraphes suivants présentent de manière non exhaustive ces différentes instances, qui vont être utilisées par le prototype pour réaliser le calage.

La figure 6.5 présente un extrait des différents faits relatifs au modèle numérique que l'on se propose de caler. Le système est tout d'abord déclaré, suivi des données disponibles sur ce système. Le modèle numérique est ensuite défini, réunissant le code MAGE et les données topographiques sur le bief étudié de la Lèze.

```

...
Argument Instance {
  Système name bief_lèze
  Attributes
    noeud_amont := lezat
    abscisse_amont := 8552.0
    noeud_aval := labarthe
    abscisse_aval := 35751.0 }

Argument Instance {
  DonnéesDuSysteme name topo_leze
  Attributes
    bief := bief_leze
    sections := | pont_lezat ... pont_labarthe |
    déversoirs := | moulin_des_bures barrage_lagardelle
                  barrage_saint_sulpice | }

Argument Instance {
  ModèleNumérique name modèle_lèze
  Attributes
    code := Mage
    données := topo_leze }

```

FIG. 6.5 – Extrait de la base de faits pour le calage de la Lèze – Modèle numérique.

La figure 6.6 présente un extrait de la déclaration des différentes données événementielles disponibles pour réaliser le calage. Les données hydrométriques relatives à

4. Pour *Modélisation de l'anticipation du Ruissellement et des Inondations pour de évènements Extrêmes*.

5. On peut noter que ce décalage peut bien sûr lui aussi être influencé par la dynamique des apports intermédiaires calculés par le modèle hydrologique.

l'événement sont déclarées après ce dernier, et l'ensemble des données disponibles est ensuite listé.

```

...
Argument Instance {
  Événement name crue_leze_fevrier_00
  Attributes
    début := 17/02/00 00:00
    fin := 19/02/00 24:00 }
...

Argument Instance {
  CourbeDeTarage name courbe_tarage_labarthe
  Attributes
    section := pont_labarthe
    jaugeage := | jaugeage1 ... | }

Argument Instance {
  HydrogrammeMesuré name hydrogramme_lezat_fevrier_00
  Attributes
    crue := crue_leze_fevrier_00
    section := pont_lezat
    débits := | debit_lezat1 ... | }

Argument Instance {
  HydrogrammeMesuré name hydrogramme_labarthe_fevrier_00
  Attributes
    crue := crue_leze_fevrier_00
    section := pont_labarthe
    débits := | debit_labarthe1 ... | }

Argument Instance {
  DonnéesÉvénementielles name donnees_hydro_leze
  Attributes
    hydrogrammes := | hydrogramme_lezat_fevrier_00
                    hydrogramme_labarthe_fevrier_00 |
    hydrogrammes_répartis := | apport_lateral1 ... |
    courbes_de_tarages := | courbe_de_tarage_labarthe | }

```

FIG. 6.6 – Extrait de la base de faits pour le calage de la Lèze – Données événementielles.

La figure 6.7 présente la déclaration du contexte du calage, définissant le domaine d'application visé et le niveau de correspondance attendu. Enfin, la requête de l'utilisateur est définie : caler le modèle de la Lèze – déclaré dans la figure 6.5 – avec les données événementielles listées dans la figure 6.6.

```

Object Instance {
  ContexteDuCalage name contexte_calage_modèle_leze
  Attributes
    domaine_d_application_visé := "prévision de crue"
    niveau_de_correspondance_attendu := "bonne concordance
    temporelle" }

Request {
  calage name calage_modèle_lèze
  Attributes
    données_événementielles := donnees_hydro_leze
    modèle_à_caler := modèle_lèze }

```

FIG. 6.7 – Extrait de la base de faits pour le calage de la Lèze – Contexte et requête.



## 6.3 Déroulement de la session de calage avec CARMA-1

Dans cette section, nous nous attachons à détailler le processus de calage tel qu'il a été réalisé à l'aide du prototype CARMA-1. Pour cela, nous reprenons les sept étapes principales du calage identifiées dans le chapitre 4 (figure 4.8, p. 99). Pour chacune d'entre elles, nous présentons les grandes lignes des raisonnements mis en œuvre par le prototype, au travers d'exemples significatifs des différentes règles de production activées lors de ce cas d'étude.

Nous mettons de plus en relief le rôle de l'utilisateur du prototype à chaque étape du processus de calage. La session de calage à l'aide du système développé repose sur une *interaction* avec l'utilisateur sur la base de questions-réponses. La plupart des réponses de l'utilisateur – excepté celles de nature numérique qui doivent appartenir à un intervalle – sont choisies parmi plusieurs propositions faites par le système. Nous utilisons donc ici essentiellement des questions *fermées*. Le système d'assistance au calage affiche d'autre part des graphiques sur lesquels l'utilisateur doit se baser pour répondre à certaines questions.

Le listing complet de la session de calage du modèle de la Lèze est reproduit dans la section H.1 de l'annexe H. Les sections suivantes détaillent les processus mis en œuvre derrière ce listing.

### 6.3.1 Affectation des données

Cette première étape est réalisée de façon *entièrement transparente* pour l'utilisateur. Le système cherche tout d'abord parmi les données disponibles laquelle va servir de condition limite amont et retient l'hydrogramme enregistré à l'amont du domaine. La courbe de tarage mesurée à l'aval du domaine est ensuite retenue comme condition limite aval. Le système teste ensuite l'existence d'hydrogrammes répartis et applique ceux-ci comme condition limite latérale :

```
Rule {
  name test_apports_latéraux
  If données_évenementielles.hydrogrammes_repartis <> nil
  Then condition_limite_latérale.hydrogrammes_repartis :=
    données_évenementielles.hydrogrammes_repartis }
```

Après avoir vérifié qu'aucune ligne d'eau ne pouvait être utilisée comme condition initiale, le système constate que les données événementielles restantes ne comportent qu'un hydrogramme – celui mesuré à Labarthe – qu'il va utiliser comme donnée de référence.

### 6.3.2 Définition des paramètres

Cette deuxième étape est *essentiellement interactive*. Le système demande à l'utilisateur le nombre de tronçons de résistance homogène qui peuvent être identifiés sur le bief étudié, puis les abscisses de transition d'une zone à l'autre. Nous avons ici considéré 8 tronçons différents. Nous reviendrons sur ce point particulier dans la section 6.4.2 sur les retours d'expérience. Le système crée ensuite à partir de ces informations 8 couples de coefficients de résistance, un pour le lit mineur et un pour le lit majeur de chaque tronçon. Les données du système sont ensuite parcourues pour créer les coefficients de

débit des déversoirs – modélisant les trois barrages – présents dans le modèle du bief étudié. Le nombre de paramètres de ce modèle s'élève donc à 11.

### 6.3.3 Initialisation des paramètres

L'initialisation des paramètres s'effectue de manière partiellement interactive. L'utilisateur doit tout d'abord choisir la méthode d'estimation des valeurs des coefficients de résistance parmi les deux grandes méthodes répertoriées dans le chapitre 3 (figure 3.4, p. 69) : typologie de rivière – retenue ici – ou analyse des composantes de la résistance à l'écoulement. Nous reviendrons sur ce point dans la section 6.4.3.

L'utilisateur est ensuite invité à répondre à une série de questions concernant la description de chaque tronçon homogène de la rivière, en choisissant parmi plusieurs propositions effectuées par le système. Cette séquence est répétée pour chacun des tronçons depuis l'amont vers l'aval. Le système attribue à partir de ces réponses une valeur initiale ainsi qu'une plage de variation à chaque coefficient de résistance à partir de la typologie de Chow (1973) (tableaux D.12 et D.13 de l'annexe D).

Le système initialise enfin les coefficients de débit à une valeur par défaut égale à 0,4, estimée à partir des valeurs moyennes rencontrées dans la littérature.

### 6.3.4 Réalisation d'une simulation

Cette étape est à nouveau entièrement transparente pour l'utilisateur. Le système crée tout d'abord l'ensemble des fichiers nécessaires à l'exécution du code MAGE à partir notamment des conditions limites et des paramètres identifiés ci-dessus. Il lance ensuite une simulation avec ces différents fichiers – répertoriés dans l'annexe F – puis récupère les fichiers produits par le code.

### 6.3.5 Comparaison des prédictions

La comparaison des prédictions s'effectue de manière partiellement interactive. Le système identifie tout d'abord la prédiction du modèle à comparer avec la donnée de référence, ici l'hydrogramme mesuré à Labarthe. Il extrait ensuite cet hydrogramme des fichiers de résultats du code MAGE, puis utilise le programme RESVIEW (voir figure 4.20, p. 116) pour afficher à l'écran sur le même graphique les hydrogrammes calculé et mesuré à Labarthe.

L'utilisateur est alors invité à se prononcer sur le décalage de l'hydrogramme calculé, en choisissant un qualificatif approprié parmi plusieurs propositions. Nous avons ici considéré que l'hydrogramme était *trop en avance*. Le système attribue en conséquence un jugement à l'opérateur modélisant l'étape de comparaison des prédictions. Celui-ci le transmet ensuite à l'opérateur susceptible de réduire ce décalage, c'est-à-dire celui attribuant une valeur courante aux coefficients de résistance :

```
Rule {
  name transmission_decalage_hydrogramme_en_avance
  If assess_operator? ComparaisonDesPrédictions
    hydrogramme_en_avance
  Then send_operator ValuationDesCoefficientsDeRésistance
    hydrogramme_en_avance }
```

### 6.3.6 Ajustement des paramètres

Cette étape est encore une fois totalement transparente pour l'utilisateur. Le système interprète le jugement transmis pour en déduire que l'ajustement doit être global et que par conséquent l'opérateur de valuation des coefficients de résistance doit être réexécuté. Les paramètres – au sens du langage YAKL – de l'opérateur sont alors évalués avant sa réexécution. L'ajustement requis est jugé *important*, et la valeur de la résistance du lit mineur *et* du lit majeur est jugée *trop grande* :

```
Rule {
  name interpretation_decalage_hydrogramme_en_avance
  If assess_operator? ValuationDesCoefficientsDeResistance
    hydrogramme_en_avance
  Then assess_parameter ajustement important ,
    assess_parameter resistance_lit_mineur trop_grande ,
    assess_parameter resistance_lit_majeur trop_grande ,
    re_execute }
```

Tous les opérateurs-enfant – c'est-à-dire les opérateurs de valuation des coefficients correspondant à chaque tronçon – sont alors réexécutés, et pour chacun de ceux-ci le pas d'ajustement est fixé selon le jugement porté ci-dessus :

```
Rule {
  name calcul_pas_ajustement_important
  If assess_parameter? ajustement important
  Then pas_ajustement := 3
```

Les coefficients de résistance pour chaque tronçon sont ensuite modifiés selon les jugements portés au-dessus et selon la valeur du pas d'ajustement :

```
Rule {
  name importante_augmentation_resistance_lit_mineur
  If assess_parameter? resistance_lit_mineur trop_grande
  Then valeur_manning_lit_mineur :=
    valeur_manning_lit_mineur / (1 - pas_ajustement *
    valeur_manning_lit_mineur) }
```

Nous reviendrons sur cette implémentation du pas d'ajustement dans la section 6.4.

Le système revient alors au niveau de l'opérateur correspondant à l'étape de réalisation d'une simulation, pour exécuter à nouveau cette étape, puis celle de comparaison des prédictions. Le nouvel hydrogramme calculé est alors à nouveau affiché conjointement avec l'hydrogramme mesuré, et la question sur le décalage est à nouveau posé à l'utilisateur. Nous avons à cet instant considéré que le décalage restant entre les deux hydrogrammes était négligeable. Cette phase de modification des paramètres a été dans ce cas très rapide, mais nous verrons dans le second cas d'étude que ce n'est pas toujours le cas. Le système considère alors le modèle comme *calé*. Il reste ensuite à fournir à l'utilisateur une valeur *qualitative* de ce calage.

### 6.3.7 Qualification du modèle calé

Cette dernière étape est réalisée de manière interactive. Le système reprend alors les comparaisons de toutes les données de référence – qui se réduisent ici à l'hydrogramme à Labarthe – avec les prédictions correspondantes du modèle calé. Il affiche alors le graphique correspondant, et l'utilisateur est invité à se prononcer sur la qualité de la reproduction de cet hydrogramme, en choisissant un qualificatif parmi plusieurs propositions. Nous avons ici considéré que cette reproduction était assez bonne. Le système compile alors les qualificatifs exprimés pour chaque comparaison et en déduit – suivant le niveau de correspondance attendu et le domaine d'application visé – la qualité globale du modèle calé *dans le cadre de cette étude*. Le jugement émis sur la reproduction de l'hydrogramme à Labarthe est ici simplement repris comme valeur du modèle calé.

## 6.4 Retours d'expérience

Dans cette section, nous allons revenir sur quelques points du déroulement de ce calage pour tenter d'en tirer des enseignements sur la mise en œuvre opérationnelle de notre prototype. Mais avant cela, regardons de plus près les *résultats* de ce calage en terme de reproduction de la crue simulée.

### 6.4.1 Comparaison des crues simulée et mesurée

La figure 6.8 montre une comparaison des résultats numériques du modèle calé avec les données événementielles disponibles, suivant la représentation graphique tridimensionnelle évoquée dans le chapitre 2 (p. 46).

La première constatation est l'absence de données *internes* au domaine modélisé, comme noté parmi les spécificités de ce calage (section 6.1.4). Sur les données externes, on peut noter que l'hydrogramme enregistré à Lézat-sur-Lèze est bien représenté, ce qui est évident du fait de son utilisation comme condition limite amont. En revanche, l'hydrogramme à Labarthe-sur-Lèze est largement surestimé, et ce principalement au cœur de la crue. On peut de plus constater la présence de deux pics de crue consécutifs, dus aux apports du bassin versant intermédiaire. Le premier de ces apports s'effectue uniquement sur la partie aval de ce bassin versant, tandis que le second, quelques heures plus tard, est plus généralisé. Seule la montée de l'hydrogramme – un des principaux critères de qualité d'un modèle de prévision de crue – est assez bien représentée.

Lors du calage, nous nous sommes en effet basé subjectivement, en tant qu'utilisateur, sur la concordance de la phase de montée de crue, afin de fournir les appréciations du décalage temporel demandées par le système. L'hydrogramme calculé ne reproduit ainsi pas de manière satisfaisante ni le pic de crue ni la phase de décrue. On aboutit ainsi au paradoxe apparent d'un calage considéré comme le meilleur possible et correspondant à un modèle calé de valeur seulement « assez bonne ».

Nous allons ici nous écarter quelque peu du retour d'expérience sur notre prototype pour creuser cette remarque qui relève du « code de bonnes pratiques » pour le calage de modèles en général. En effet, on atteint ici la limite du processus de calage du modèle hydraulique : l'écart entre prédictions et données de référence ne peut plus être réduit par un quelconque ajustement des paramètres de ce modèle. Cet écart – ici sur le volume de la crue – provient en effet des apports intermédiaires, considérés implici-

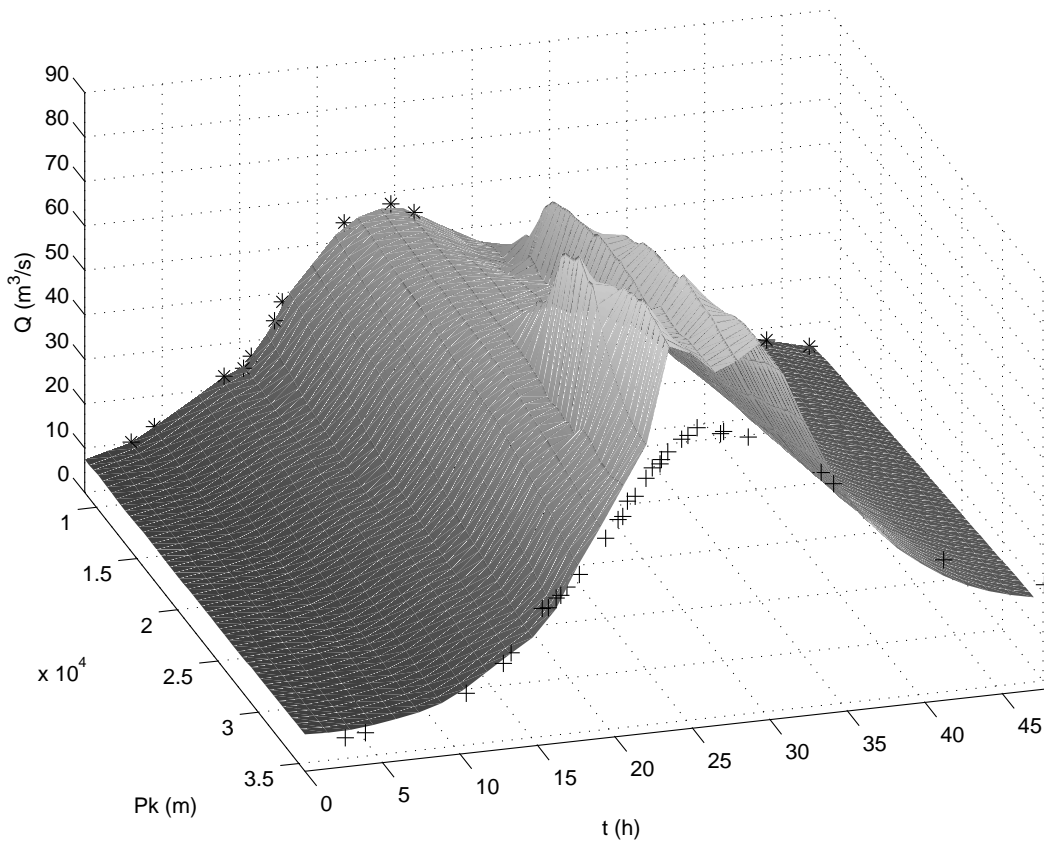


FIG. 6.8 – Représentation de la crue de la Lèze de février 2000 dans un repère  $Q(x,t)$ . La surface représente les variables calculées par le modèle numérique, les astérisques représentent les débits enregistrés à Lézat-sur-Lèze, et les croix représentent les débits enregistrés à la station de Labarthe-sur-Lèze. L'origine des temps est prise à 00h00 le 17/02/00.

tement comme *valides* par leur utilisation comme *données* événementielles du modèle hydraulique. Or, ces apports (ne) sont (que) des *prédictions* d'un modèle hydrologique du bassin, lui-même préalablement calé. Une bonne représentation de l'hydrogramme à Labarthe par ce modèle hydrologique peut ainsi reposer sur deux sous-modèles – celui du bassin versant en amont de Lézat et celui du bassin versant intermédiaire – dont les erreurs se compensent. L'association par le modèle hydraulique des apports *calculés* du bassin versant intermédiaire et de l'hydrogramme *enregistré* à Lézat peut ainsi ne pas permettre une représentation satisfaisante de l'hydrogramme à Labarthe.

La solution est simple : pouvoir réaliser le calage du couple modèle hydrologique–modèle hydraulique suivant un *unique* domaine d'application visé et un *unique* niveau de correspondance attendu. Cette entreprise peut pourtant se révéler ardue puisqu'elle met en jeu non seulement la somme des connaissances nécessaires pour le calage de chacun d'entre eux, mais aussi des connaissances supplémentaires « hybrides ». Prenons le cas où un décalage temporel par rapport à l'hydrogramme enregistré à Labarthe est identifié au cœur de l'hydrogramme calculé correspondant. La question est de savoir quels paramètres doivent être ajustés afin de réduire cet écart : les coefficients de résistance du modèle de la rivière ou bien les paramètres de ruissellement et/ou d'infiltration du modèle des versants ? Nous laisserons ici en suspend cette question qui soulève un

pan de recherche en soi.

Pour revenir à notre prototype, il ne permet bien évidemment pas de résoudre ce problème puisqu'il n'assiste le modélisateur que dans la tâche de calage du modèle *hydraulique*. En revanche, les ajustements des paramètres par le système s'effectuent *uniquement* sur la base d'une considération d'un éventuel décalage temporel, et non pas en relation par exemple avec la valeur du débit de pointe, qui est lui beaucoup plus influencé par les apports intermédiaires. Cette latitude restreinte dans la comparaison des hydrogrammes limite ainsi les tentations de l'utilisateur de compenser les erreurs dues aux prédictions *hydrologiques* par un ajustement des paramètres *hydrauliques*. L'utilisation du système d'assistance au calage garantit ainsi – au moins en partie – pour un utilisateur quelconque la *qualité du processus* lui-même, ce qui est sa vocation principale.

Nous allons dans les sections suivantes développer d'autres points spécifiques du processus de calage.

#### 6.4.2 Définition des coefficients de résistance

La définition des coefficients de résistance – c'est-à-dire leur nombre et leurs zones d'application – est une activité cruciale conditionnant l'ensemble du processus de calage. Une pratique courante en ingénierie consiste à définir un couple de coefficients de résistance pour chaque tronçon limité par deux sections mesurées. Dans le cas du modèle de la Lèze, cela reviendrait à définir environ 240 paramètres, soit autant de degrés de liberté pour le système modélisé! Les inconvénients de cette surparamétrisation ont été relevés par Refsgaard (1997) pour les modèles hydrologiques distribués<sup>6</sup> et sont directement transposables aux modèles hydrauliques. Nous reviendrons sur les dangers de la surparamétrisation dans le second cas d'étude, pour lequel nous disposons de données de référence internes.

Afin d'éviter cette approche, le système demande à l'utilisateur de définir des *tronçons de résistance homogène* sur le bief modélisé, ce qui va permettre de définir des paramètres fondés sur des considérations physiques, garantissant ainsi au maximum la validité de cette paramétrisation. Cette définition reste donc éminemment subjective et les résultats de la paramétrisation vont dépendre des connaissances de l'utilisateur du site étudié.

Nous ne disposons pas dans ce cas d'assez d'informations sur les 27 km du linéaire de la rivière pour définir précisément les zones de résistance homogène. Pourtant, notre reconnaissance du terrain nous a permis d'identifier deux grands types de tronçons soumis ou non à l'influence d'un ouvrage (voir section 6.1.4). Si la transition – de l'amont vers l'aval – d'un tronçon influencé par un ouvrage à un tronçon non influencé s'applique naturellement au droit de l'ouvrage, il est beaucoup plus difficile d'estimer avec précision l'emplacement d'une transition inverse sans avoir parcouru l'ensemble du linéaire de la rivière. Nous avons raisonné à partir de la notion de sédimentation à l'amont d'un ouvrage pour supposer que le tronçon influencé par celui-ci possède une pente inférieure à la pente moyenne de la rivière. Nous avons ensuite déterminé arbitrairement l'abscisse d'une section mesurée concrétisant visuellement la limite amont d'un tel tronçon pour fournir le point de transition. Cette approximation apparaît suffisante au vu du domaine d'application visé du modèle, qui n'est pas destiné à reproduire

6. Le lecteur intéressé pourra aussi consulter le chapitre 3 de l'ouvrage intitulé *Distributed Hydrological Modelling* (Refsgaard et Storm, 1996).

fidèlement les niveaux d'eau le long du bief étudié, et dont le calage repose uniquement sur une comparaison avec des données externes.

### 6.4.3 Choix de la méthode d'estimation

Dans le prototype, nous avons laissé à l'utilisateur le choix de la méthode d'estimation *a priori* des coefficients de résistance, parmi la typologie de rivières de Chow (1973) et l'analyse des composantes de la résistance de Cowan (1956). Nous reviendrons sur les avantages de cette liberté dans l'étude du cas de l'Hogneau. Nous nous trouvons ici dans le cas d'une rivière naturelle – bien qu'influencée – et l'utilisation de la méthode de Chow correspond aux recommandations effectuées dans le chapitre 3 (figure 3.4, p. 69).

### 6.4.4 Pas d'ajustement des coefficients de résistance

Nous avons implémenté dans le système d'assistance au calage un ajustement des paramètres selon la plus simple des techniques, c'est-à-dire un pas *fixe*. Trois pas différents ont été implémentés afin de prendre en compte différentes amplitudes d'ajustement. Ceux-ci correspondent à une variation de 1, 2 et  $3 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$  du coefficient  $K_s$  de Strickler, inverse du coefficient  $n$  de Manning (voir section 2.3.1, p. 34). Le choix d'une variation dans la dimension du coefficient de Strickler provient de la proportionnalité directe de celui-ci avec la débitance, variable centrale du modèle conceptuel (voir section 2.1.2, p. 29).

Ce choix d'un pas fixe discrétise donc l'espace de variation de chaque paramètre et empêche un ajustement plus précis que  $1 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ . Cette valeur correspond à la « précision » du coefficient de Strickler couramment utilisée en ingénierie, et ne devrait pas nuire sensiblement à la finesse des ajustements possibles. Nous reviendrons sur cette notion dans le chapitre suivant.

## 6.5 Proposition pour une automatisation de l'étape de comparaison des prédictions

Nous avons vu dans la section 6.3.5 que l'étape de comparaison des prédictions repose actuellement sur une analyse visuelle des écarts entre une donnée de référence et la prédiction correspondante. Cette étape est ainsi difficilement reproductible de par la subjectivité de l'appréciation des *types* d'écart et de leur *amplitude*. Nous avons vu par exemple dans la section 6.4.1 que l'identification du (ou des) type d'écart pertinent entre un hydrogramme mesuré et son homologue calculé pouvait ne pas être trivial.

Nous proposons dans cette section une extension potentielle de notre système d'assistance au calage, visant à automatiser cette comparaison sur la base d'une formalisation de l'*analyse visuelle* d'une courbe par un expert. L'objectif final est de délivrer de manière automatique des évaluations d'ordre qualitatif d'une comparaison entre une courbe calculée et un ensemble de points mesurés.

### 6.5.1 Raisonnements qualitatifs sur des courbes

L'utilisation de raisonnements qualitatifs pour évaluer des données graphiques n'est pas nouvelle. McIlraith (1989) a ainsi développé un prototype d'environnement d'in-

interprétation qualitative de données relatives à des tests sur des puits de forage. Ce prototype était basé sur une formalisation des connaissances du domaine sur les courbes obtenues. Des expériences comparables ont été réalisées pour la reconnaissance des formes de signaux en hydraulique côtière (Vann et Davis, 1994) et pour l'interprétation de rhéogrammes dans le domaine de la résistance des matériaux (Syed Mustapha *et al.*, 1999).

Sargent (1996), promoteur du référentiel terminologique de Schlesinger *et al.* (1979) pour la modélisation numérique<sup>7</sup>, a lui-même mis en avant l'importance de l'évaluation qualitative des résultats graphiques d'une modélisation dans le cadre d'une validation opérationnelle. Peu d'expériences ont pourtant été réalisées sur l'automatisation d'une telle approche par des techniques d'intelligence artificielle. On peut toutefois citer les travaux d'Ündey *et al.* (2003) qui ont combiné des analyses statistiques avec des raisonnements qualitatifs, pour évaluer des résultats de simulation dans le domaine de la chimie pharmaceutique.

### 6.5.2 Module d'évaluation symbolique de courbes

Un module de description et de comparaison symbolique de courbes a été mis au point il y a quelques années à l'INRIA Sophia-Antipolis (Pitrou, 1998; Duval, 2000). Ce module a été repris récemment au sein du projet ORION par Julien CANET, permettant son intégration avec le moteur d'inférence PEGASE+ et le langage YAKL. Les paragraphes suivants présentent brièvement les grandes lignes de ce module.

#### Description symbolique

Ce module effectue tout d'abord un lissage – paramétrable – des données numériques brutes correspondant à une courbe donnée. Cette courbe est ensuite transformée en une suite de segments, puis normalisée. Plusieurs éléments de cette courbe segmentée sont alors considérés : les *segments*, les *pics* et les *ruptures de pente*. Chacun de ces éléments peut être identifié par plusieurs caractéristiques :

- un segment par sa *pente* et sa *longueur* ;
- un pic par sa *position* sur l'axe des abscisses, sa *largeur*, sa *hauteur* et sa *forme* ;
- une rupture de pente par sa *position* sur l'axe des abscisses et son *amplitude*.

Les valeurs numériques attribuées aux caractéristiques de chaque élément de la courbe sont alors traduites en valeurs *symboliques* à l'aide d'un *dictionnaire* approprié fourni préalablement par un expert du domaine. Un tel dictionnaire permet de définir par exemple que l'amplitude d'une rupture de pente qualifiée de « forte et positive » correspond à une valeur normalisée comprise *probablement* entre 0,05 et 0,10 et *certainement* entre 0,04 et 0,15. Cette valeur représente un nombre *flou* dans le sens donné à l'origine par Zadeh (1965). Un tel nombre flou permet de reproduire de manière satisfaisante l'imprécision intrinsèque du vocabulaire humain.

La description symbolique d'une courbe est ainsi la réunion des qualificatifs attribués aux caractéristiques de chacun de ces éléments. Une description peut ainsi être : un segment *assez long* et plat, une rupture de pente d'amplitude *forte et positive*, un segment *court* et *croissant rapidement*, un pic *haut* et *pointu*, un segment *court* et *décroissant rapidement*, une rupture de pente d'amplitude *faible et positive*, un segment *assez long* et *décroissant*.

7. Voir section 1.1.3, p. 5.



## Comparaison symbolique

La comparaison de deux courbes ou d'une courbe à un ensemble de points peut dès lors s'effectuer non plus à l'aide d'un critère numérique – on peut penser ici au critère de Nash et Sutcliffe (1970) pour la comparaison de deux hydrogrammes<sup>8</sup> – mais sur la base d'une telle description symbolique.

### *Comparaison de deux courbes*

Deux types de comparaisons peuvent être envisagés :

- premièrement, la concordance des qualificatifs de caractéristiques spécifiques peut être testé, comme par exemple celle des symboles attribués à la forme du pic ;
- deuxièmement, la ressemblance globale des deux courbes peut être testée sur la base de la similarité compilée des chaînes de caractères des qualificatifs de chacune des courbes<sup>9</sup>.

### *Comparaison d'une courbe à un ensemble de points*

En complément de la comparaison de deux courbes, nous avons proposé d'introduire une comparaison symbolique d'une courbe à un ensemble de points. Cette comparaison peut s'effectuer encore une fois de deux manières différentes :

- *localement*, en considérant la *position relative* et la *distance* de la courbe à chacun de points. Chacune de ces caractéristiques se voit alors attribuer un qualificatif d'après des définitions préalablement incluses dans le dictionnaire numérique-symbolique. Ces définitions sont posées sur le même modèle que celles des caractéristiques des différents éléments d'une courbe ;
- *globalement*, en considérant une position et une distance *moyennes* de la courbe par rapport à l'ensemble des points. Ces caractéristiques moyennes sont obtenues en compilant les caractéristiques de chacun des points.

## 6.5.3 Perspectives d'intégration au système d'assistance au calage

Comme évoqué précédemment, ce module d'évaluation symbolique de courbes a été intégré avec le moteur d'inférence PEGASE+ et le langage YAKL. Ce dernier permet ainsi la déclaration d'un dictionnaire, l'évaluation automatique et transparente des caractéristiques liées à un objet du type « courbe », ainsi que la comparaison d'un tel objet avec un objet de type « ensemble de points ».

Nous avons anticipé ce besoin futur en définissant dans l'ontologie ONTOHYD<sup>10</sup> les prédictions événementielles (hydrogramme, ligne d'eau, etc.) comme des sous-classes de l'objet générique *courbe*. De la même façon, nous avons défini les données de référence (hydrogramme mesuré, ligne d'eau mesurée, etc.) comme des sous-classes de la classe générique *ensemble de points*.

Nous pourrions ainsi utiliser ce module d'évaluation symbolique de courbes dans le cadre d'une prochaine version du prototype CARMA-2, puisque le langage associé – OVAL – reprend sur ce point les caractéristiques du langage YAKL. La principale difficulté de l'intégration dans le système d'assistance au calage réside dans la mise au

8. Voir section 3.2.3, p. 71.

9. Le degré de similarité est évalué à partir d'un algorithme de remplacement de caractères (Wagner et Fischer, 1974).

10. Voir chapitre 4, figure 4.6.

point de dictionnaires numérique–symbolique fiables et adaptés à chacun des types de courbes présents en hydraulique.

Cette évaluation symbolique de courbes pourra alors être réalisée de manière transparente et délivrer au système les conclusions sur les écarts entre prédictions et données de référence que l'utilisateur fournit actuellement sur la base d'une analyse visuelle.

## 6.6 Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre l'application du prototype CARMA-1 au cas du calage d'un modèle de la Lèze. Ce cas d'étude possède deux spécificités : la disponibilité de données de références externes uniquement, et la nécessité de prendre en compte des apports latéraux pour réaliser une simulation.

Les retours d'expérience sur ce premier cas d'étude permettent de tirer plusieurs conclusions :

- *le prototype fonctionne dans des conditions opérationnelles*, au travers d'une situation hydraulique de calage sur des données externes. Il prouve ainsi qu'une formalisation des connaissances peut être utilisée pour aider un modélisateur dans la réalisation de la tâche de calage. Il faut noter que ce système ne permet évidemment pas de résoudre des problèmes inhérents à la situation, comme par exemple des erreurs sur les données hydrologiques ;
- *le prototype simplifie de manière significative le déroulement du calage*. En effet, la réalisation d'un calage à l'aide du prototype ne requiert d'une part aucune connaissance *a priori* sur les procédures à suivre. Les différentes étapes de cette tâche sont en effet enchaînées de manière *entièrement transparente* pour l'utilisateur. Celui-ci peut néanmoins disposer d'un listing complet des règles activées durant le processus pour une vérification des raisonnements mis en œuvre. D'autre part, un tel calage ne nécessite *aucune connaissance* sur l'utilisation du code MAGE, et notamment sur la transformation des objets du domaine dans des formats de fichiers utilisables par le code. Il permet ainsi à l'utilisateur de se concentrer sur les aspects du calage exigeant une analyse relevant du seul domaine de l'hydraulique ;
- *le prototype permet enfin de garantir l'application d'un « code de bonnes pratiques » sur le processus de calage*. L'utilisation de ce prototype guide l'utilisateur pour ne pas tomber dans certains travers – malheureusement courants – du calage de modèles hydrauliques, comme la surparamétrisation ou le forçage des valeurs des paramètres pour compenser des erreurs sur les données.

Ces conclusions vont être mises à l'épreuve d'une seconde application du prototype dans le chapitre suivant, au travers d'une situation de calage nettement différente de ce premier cas d'étude.



## Chapitre 7

# Calage d'un modèle de l'Hogneau

« Le savoir méthodologique des tisserands et des mécaniciens, celui des musiciens et celui des architectes, celui des ingénieurs hydrauliciens et celui des cartographes sont théorisables, généralisables et enseignables. »

Jean-Louis LE MOIGNE<sup>1</sup>

CE CHAPITRE est consacré à l'application du prototype CARMA-1 au cas du calage d'un modèle de la rivière Hogneau. Nous présentons tout d'abord le cadre de l'étude ainsi que les spécificités de ce calage, notamment par rapport au cas étudié dans le chapitre précédent. Le déroulement de ce calage à l'aide du prototype est ensuite détaillé et suivi des enseignements tirés de cette expérience. Ce cas d'étude a fait l'objet d'une communication à la 6<sup>e</sup> conférence internationale en hydroinformatique (Vidal *et al.*, 2004). Nous comparons enfin l'ajustement des paramètres réalisé à l'aide du prototype avec une approche classique d'optimisation.

### 7.1 Présentation du cas d'étude

Cette section s'attache à décrire le bief modélisé de la rivière Hogneau (voir figure 7.1), l'événement de crue utilisé, ainsi que le modèle numérique que nous nous proposons de caler. Nous écrivons ensuite les spécificités de ce cas d'étude, relatifs à la construction d'une condition limite amont et à la nature des données de référence.

#### 7.1.1 La rivière Hogneau

L'Hogneau est une petite rivière du nord de la France qui prend sa source à la Longueville (département du Nord, alt. 144 m). Drainant un bassin versant d'environ 240 km<sup>2</sup>, elle se jette dans le canal de Condé-Pommeroeul quelques kilomètres au nord-est de Valenciennes et à proximité de la jonction avec l'Escaut (voir figure 7.2). Le bief étudié, d'une longueur d'environ 6 km, se situe à l'aval du bassin versant, entre le moulin de Crespin et la confluence avec le canal de Condé-Pommeroeul.

---

1. Jean-Louis LE MOIGNE (1990), *La modélisation des systèmes complexes*. Collection « AFCET-Systèmes », Dunod, Paris, France, p. 158.

Sur ce bief, la rivière Hogneau est presque entièrement chenalisée et enserrée entre des berges revêtues de plaques en béton soutenues par des pieux et des palplanches (voir figures 7.3 et 7.4). Aucun affluent n'est à signaler sur ce bief puisque le lit de l'Hogneau y est surélevé par rapport à la plaine avoisinante. Sur le pont du village de Thivencelle – c'est-à-dire au milieu du domaine modélisé – est fixée l'unique station hydrométrique de ce bief dont les caractéristiques sont reprises dans le tableau 7.1.

### 7.1.2 La crue de février 2002

En février 2002, la région Nord-Pas de Calais a été soumise à de fortes précipitations entraînant de nombreuses inondations (Diren, 2002). Sur l'Hogneau, la crue du 12 au 14 février a atteint à la station de Thivencelle un débit maximal de  $48,75 \text{ m}^3/\text{s}$ , dont la période de retour est estimée supérieure à 50 ans (Diren, 2003). Cette crue a provoqué l'inondation d'une partie du village de Crespin, ainsi que des ruptures de digues plus ou moins importantes sur le linéaire considéré. Ces ruptures, ayant provoqué des déversements dans des parcelles cultivées, sont nettement visibles sur les photographies aériennes prises durant l'événement (voir DIREN, 2002).

Nous avons choisi cette crue particulière comme crue de référence car elle est d'une part la crue la plus importante depuis l'établissement de la station hydrométrique, et qu'elle a de plus fait l'objet de mesures hydrométriques complémentaires diverses effectuées par la DIREN. Ces données comprennent ainsi :

- l'hydrogramme de crue enregistré à la station de Thivencelle ;
- un point de jaugeage déterminé durant la phase de décrue ;
- 7 niveaux d'eau maximums mesurés à différents emplacements le long du bief ;
- 7 niveaux d'eau mesurés aux mêmes emplacements durant la phase de récession.

### 7.1.3 Modèle numérique

Nous utilisons dans cette étude un modèle numérique – basé sur le code MAGE – du bief compris entre le moulin de Crespin et le seuil situé près de la confluence avec le canal de Condé-Pommeroeul.

Différentes études hydrauliques de ce secteur ont été effectuées récemment (Aqualis, 1998; Safege, 2000). La crue de février 2002 a relancé l'intérêt d'une modélisation numérique pour proposer divers aménagements pour la prévention des crues. Une étude a ainsi été réalisée par le CEMAGREF et le bureau d'études ANTEA pour tester des scénarios d'aménagement de la zone située entre le moulin de Crespin et la confluence avec le canal de Condé-pommeroeul (Poulard, 2002). À cette occasion, deux modèles numériques ont été réalisés – et comparés – à l'aide des codes de calcul MAGE et HEC-RAS (Jourdan, 2002). Le modèle basé sur MAGE a ensuite été repris par Ghavasieh (2003) comme cas d'application de techniques de ralentissement dynamique.

Pour notre étude, nous avons produit une nouvelle version de ce modèle à partir de notre propre analyse des données disponibles. Les données topographiques utilisées comprennent 28 sections en travers fournies par le bureau d'études ANTEA. À ces profils peut être ajouté le niveau du seuil aval ( $16,03 \text{ mNGF}$ ). L'existence de cet ouvrage permet de disposer d'une condition limite aval correcte identifiée par un niveau critique sur le seuil. Nous avons défini les lits « mineur » et « majeur » en nous basant sur la transition entre d'une part, les palplanches et les pieux encadrant le lit de graviers, et d'autre part, les berges des digues (voir les figures 7.3 et 7.4).

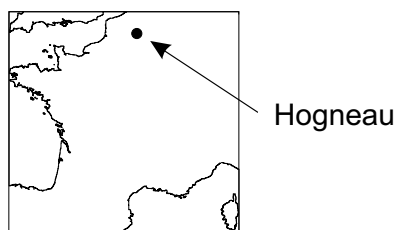


FIG. 7.1 – Localisation géographique du site étudié.

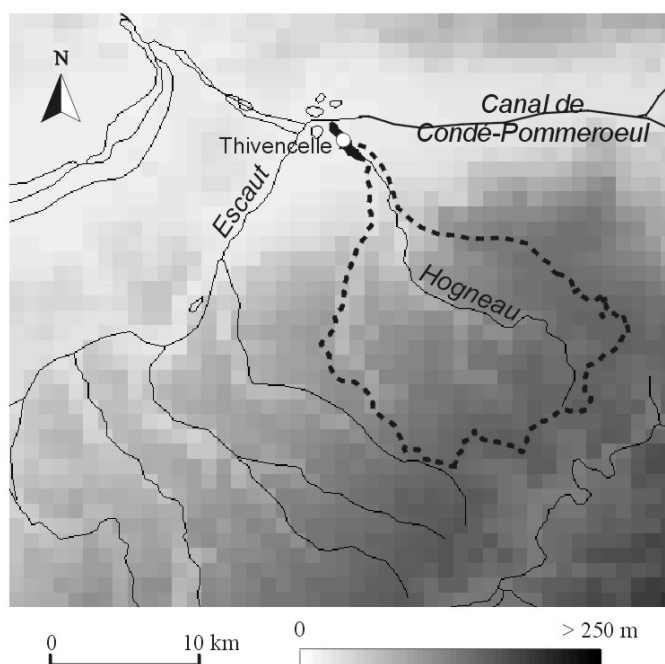


FIG. 7.2 – Carte du bassin versant de l'Hogneau. Le réseau hydrographique est représenté en trait plein fin et le bassin versant de l'Hogneau à Thivencelle est indiqué par des traits forts pointillés. Le bief étudié, situé de part et d'autre de la station hydrométrique de Thivencelle, est quant à lui représenté en trait plein fort.

Nom	Hogneau à Thivencelle
Code HYDRO	E1827020
Superficie du bassin versant	240 km <sup>2</sup>
Altitude du zéro de l'échelle	17,00 mNGF
Coordonnées Lambert II	X = 692328 m, Y = 2605727 m
Qualité des mesures	douteuse en basse eaux, bonne en moyennes et hautes eaux

TAB. 7.1 – Descriptif de la station hydrométrique de l'Hogneau à Thivencelle.



(a) Tronçon 1



(b) Tronçon 2.

FIG. 7.3 – Hogueau – Photographies des différents tronçons du bief étudié, de l'amont vers l'aval (1/2).



(a) Tronçon 3.



(b) Tronçon 4.

FIG. 7.4 – Hogueau – Photographies des différents tronçons du bief étudié, de l'amont vers l'aval (2/2).



Le modèle numérique que nous cherchons à caler est destiné au dimensionnement d'ouvrages de protection contre les crues. Le domaine d'application visé peut donc clairement être classé dans la catégorie de détermination de zones inondables. Le niveau de correspondance attendu est par conséquent une bonne reproduction des niveaux d'eau maximum.

#### 7.1.4 Spécificités du calage

La tâche de calage comporte dans ce deuxième cas d'étude deux caractéristiques qui vont être détaillées dans les paragraphes suivants. Elles proviennent toutes deux de la situation du bief modélisé, s'étendant de part et d'autre d'une station hydrométrique.

##### Construction d'une condition limite amont

La simulation de la crue de février 2002 nécessite la connaissance de l'hydrogramme correspondant à l'amont du domaine modélisé. Or, la station hydrométrique se trouve au milieu de ce domaine. Il est donc nécessaire de formuler des hypothèses pour construire une condition limite amont. Les hypothèses à effectuer pour mener à bien cette tâche sont les suivantes :

1. *l'hydrogramme ne subit pas de déformation entre l'amont du bief et la station de mesure.* Cette première hypothèse n'est bien entendu vérifiable que sur des biefs à la fois courts et sans plaine d'inondation marquée, pour éviter un quelconque écrêtage ou amortissement de l'hydrogramme. Ces deux conditions sont heureusement réunies dans le cas de l'Hogneau : la distance entre l'amont et la station de Thivencelle est de 3 km et le cours d'eau est enserré entre des digues. Formuler cette hypothèse revient ainsi à considérer que l'hydrogramme enregistré peut être obtenu en décalant temporellement l'hydrogramme amont ;
2. *le décalage temporel ne dépend pas des coefficients de résistance.* Cette deuxième hypothèse est tout à fait nécessaire dans l'optique du calage, pour lequel les conditions limites doivent être déterminées préalablement à tout ajustement de paramètres. Cette hypothèse est pourtant difficilement défendable puisque les coefficients de résistance sont les principaux acteurs de ce décalage temporel. L'hypothèse revient en fait à considérer que ce décalage temporel ne dépend pas des coefficients de résistance *dans l'intervalle de variation que l'on peut leur affecter* à partir d'observations de terrain. L'estimation d'un intervalle *a priori* pour les coefficients attribués au modèle de l'Hogneau permet de satisfaire cette hypothèse.

La construction d'une condition limite amont peut se ramener, au travers de ces deux hypothèses, à l'estimation d'un décalage temporel à appliquer à l'hydrogramme enregistré à la station de Thivencelle. Pour ce faire, une simulation doit être réalisée avec les valeurs initiales des paramètres en considérant un décalage nul. La comparaison des hydrogrammes en terme de décalage temporel permet ainsi de déterminer le décalage à adopter.

##### Détermination de zones inondables et calage à l'aide de données internes

Une fois les données d'entrée définies, il reste à considérer les données événementielles restantes pour constituer un jeu de données de références. Le domaine d'application visé étant la détermination de zones inondables, il importe de prendre en compte

des données *distribuées* sur le domaine. Le point de jaugeage ne peut donc apporter des informations suffisantes pour réaliser ce calage.

Nous disposons donc d'une ligne d'eau ainsi que d'une ligne de niveaux maximums, toutes deux composées de 7 points. Malheureusement, les niveaux d'eau mesurés lors de la phase de récession de la crue sont pour la plupart situés au-dessus de la ligne de transition entre zones de résistance correspondant respectivement au lit et aux berges. Cette ligne d'eau ne peut donc servir à déterminer *indépendamment* les seuls coefficients de résistance du lit mineur. L'ajustement sera donc fait simultanément sur les coefficients du lit mineur et du lit majeur. De plus, seuls les niveaux d'eau maximums vont être considérés dans cet ajustement, encore une fois en raison du domaine d'application visé. Par ailleurs, si un écart local est détecté à l'extrémité aval du domaine, le coefficient de débit du déversoir aval pourra être ajusté en conséquence. Les autres données de référence seront utilisées dans l'étape de qualification du modèle pour fournir une appréciation globale sur le modèle calé.

## 7.2 Construction de la base de faits

Comme dans le cas d'étude présenté dans le chapitre précédent, l'ensemble des *faits* décrits dans la section 7.1 a été modélisé au préalable dans le langage YAKL pour constituer la base de faits de ce cas d'étude. Cette base regroupe les déclarations des instances spécifiques au cas d'étude de l'Hogneau. Les paragraphes suivants présentent de manière non exhaustive ces différentes instances.

La figure 7.5 présente un extrait des différents faits relatifs au modèle numérique que l'on se propose de caler. Le système est tout d'abord déclaré, suivi des données disponibles sur ce système. Le modèle numérique est ensuite défini, réunissant le code MAGE et les données topographiques sur le bief étudié de l'Hogneau.

```

...

Argument Instance {
  Système name bief_hogneau
  Attributes
    noeud_amont := moulin_crespin
    abscisse_amont := 31090.0
    noeud_aval := plaplanches_aval
    abscisse_aval := 36270.0 }

Argument Instance {
  DonnéesDuSysteme name topo_hogneau
  Attributes
    bief := bief_hogneau
    sections := | section1 ... pont_thivencelle ... |
    déversoirs := | seuil_aval | }

Argument Instance {
  ModèleNumérique name modèle_hogneau
  Attributes
    code := Mage
    données := topo_hogneau }

```

FIG. 7.5 – Extrait de la base de faits pour le calage de l'Hogneau – Faits relatifs au modèle numérique.

La figure 7.6 présente un extrait de la déclaration des différentes données événementielles disponibles pour réaliser le calage. Les données hydrométriques relatives à l'événement sont déclarées après ce dernier, et l'ensemble des données disponibles est ensuite listé.

```

...
Argument Instance {
  Événement name crue_hogneau_fevrier_02
  Attributes
    début := "12/02/02 00:00"
    fin := "14/02/02 24:00" }
...
Argument Instance {
  HydrogrammeMesuré name hydrogramme_thivencelle_fevrier_02
  Attributes
    crue := crue_hogneau_fevrier_02
    section := pont_thivencelle
    débits := | debit_thivencelle1 ... | }
Argument Instance {
  Jaugeage name jaugeage_tivencelle_14_02_02_18h
  Attributes
    crue := crue_hogneau_fevrier_02
    section := pont_thivencelle
    débit := debit_jaugé_thivencelle
    niveau := niveau_mesuré_thivencelle_14_02_02_18h
Argument Instance {
  LigneDeLaiesses name laisses_13_02
  Attributes
    crue := crue_hogneau_fevrier_02
    début := "13/02/02 00:00"
    fin := "13/02/02 24:00"
    laisses := | laissel ... laisse7 | }
Argument Instance {
  LigneDEauMesurée name niveaux_14_02_14h
  Attributes
    crue := crue_hogneau_fevrier_02
    instant := "14/02/02 14:00"
    niveaux := | niveau1 ... niveau7 | }
Argument Instance {
  DonnéesÉvénementielles name donnees_hydro_hogneau
  Attributes
    hydrogrammes := | hydrogramme_thivencelle_fevrier_02 |
    lignes_d_eau := | niveaux_14_02_14h |
    lignes_d_eau_max := | laisses_14_02_14h | }

```

FIG. 7.6 – Extrait de la base de faits pour le calage de l'Hogneau – Données événementielles.

La figure 7.7 page suivante présente la déclaration du contexte du calage, définissant le domaine d'application visé et le niveau de correspondance attendu. Enfin, la requête de l'utilisateur est définie : caler le modèle de l'Hogneau – déclaré dans la figure 7.5 – avec les données événementielles listées dans la figure 7.6.

```

Object Instance {
  ContexteDuCalage name contexte_calage_modèle_hogneau
  Attributes
    domaine_d_application_visé := "détermination de zones
    inondables"
    niveau_de_correspondance_attendu := "bonne reproduction des
    niveaux d'eau maximums" }

Request {
  calage name calage_modèle_hogneau
  Attributes
    données_évènementielles := donnees_hydro_hogneau
    modèle_à_caler := modèle_hogneau }

```

FIG. 7.7 – Extrait de la base de faits pour le calage de l'Hogneau – Contexte et requête.

## 7.3 Déroulement de la session de calage avec CARMA-1

Dans cette section, nous nous attachons à détailler le processus de calage du modèle de l'Hogneau tel qu'il a été réalisé à l'aide du prototype CARMA-1. Nous adoptons ici une forme quelque peu différente de la présentation effectuée dans le chapitre précédent, en distinguant plusieurs phases durant ce processus, chacune mettant en jeu plusieurs des sept principales étapes du calage.

Le listing complet de la session de calage du modèle de l'Hogneau est reproduit dans la section H.2 de l'annexe H. Les sections suivantes reviennent sur les processus mis en œuvre derrière ce listing.

### 7.3.1 Préliminaires

Lors de cette phase préliminaire, on peut regrouper les deux étapes de définition et d'initialisation des paramètres qui ne sont effectuées qu'une seule fois au début du processus de calage. La définition des paramètres s'effectue de manière identique au cas d'étude précédent, en fournissant au système les limites de tronçons de résistance homogène. Nous avons identifié ici 4 tronçons différents, illustrés par les photographies des figures 7.3 et 7.4. Le système crée donc 8 coefficients de résistance, auxquels il ajoute le coefficient de débit du déversoir aval.

Le choix laissé par le système sur la méthode d'estimation *a priori* des valeurs des coefficients de résistance nous a permis ici d'utiliser l'approche de Cowan (1956) pour ce canal revêtu, contrairement aux préconisations effectuées dans la figure 3.4 (p. 69). Nous sommes en effet ici – tout du moins sur une grande partie du bief étudié – dans le cas particulier d'un canal revêtu et végétalisé, pour lequel la typologie de Chow (1973) donne un intervalle de variation très large du coefficient de résistance :  $n \in [0,030 ; 0,500]$ . L'utilisation de l'équation de Cowan permet quant à elle d'affiner sensiblement cet intervalle. Cette situation met bien en évidence la subjectivité subsistant dans l'estimation d'une valeur initiale et d'une plage de variation des coefficients de résistance.

### 7.3.2 Construction de la condition limite amont

Lors de l'affectation des données, le système va chercher un hydrogramme à utiliser comme condition limite amont. Il va prendre l'hydrogramme enregistré le plus près de

l'amont du domaine – c'est-à-dire l'hydrogramme enregistré à Thivencelle – pour jouer *provisoirement* ce rôle. Il va de plus « garder à l'esprit » – c'est-à-dire dans une variable globale appelée `calage_hogneau.phase` – cette hypothèse qui indique que l'on est dans la phase de construction de la condition limite amont et non dans le cadre réel du calage :

```

Rule {
  name vérification_condition_limite_amont
  Let calage_hogneau a état_du_calage
  If données_évènementielles.hydrogrammes(1).position <>
    données_du_système.rivière.abscisse_amont
  Then condition_limite_amont.hydrogramme :=
    données_évènementielles.hydrogrammes(1) ,
    calage_hogneau.phase := "construction de la
    condition limite amont" }

```

Le système vérifie qu'aucun hydrogramme réparti ni aucune ligne d'eau susceptible de jouer le rôle d'une condition initiale n'est disponible, et utilise la présence du déversoir pour construire une condition limite aval en régime critique.

Après la réalisation d'une simulation – toujours aussi transparente pour l'utilisateur – le système, se souvenant que la condition limite amont doit être construite, affiche les hydrogrammes enregistré et calculé à Thivencelle. Cet affichage est reproduit sur la figure 5.12 (p. 139). L'utilisateur est ensuite invité à qualifier le décalage entre ces deux hydrogrammes. Le jugement apporté sur ce décalage va ensuite être transmis à l'opérateur responsable de la construction de la condition limite amont :

```

Rule {
  name transmission_décalage_condition_limite_amont
  Let calage_hogneau a état_du_calage
  If assess_operator? ComparaisonDesPrédictions
    hydrogramme_en_retard ,
    calage_hogneau.phase == "construction de la condition
    limite amont"
  Then send_operator SélectionDeLaConditionLimiteAmont
    décalage_négatif }

```

Cet opérateur va alors *décaler* l'hydrogramme amont – ici de  $-30$  min, pour un hydrogramme qualifié de « en retard » – de façon à ce que les hydrogrammes enregistré et calculé à Thivencelle coïncident :

```

Rule {
  name
    décalage_hydrogramme_en_avance_condition_limite_amont
  If assess_operator? SélectionDeLaConditionLimiteAmont
    hydrogramme_en_retard
  Then condition_limite_amont.hydrogramme.décalage := -30.0
  }

```

Une nouvelle simulation est alors être réalisée avec la condition limite amont décalée et les deux hydrogrammes à nouveau comparés. Nous avons estimé à ce niveau que l'hydrogramme était toujours légèrement en retard et un décalage supplémentaire de  $-10$  min a été appliqué. Après une troisième simulation, les hydrogrammes coïncident de façon satisfaisante, et la phase de calage peut réellement débiter.

Au vu du domaine d'application visé et du niveau de correspondance attendu, la ligne d'eau enveloppe de la crue est affichée, conjointement avec les niveaux d'eau maximum mesurés. Le système pose ensuite plusieurs questions à l'utilisateur pour évaluer l'écart entre ces deux entités et réaliser des ajustements en conséquence.

### 7.3.3 Calage du coefficient de débit

Après s'être assuré que l'écart n'était pas global (voir section 5.3.3, p. 137), le système demande à l'utilisateur de qualifier l'écart sur le tronçon le plus à l'aval en terme, d'une part de *position verticale relative* de la courbe par rapport aux points mesurés sur ce tronçon, et d'autre part de *distance* entre la courbe et ces points. Nous avons ici estimé que la courbe se trouvait « loin au-dessus » des points, et que cet écart était plus prononcé près de l'ouvrage situé à l'extrémité aval de ce tronçon. Le système transmet alors ce jugement à l'opérateur concerné par l'ajustement du paramètre incriminé :

```

Rule {
  name transmission_ligne_d_eau_loin_au_dessus
  If assess_operator? ComparaisonDesPrédictions
    ligne_d_eau_loin_au_dessus ,
    assess_parameter? ouvrage_influence
  Then send_operator ValuationDesCoefficientsDeDébit
    ligne_d_eau_loin_au_dessus}

```

Cet opérateur va alors augmenter le coefficient de débit pour faire baisser la ligne d'eau sur ce tronçon, puis relancer une simulation avant d'afficher à nouveau la ligne d'eau enveloppe et les niveaux d'eau maximums mesurés.

### 7.3.4 Calage des coefficients de résistance

Les mêmes questions qu'au-dessus sont alors posées à l'utilisateur. Nous avons estimé ici qu'il subsistait un écart local sur ce tronçon, mais qu'il était plus prononcé loin de l'ouvrage. Le système va alors transmettre ce jugement à l'opérateur qu'il estime susceptible réduire cet écart :

```

Rule {
  name transmission_ligne_d_eau_loin_au_dessus
  If assess_operator? ComparaisonDesPrédictions
    ligne_d_eau_loin_en_dessous
  Then send_operator
    ValuationDuCoefficientDeRésistanceTronçon4
    ligne_d_eau_loin_en_dessous }

```

Cet opérateur va alors être réexécuté après avoir modifié ses paramètres internes :

```

Rule {
  name interpretation_decalage_hydrogramme_en_avance
  If assess_operator?
    ValuationDuCoefficientDeRésistanceTronçon4
    ligne_d_eau_loin_en_dessous
  Then assess_parameter ajustement_important ,
    assess_parameter resistance_lit_mineur_trop_faible ,
    assess_parameter resistance_lit_majeur_trop_faible ,
    re_execute }

```

Les valeurs des coefficients de résistance sont ensuite modifiées en conséquence par cet opérateur, et une simulation est relancée, avant d'afficher à nouveau la ligne d'eau enveloppe et les niveaux d'eau maximums mesurés. Lorsque l'utilisateur estime que cette ligne d'eau passe au milieu des points mesurés sur le tronçon courant, le système demande ensuite à l'utilisateur une comparaison similaire sur le tronçon *situé immédiatement en amont*. Une procédure identique d'ajustement des coefficients de résistance de ce nouveau tronçon est alors réalisée. Nous reviendrons sur ce point dans la section 7.4.4.

L'ensemble de ces suites de comparaison–ajustement est réalisée jusqu'à ce que tous les tronçons aient été étudiés.

### 7.3.5 Qualification du modèle calé

La ligne d'eau enveloppe est une dernière fois affichée pour que l'utilisateur fournisse au système un qualificatif concernant sa représentation des niveaux d'eau maximums. Nous avons ici estimé que cette reproduction est bonne. Le système va alors sélectionner successivement chacune des autres données de référence disponibles et les afficher conjointement aux prédictions correspondantes du modèle calé. Pour chacune d'entre elles, la qualité de la reproduction par le modèle calé est demandée à l'utilisateur. Nous avons estimé que ces reproductions étaient *assez bonne* ou *passable*.

L'ensemble de ces qualificatifs est enfin compilé par le système pour fournir l'appréciation globale sur le modèle calé.

## 7.4 Retours d'expérience

Dans cette section, nous allons revenir sur quelques points du déroulement de ce calage pour tenter d'en tirer des enseignements sur la mise en œuvre opérationnelle de notre prototype. Mais avant cela, nous allons vérifier l'hypothèse nous ayant servi pour la construction de la condition limite amont, c'est-à-dire l'invariance de l'hydrogramme calculé à Thivencelle avec les coefficients de résistance. Nous regardons ensuite de plus près les *résultats* de ce calage en terme de reproduction de la crue simulée.

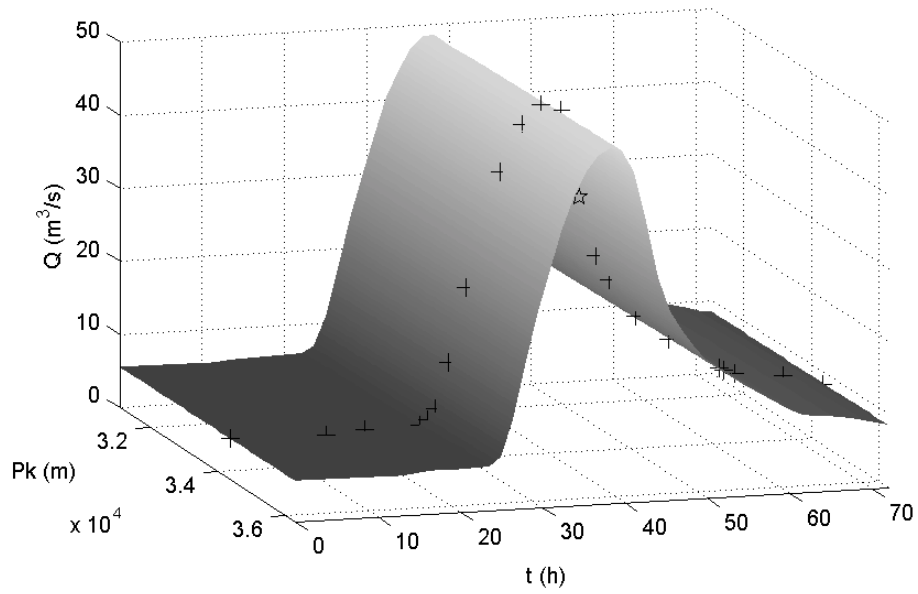
### 7.4.1 Vérification de l'hypothèse d'invariance de l'hydrogramme

L'hypothèse effectuée pour construire la condition limite amont peut être vérifiée *a posteriori* en comparant les hydrogrammes calculés avec les plus petites et les plus grandes valeurs du coefficient  $n$  de Manning données par les intervalles de variation. Cette comparaison permet de constater que les débits de pointe de l'hydrogramme varient de  $0,08 \text{ m}^3/\text{s}$  et que le décalage de ces deux hydrogrammes est de seulement 15 minutes. L'hypothèse effectuée peut donc être considérée comme vérifiée.

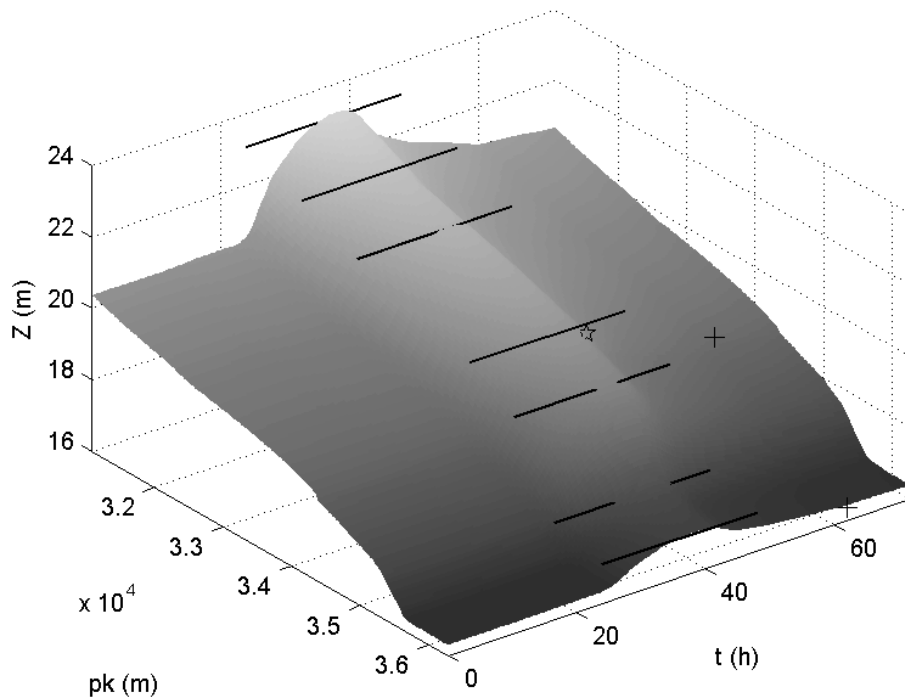
### 7.4.2 Comparaison des crues simulée et mesurée

La figure 7.8 montre une comparaison des résultats numériques du modèle calé avec l'ensemble des données événementielles disponibles, suivant la représentation graphique tridimensionnelle évoquée dans le chapitre 2 (p. 46).

Sur la figure 7.8(a), on peut voir que l'hydrogramme enregistré à la station de Thivencelle est bien reproduit, ce qui est naturel au vu de l'approche utilisée pour la construction de la condition limite amont et de la vérification des hypothèses afférentes



(a) Dans un repère  $Q(x,t)$ . Les croix correspondent aux débits enregistrés et l'étoile au débit jaugé.



(b) Dans un repère  $z(x,t)$ . Les segments correspondent aux niveaux maximums mesurés le 13/02/02, les croix aux niveaux d'eau instantanés mesurés et l'étoile au niveau mesuré durant le jaugeage. On peut noter que certains niveaux d'eau mesurés durant la phase de récession – notamment dans la partie amont du bief – n'apparaissent pas sur le graphique car ils sont situés au-dessous de la surface de crue calculée.

FIG. 7.8 – Représentation de la crue de l'Hogneau de février 2002. La surface représente les variables calculées par le modèle numérique, alors que les lignes et les points représentent les données mesurées. L'origine des temps est prise à 00h00 le 12/02/02.



réalisée ci-dessus. En revanche, on peut noter que le débit jaugé durant la période de décrue est inférieur au débit calculé correspondant. Une explication peut être trouvée dans l'incertitude sur l'heure exacte de ce jaugeage : la mesure de ce débit n'a certainement pas été instantanée, et l'heure indiquée correspond peut-être au début des mesures d'exploration du champ des vitesses. Ce jaugeage ayant été réalisé dans une phase de décrue pendant laquelle le régime varie fortement, il est possible – nous en sommes réduits à des conjectures – que le débit indiqué soit représentatif de l'écoulement observé une heure plus tard que la date indiquée, ce qui le mettrait plus en accord avec les résultats de la simulation.

Sur la figure 7.8(b), on peut voir que les niveaux d'eau maximum mesurés durant la journée du 13/02/02 sont reproduits assez correctement, ce qui est le résultat de la procédure de calage. En revanche, la plupart des niveaux d'eau mesurés durant la phase de récession sont nettement surestimés, et notamment sur la partie amont du bief modélisé. Le modèle calé nous fournit ainsi une représentation très discutable des lignes d'eau à faible débit. Il faut noter que cet aspect ne nuit pas forcément à la qualité du modèle dans le cadre du domaine d'application visé. En revanche, il interdit l'utilisation de ce modèle pour d'autres applications. Les raisons de ces écarts doivent être cherchées dans des erreurs sur les données topographiques dont nous disposons, qui se répercutent de manière plus nette sur de faibles tirants d'eau.

### 7.4.3 Définition des coefficients de résistance

Comme rappelé dans le chapitre précédent (section 6.4.2), l'étape de définition des paramètres est cruciale, en particulier dans un processus de calage s'appuyant sur des données *internes*. Il importe donc d'être particulièrement vigilant dans l'approche employée pour définir les tronçons homogènes, qui ne doit *en aucun cas* s'appuyer sur l'existence ou non de données de référence. Cette approche, contraire au « code de bonnes pratiques » pour le calage, a cependant été suivie par Ghavasieh (2003, p. 126) dans sa modélisation de l'Hogneau :

Par ailleurs, les mesures des niveaux d'eau sont disponibles en sept sections. Nous avons donc divisé le tronçon en six segments, de manière à pouvoir ajuster au mieux les lignes d'eau calculées à la situation de référence.

La localisation des données de référence va pourtant influencer le processus de calage, non pas lors de la définition des paramètres, mais lors de l'ajustement de leurs valeurs, comme nous allons le voir dans la section suivante.

### 7.4.4 Ajustement itératif des paramètres de l'aval vers l'amont

Lorsque l'écart sur une donnée de référence interne comme une ligne d'eau est considéré comme non global, le système doit considérer des écarts *locaux*. Nous avons implémenté dans le système tout d'abord une comparaison locale par tronçons homogènes de l'aval du domaine vers l'amont. Le choix de ce type de comparaison provient du régime d'écoulement considéré – régime fluvial – dans lequel les informations sur les niveaux transitent de l'aval vers l'amont. L'ajustement des paramètres s'effectue donc aussi de manière locale sur le tronçon considéré, jusqu'à une concordance avec les mesures prises sur ce tronçon.

Prenons à présent l'exemple d'un tronçon défini comme homogène et sur lequel aucune mesure n'a été effectuée. Aucun argument ne peut ainsi être avancé au niveau

local pour modifier les valeurs des coefficients de résistance de ce tronçon. En revanche, le choix de conserver les valeurs initiales va nécessairement influencer sur les résultats obtenus à l'amont de ce tronçon. Le système d'assistance au calage ne prend pour l'instant pas en compte ce cas de figure, et l'utilisateur est libre de fournir au système sa vision ou non d'un écart sur le tronçon considéré.

Nous proposons d'implémenter le raisonnement suivant pour résoudre cette indétermination : les écarts locaux doivent être considérés conjointement sur le tronçon incriminé et sur le tronçon immédiatement à l'amont sur lequel des mesures ont été effectuées. L'ajustement des coefficients de résistance devra alors s'effectuer d'une manière identique sur les deux tronçons.

Nous effleurons du doigt à travers cet exemple le nombre de situations différentes qui peuvent se présenter lors d'un calage à l'aide de données internes discrètes.

#### 7.4.5 Ajustement dissocié des coefficients du lit mineur et du lit majeur

Les deux cas d'études évoqués dans ces travaux n'ont pas permis d'évoquer un ajustement séparé des coefficients de résistance du lit mineur et du lit majeur. Cette situation se rencontre lorsque deux jeux de niveaux d'eau sont disponibles sur le bief modélisé, l'un pour lequel l'écoulement est contenu en-deçà de la transition lit mineur–lit majeur, et l'autre pour lequel l'écoulement se situe au-dessus de cette transition. Il faut noter l'importance de la définition de ce niveau de transition, qui ne correspond pas nécessairement au niveau de débordement dans une plaine d'inondation. En effet, ce niveau peut intervenir beaucoup plus bas, pour distinguer la résistance du lit même de celle des berges. Dans le cas où le modèle doit aussi prendre en compte une plaine d'inondation *active* – c'est-à-dire dans laquelle les vitesses ne sont pas négligeables – il serait nécessaire de considérer un troisième coefficient de résistance par section, ce que ne permet pas actuellement le code MAGE.

Dans une telle situation, le prototype CARMA-1 réalise tout d'abord l'ajustement des coefficients du lit mineur à l'aide des mesures effectuées à faible débit, puis ensuite l'ajustement des coefficients du lit majeur sur les niveaux mesurés à fort débit, en conservant constant les coefficients du lit mineur. Cette approche permet ainsi de garantir de meilleures performances du modèle dans toute la gamme des écoulements.

### 7.5 Expérimentation d'une optimisation numérique

Au travers de ce cas d'étude, nous avons pu voir que l'ajustement des coefficients de résistance sur la base d'une comparaison visuelle pouvait s'avérer long et fastidieux (voir annexe H, section H.2). Nous avons donc décidé de comparer notre approche visuelle à une approche par optimisation numérique. Les sections suivantes présentent brièvement le principe de l'algorithme utilisé et les résultats obtenus.

#### 7.5.1 Algorithme du recuit simulé

Jean-Baptiste FAURE a implémenté un algorithme de recuit simulé<sup>2</sup> autonome. Nous avons utilisé cet algorithme pour réaliser une optimisation des coefficients de résistance du modèle numérique de l'Hogneau. L'idée principale de cet algorithme,

2. En anglais : *simulated annealing*.

proposé par Kirkpatrick *et al.* (1983), est de simuler ce qui se passe lors du refroidissement d'un liquide chaud. La fonction coût représente l'énergie du système et l'état d'équilibre la solution optimale. Le facteur de réduction  $\tau$  de la température est un des principaux paramètres de l'algorithme. Celui-ci permet, à l'aide de perturbations aléatoires, de réaliser une optimisation *globale*, contrairement aux algorithmes « classiques » présentés dans la section 3.2.3 du chapitre 3. L'algorithme du recuit simulé a déjà été utilisé en hydrologie par Sumner *et al.* (1997).

## 7.5.2 Expériences

Nous avons réalisé deux types d'expériences avec cet algorithme : la première a consisté à imposer aux paramètres les espaces de variations physiques déterminés à l'aide du prototype CARMA-1, tandis que la deuxième n'imposait aucune limite aux valeurs des coefficients de résistance. Pour chacune de ces expériences, nous avons testé deux valeurs du facteur  $\tau$  de réduction de la température. Nous avons utilisé ici comme fonction coût la valeur moyenne des écarts entre ligne d'eau calculée et niveaux observés :

$$J = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 |z_c^i - z_o^i|$$

Ce choix a été motivé par la proximité de cette fonction coût avec le critère visuel *a priori* le plus utilisé. Le tableau 7.2 présente les résultats de cette optimisation en terme de valeur de la fonction coût. On peut voir que l'utilisation de l'algorithme sous contraintes permet de diminuer légèrement l'écart obtenu par une méthode visuelle. On peut toutefois noter que cette diminution de 2 cm de l'écart moyen nécessite entre 3000 ( $\tau = 0,90$ ) et 30000 ( $\tau = 0,99$ ) simulations. À des fins de comparaison, l'ajustement manuel n'a nécessité qu'une petite dizaine de simulations. L'utilisation de l'algorithme sans contraintes sur les valeurs des coefficients de résistance permet quant à lui une réduction sensible de cet écart moyen, pour un nombre de simulations équivalent à l'expérience avec contraintes.

Expérience	Paramètre	Valeur optimale en cm
Avec contraintes	$\tau = 0.99$	9,3
Avec contraintes	$\tau = 0.90$	9,2
Sans contraintes	$\tau = 0.99$	5,4
Sans contraintes	$\tau = 0.90$	5,0
Ajustement manuel		11,3

TAB. 7.2 – Résultats des expériences en terme de valeur optimale de l'écart moyen entre niveaux observés et calculés.

La figure 7.9 présente les couples de coefficients de résistance ( $n_{\text{mineur}}, n_{\text{majeur}}$ ) correspondant aux valeurs optimales obtenues au travers de ces expériences. On peut constater que si les résultats de l'optimisation sans contraintes sont très bons en terme de valeur de la fonction coût, ils correspondent à des jeux de paramètres physiquement nettement *irréalistes*. En revanche, les jeux de coefficients obtenus à l'aide d'une optimisation avec contraintes ne sont pas très éloignés de ceux obtenus par un ajustement manuel.

- Valeurs initiales
- Valeurs finales par ajustement manuel
- ◇ Valeurs optimales ( $\tau=0,90$ )
- Valeurs optimales ( $\tau=0,99$ )
- × Valeurs optimales sans contraintes ( $\tau=0,90$ )
- + Valeurs optimales sans contraintes ( $\tau=0,99$ )
- Espace de variation pour le tronçon 1
- - - Espace de variation pour le tronçon 2
- · · Espace de variation pour le tronçon 3
- · - Espace de variation pour le tronçon 4

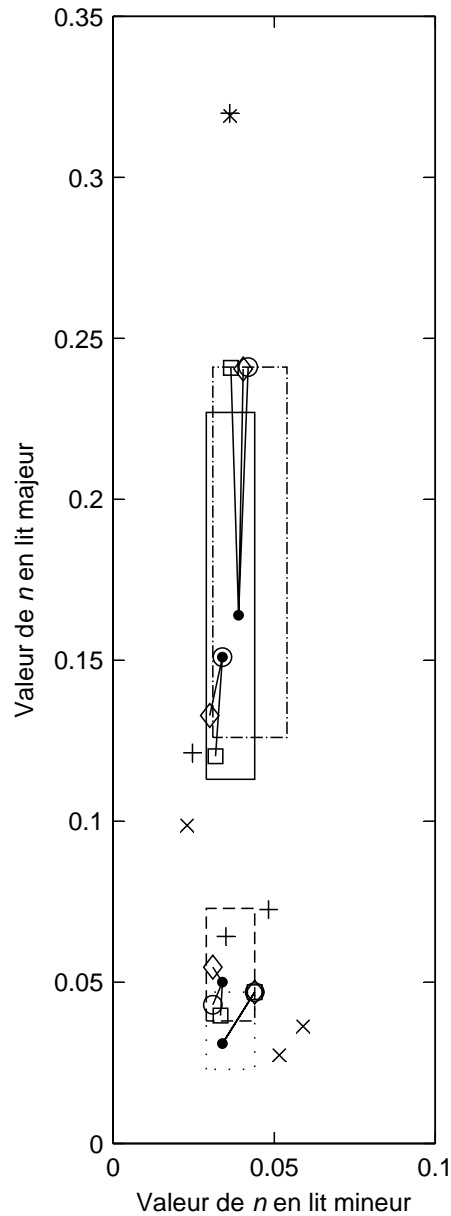


FIG. 7.9 – Résultats des expériences en terme de jeux de paramètres optimums. On peut noter les valeurs extrêmes des coefficients de résistance obtenus avec une optimisation sans contraintes.

Ces rapides expériences d'optimisation numérique ont permis de mettre en lumière deux points importants :

- premièrement, la mise en œuvre d'une optimisation nécessite des connaissances *a priori* sur les paramètres, et notamment leurs intervalles de variation et leurs valeurs initiales. Cette constatation rejoint les réflexions effectuées dans la section 3.2.3 (p. 76) sur la nécessité d'une expertise conjointe, afin de réaliser toutes les autres étapes du processus de calage : affectation des données, définition des paramètres, etc.
- deuxièmement, l'utilisation de telles techniques peut permettre d'obtenir un meilleur *niveau de correspondance* pour le modèle, au détriment bien entendu du nombre de simulations à réaliser. Ce deuxième point pourrait être exploité en intégrant un algorithme d'optimisation au sein du système d'assistance au calage, afin de décharger l'utilisateur de l'ajustement basé sur une comparaison visuelle.

Nous disposons ainsi à présent de deux voies à explorer pour automatiser l'étape de comparaison des prédictions : l'une consiste à utiliser le module d'évaluation symbolique de courbes présenté dans le chapitre précédent, tandis que l'autre revient à intégrer un code d'optimisation dans le prototype de système d'assistance au calage.

## 7.6 Conclusions

Nous avons détaillé dans ce chapitre l'application du prototype CARMA-1 au calage d'un modèle de l'Hogneau. Ce second cas d'étude présente des spécificités différentes du cas d'étude présenté dans le chapitre 6 : nécessité de construire une condition limite amont, utilisation de données de référence internes, ajustement itératifs des paramètres, etc.

L'application du prototype à ces cas d'étude a permis de parcourir une gamme assez variée de situations potentielles de calage, consécutive aux domaines d'application visés des modèles, ainsi qu'à la nature et au nombre de données événementielles disponibles pour caler chacun d'entre eux.

Ces deux chapitres permettent ainsi de tirer plusieurs conclusions sur la mise en œuvre opérationnelle de notre prototype :

- *des situations variées de calage peuvent être abordées à l'aide du prototype*. Le cas d'étude présenté dans ce chapitre a ainsi permis de confronter le prototype à un calage à l'aide de données internes, et de vérifier sa capacité à gérer la nécessité de construire une condition limite amont à partir des données disponibles ;
- *l'apport du système d'assistance au calage à une « bonne pratique » du calage peut se révéler décisif*. Ce cas d'étude fournit des exemples supplémentaires de pièges tendus au modélisateur lors du calage – notamment dans la définition et l'ajustement des paramètres – et que le système contribue à éviter.

Nous avons démontré au travers des deux cas d'étude présentés dans cette troisième partie que le prototype CARMA-1 constituait un système *opérationnel* d'assistance au calage. Les connaissances implémentées dans ce prototype ont ainsi permis de guider un utilisateur dans la tâche de calage de deux modèles numériques dans des types de situations courantes en ingénierie.

# Conclusion générale

Nous avons abordé dans cette thèse la tâche de calage à l'aide d'un système à base de connaissances, dans le but de copier le travail d'artisanat – ou d'art (Rogers, 2002) – du modélisateur. Nous reprenons dans les sections suivantes les principaux résultats de ces travaux, puis nous envisageons quelques-unes des nombreuses perspectives de recherche qui en découlent.

## Résultats

À l'intersection des domaines de l'hydraulique fluviale, du calage de modèles numériques et des systèmes à base de connaissances, ces travaux ont tiré profit de leur interdisciplinarité pour produire trois résultats majeurs : la capitalisation des connaissances sur le calage de modèles hydrauliques, la mise en œuvre de ces connaissances au sein d'un système d'assistance au calage de modèles hydrauliques opérationnel et évolutif, et enfin la spécification d'outils d'intelligence artificielle dédiés à la tâche de calage.

## Capitalisation des connaissances

Dans ces travaux, nous nous sommes appuyés sur le référentiel terminologique établi par Refsgaard et Henriksen (2004) – voir figure 1.2, p. 8 – pour préciser les relations entre les différents concepts fondamentaux en modélisation numérique : *modèle numérique*, *code de calcul*, etc. Ce référentiel a permis de construire un protocole de modélisation numérique dans lequel s'inscrivent les activités de validation opérationnelle, et notamment la tâche de calage de modèle (voir chapitre 1).

Nous avons ensuite collecté et répertorié les connaissances nécessaires au modélisateur pour mener à bien la tâche de calage de modèles hydrauliques. Deux grands types de connaissances peuvent être identifiés : les *connaissances descriptives* concernent pour leur part les objets et concepts manipulés durant la tâche de calage. Nous avons inventorié ces connaissances dans le cadre du chapitre 2. Les *connaissances inférentielles* représentent quant à elles les activités du modélisateur manipulant ces objets. Les différentes approches adoptées et procédures mises en œuvre dans la pratique ont été commentées dans le chapitre 3.

Cette somme de connaissances aussi diverses que complémentaires a ensuite fait l'objet dans le chapitre 4 d'une formalisation, à l'aide notamment de la norme UML. Les travaux présentés dans cette première partie constituent donc une véritable *capitalisation de ces connaissances*, qui s'est concrétisée à trois niveaux différents :

- *au niveau du code de calcul* MAGE : la formalisation des connaissances liées à son utilisation permet d'apporter une description du comportement fonctionnel ex-

terne du code ainsi que des fichiers produits et utilisés, en référence à des notions et des objets relevant du domaine de l'hydraulique. Cette approche fournit ainsi une alternative à une partie du traditionnel manuel de l'utilisateur du code de calcul.

- *au niveau hydraulique* : notre modélisation des connaissances a permis d'une part de structurer les objets du domaine de l'hydraulique au sein d'une ontologie, appelée ONTOHYD. D'autre part, nous avons pu dégager des heuristiques employées par un expert hydraulicien pour faire face à plusieurs situations de calage. La majorité d'entre elles n'avaient pas fait auparavant l'objet d'une formalisation dans la littérature. En effet, elles relèvent du *savoir-faire* de l'ingénieur hydraulicien et ne s'acquièrent qu'au prix de longues années de pratique. Nous espérons que notre modélisation, en inscrivant ces connaissances inférentielles noir sur blanc, contribuera à faciliter leur transmission aux ingénieurs néophytes.
- *au niveau générique* : en connexion avec le cadre méthodologique élaboré dans le chapitre 1, nous avons modélisé des connaissances indépendantes du domaine d'application, à travers une ontologie pour la validation opérationnelle – appelée ONTOVAL – et un *paradigme* pour le calage de modèles numériques. Ces deux éléments fournissent ainsi aux modélisateurs des lignes directrices – valables dans les différents domaines de la gestion des ressources en eau – pour la réalisation de la tâche de calage dans une démarche d'*assurance qualité*.

### Système d'assistance au calage de modèles hydrauliques

Après avoir répondu au premier des objectifs de ces travaux, nous nous sommes attachés à mettre en œuvre de manière opérationnelle ces connaissances. Dans ce but, nous avons utilisé des techniques de systèmes à base de connaissances, et plus particulièrement des techniques de pilotage de programmes, sous forme d'un *moteur d'inférence* appelé PEGASE+ et du langage de représentation de connaissances associé appelé YAKL . Nous avons ainsi transcrit les connaissances modélisées dans ce langage afin de construire une base de connaissances pour le calage de modèles hydrauliques. Par l'intermédiaire du moteur PEGASE+, nous avons ainsi obtenu un premier prototype de système d'assistance au calage (voir chapitre 5).

#### opérationnel...

Baptisé CARMA-1, ce prototype a été mis dans des conditions de fonctionnement opérationnel au travers de deux cas d'étude. Les retours d'expérience sur ces deux cas de calage, exposés dans les chapitres 6 et 7, ont ainsi permis de prendre conscience de l'apport du prototype pour un modélisateur dans la réalisation de cette tâche. Trois contributions majeures ont été identifiées :

- *l'automatisation d'un grand nombre d'opérations* décharge le modélisateur de procédures habituellement longues et fastidieuses : formatage des données, réalisation d'une simulation, extraction des résultats , ajustement des paramètres, etc. ;
- *les connaissances requises se réduisent à l'essentiel* et portent sur des points spécifiques relevant moins de l'expérience sur le calage de modèles hydrauliques que du sens pratique commun ;
- *le déroulement du processus de calage est guidé par un « code de bonnes pratiques »* identifié au travers de l'examen des différentes sources de connaissances à notre

disposition. Cette propriété permet ainsi d'assurer la qualité du processus, et par conséquent la qualité du modèle, naturellement dans les limites imposées par celle des différentes données utilisées.

### ...et évolutif

Ce premier prototype, s'il prend en compte plusieurs types de calage, ne peut prétendre remplacer les conseils d'un expert dans l'ensemble des situations potentielles. Nous rejoignons ainsi les propos d'un des fondateurs de l'intelligence artificielle, Turing (1950) :

*It is not possible to produce a set of rules purporting to describe what a man should do in every conceivable set of circumstances.*

Pourtant, la capacité d'évolution est la principale caractéristique des systèmes à base de connaissances. Dans le but d'accroître cette propriété de notre prototype, nous avons mis au point un deuxième prototype – baptisé CARMA-2 – dont la base de connaissances se restreint aux raisonnements du domaine d'application. L'expert peut ainsi aisément enrichir cette base pour produire une version du système d'assistance au calage capable de faire face à de nouvelles situations.

### Outils d'intelligence artificielle dédiés au calage de modèles numériques

La mise au point du prototype CARMA-2 a nécessité le développement d'outils d'intelligence artificielle intégralement dédiés à la tâche de calage de modèles numériques (voir chapitre 5). Ces outils regroupent un *moteur d'inférence* – appelé HYDRE – simulant le processus générique de calage, et le langage de représentation de connaissances associé, appelé OVAL. Ces deux outils permettent de construire des systèmes à base de connaissances destinés à aider le modélisateur dans la tâche de calage dans un domaine donné.

Ces deux outils sont destinés à un expert d'un domaine – hydraulique, hydrologie distribuée, etc. – disposant d'un code de calcul à partir duquel construire des modèles numériques. Cet expert peut déclarer aisément grâce au langage OVAL toutes les spécialisations dans son domaine des concepts génériques de l'ontologie ONTOVAL : il peut ainsi définir ce que sont un modèle numérique, des paramètres, des données événementielles, etc. dans son domaine. Il peut aussi représenter les raisonnements associés à ces concepts et mis en œuvre lors de la tâche de calage. Les connaissances requises pour l'utilisation du code de calcul – dans le cadre de cette tâche précise – peuvent enfin être formalisées grâce à la syntaxe conservée du langage YAKL.

Le moteur d'inférence HYDRE simule quant à lui le processus de calage générique tel que nous l'avons défini dans le chapitre 4 (figure 4.8, p. 99). Il permet ainsi à l'expert de se concentrer uniquement sur les connaissances de son domaine lors de la construction de la base de connaissances en langage OVAL. L'association du moteur d'inférence et de la base de connaissances permet alors d'obtenir directement un système d'assistance au calage de modèles dans le domaine considéré.



## Perspectives

Les résultats de ces travaux permettent d'envisager de nombreux axes de recherche et nous allons en esquisser quelques-uns dans les sections suivantes.

### Vers une cinquième génération de modélisation ?

Lors d'une conférence sur la modélisation dans les différents domaines de l'hydraulique, Abbott (1989) a proposé un schéma générationnel de développement de systèmes de modélisation. La première génération correspond à la délégation aux ordinateurs de tâches répétitives incombant auparavant à l'hydraulicien, par exemple au travers de la programmation d'algorithmes de résolution d'équations. La seconde génération correspond à l'implémentation de méthodes numériques adaptées aux problèmes d'hydrodynamique, comme la méthode des différences finies pour les équations différentielles. De tels systèmes étaient bâtis spécifiquement pour chaque site étudié. Le développement de systèmes génériques, adaptés non plus à un site donné, mais à une catégorie de problème, correspond à la troisième génération de modélisation. Un exemple de ce type de système est donné par le code de calcul MAGE, dédié à la modélisation en hydraulique fluviale unidimensionnelle. La quatrième génération, comme rappelé en introduction, a constitué une rupture importante du point de vue socio-économique (Abbott, 1994) en combinant les possibilités de calcul des systèmes de troisième génération aux apports des technologies de l'information, au travers d'interfaces et autres facilités graphiques (Abbott *et al.*, 1991). L'environnement de modélisation AM0 (Tardy, 2003; Le Drogo, 2004) constitue un exemple de système de quatrième génération.

Selon Abbott (1989, 1991), la cinquième génération devait voir le jour en réunissant des travaux issus de l'hydraulique numérique et de l'intelligence artificielle. De nombreux travaux prétendant relever de cette cinquième génération ont été réalisés ces dernières années, suivant cette définition rappelée en tête du chapitre 5 (voir par exemple Nielsen *et al.*, 1987; Chau et Chen, 2001; Chau, 2004). Harvey (2002) avance l'idée que cette nouvelle génération est encore à inventer et propose pour cela plusieurs pistes (Harvey *et al.*, 2002).

Abbott (1991, p. 29) propose une analyse de ces différentes générations de modélisation à partir d'une représentation selon trois axes :

*The first three generations then provided primarily an advance along the axis of depth of scientific development, the fourth provides primarily an advance along the axis of breadth of application, while the fifth provides primarily an advance along the axis of height of competitive potential.*

Harvey (2002, p. 73) a repris ces notions en tentant de placer ces cinq générations dans un diagramme simplifié constitué des axes « ampleur du domaine d'applicabilité » et « facilité de configuration ». Nous nous sommes inspirés de ces approches pour proposer une représentation semi-quantitative de la *valeur globale* des systèmes de chacune des générations, valeur exprimée en sommant leurs performances selon quatre critères :

- l'*acuité* de réalisation – c'est-à-dire le contenu scientifique – des tâches supportées par le système ;
- la *diversité* de ces tâches ;
- la *facilité* d'exécution de ces tâches par un utilisateur final ;
- et l'*évolutivité* du système concernant les tâches supportées.

La figure 7.10 compare ainsi cette valeur à notre évaluation de celle des prototypes CARMA-1 et CARMA-2.

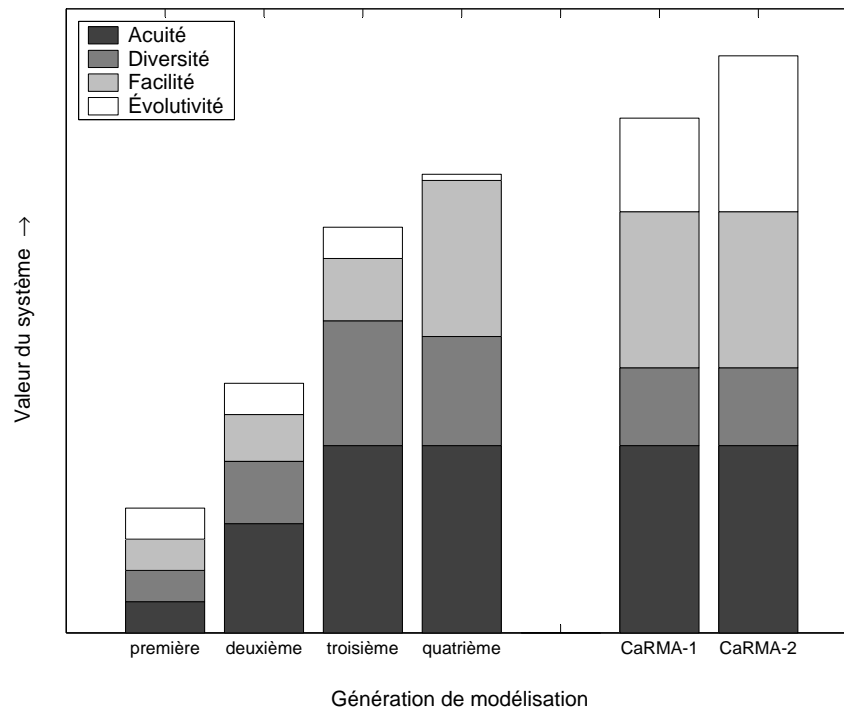


FIG. 7.10 – Évolution de la valeur des systèmes de chacune des générations de modélisation en hydroinformatique – Comparaison avec les prototypes CARMA-1 et CARMA-2.

Nous constatons que si les deux premières transitions ont vu une augmentation de la valeur des systèmes plus ou moins répartie selon les trois critères, la quatrième génération a vu le contenu scientifique rester le même qu'à la génération précédente, la facilité d'exécution augmenter fortement, la diversité des tâches supportées légèrement diminuer<sup>3</sup>, et enfin l'évolutivité du système être réduit quasiment à néant. Cette dernière caractéristique est due à l'utilisation d'interfaces masquant à l'utilisateur le véritable contenu du système et empêchant en pratique toute évolution de celui-ci<sup>4</sup>.

Les deux prototypes développés dans ces travaux contiennent les mêmes bases scientifiques de modélisation hydraulique, mais sont dédiés à une tâche spécifique de la modélisation : le calage de modèles. Les propriétés d'assistance des deux prototypes fournissent bien entendu des facilités accrues pour réaliser la tâche de calage. L'utilisation d'outils d'intelligence artificielle développés spécialement pour la tâche de calage confère de plus au prototype CARMA-2 de fortes propriétés d'évolutivité.

On peut par ailleurs noter que la structure utilisée pour le prototype CARMA-1 permet d'envisager de nouveaux prototypes prenant en charge un nombre de tâches importants, par adjonction de nouvelles fonctionnalités<sup>5</sup>. Cette augmentation de la diversité des tâches s'effectuerait pourtant au détriment de l'évolutivité, en raison de la complexité de la base de connaissances afférente.

3. Sur ce point précis, le lecteur est invité à se référer à la thèse d'Harvey (2002, p. 73).

4. Voir à ce propos la citation d'Abbott (1993) reprise p. 122.

5. Au sens du langage YAKL (voir chapitre 4, p. 130).

Ces deux prototypes fournissent ainsi deux voies à explorer pour définir une nouvelle génération de modélisation en hydroinformatique, beaucoup plus orientée par rapport à une *tâche* précise du processus de modélisation. Les essais réalisés avec le prototype CARMA-1 permettent quant à eux d'envisager des systèmes beaucoup plus modulaires en terme de tâches supportées, mais relativement complexes en terme d'implémentation. La voie ouverte par le prototype CARMA-2 semble quant à elle la plus prometteuse, puisqu'elle conduit à des outils de modélisation à la fois évolutifs et respectueux d'un certain « code de bonnes pratiques ».

### Vers une connaissance des incertitudes

Parmi les nombreuses questions à traiter en hydraulique relevées par Khatibi (2001), les incertitudes tiennent une place importante :

*“Conscientious” practice is needed for standardized practice, treating uncertainties and refined methodologies and modeling tools.*

Dans ces travaux, nous avons uniquement considéré les incertitudes sur le processus de calage, au travers de l'ajustement des paramètres du modèle. Nous avons de plus pris en compte de manière indirecte les incertitudes sur les données de référence en introduisant un niveau de correspondance attendu qualitatif. Il est important de noter que la problématique générale de *validité des données* dans le processus de modélisation, si elle a été abordée par Sargent (1984, 2001), est étrangement absente du référentiel terminologique de Refsgaard *et al.* (2004). Pourtant, nombreuses sont ces incertitudes sur chacun des types de données utilisées lors du processus de calage :

- sur les *données du système* : ces incertitudes sont liées aux imprécisions de mesures sur la topographie, quantifiées notamment par Tekatlian (2001*b*). Ces incertitudes se répercutent bien évidemment indépendamment de l'événement simulé sur les résultats du modèle hydraulique, comme évoqué dans le chapitre 2 (p. 43) ;
- sur les *données événementielles* : ce deuxième type de données présente des incertitudes dont l'appréhension va dépendre de l'utilisation qui en est faite durant le processus de calage :
  - les *données d'entrée* vont voir leur incertitudes se propager de la même façon jusque dans les prédictions du modèle. Ces données d'entrée sont constituées de deux catégories principales :
    - les *données hydrométriques* sont entachées principalement d'erreurs de mesure, quantifiées encore une fois par Tekatlian (2001*b*). Aux mesures classiques, on peut ajouter les erreurs commises sur l'établissement et surtout l'extrapolation des courbes de tarage<sup>6</sup> (voir par exemple Freeman *et al.*, 1996; Petersen-Øverleir, 2004). Le projet *Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance* que nous avons évoqué plusieurs fois lors de ces travaux vise justement à réduire ces incertitudes,
    - les *résultats hydrologiques* sont quant à eux porteurs d'incertitudes liées à leur modélisation, comme nous avons pu le vérifier dans le chapitre 6 (p. 163),

---

6. Une étude est actuellement en cours au CEMAGREF pour tenter de quantifier cette incertitude sur plusieurs stations hydrométriques à l'aide d'une modélisation hydraulique.

- les *données de référence* sont enfin concernées par le même type d'incertitudes que les données hydrométriques d'entrée, mais leur prise en compte lors du processus de calage est nettement plus aisée, puisqu'elles conditionnent le niveau de correspondance attendu. Peut-on en effet raisonnablement demander un écart maximal de 1 cm entre ligne d'eau enveloppe et laisses de crue lorsque la précision de mesure de celles-ci est de 10 cm ?

La propagation des incertitudes sur les données du système et les données d'entrée jusqu'aux résultats de la modélisation hydraulique sont loin d'être négligeables et commencent à faire l'objet d'études approfondies (voir par exemple Burnham et Davis, 1990; Aronica *et al.*, 1998a; Faure *et al.*, 2002; Werner *et al.*, 2004). Hall (2003) a récemment proposé la mise au point d'un langage formel pour représenter l'incertitude dans le domaine de l'hydroinformatique. On suivra ainsi avec attention les recherches récemment engagées sur les incertitudes liées au calage en hydraulique fluviale unidimensionnelle (Pappenberger *et al.*, 2005; Hall *et al.*, 2005).

### De données qualitatives en données quantitatives

Dans ces travaux, et notamment lors des cas d'étude présentés dans les chapitres 6 et 7, nous avons seulement utilisé comme données de référence des données hydrométriques « classiques » : niveaux mesurés, débits enregistrés, etc. Pourtant, comme le rappellent Bates et Anderson (2001, p. 342), ces données ponctuelles ne peuvent à elles seules assurer totalement la crédibilité d'un modèle hydraulique :

*Clearly, discrete bulk flow data, while being an important component of hydraulic model validation, has only limited strength as a stand-alone piece of evidence.*

On constate ainsi depuis quelques années l'émergence de données véritablement *distribuées* dans les processus de calage et de validation des modèles hydrauliques : les photographies. Aériennes ou satellitaires, ces images prises durant un événement et de nature éminemment qualitative, sont transformées en données quantitatives afin de les comparer aux prédictions d'un modèle hydraulique : hauteurs d'eau (Raclot, 2003), largeurs au miroir (Romanowicz et Beven, 2003) ou cartes d'inondation (Bates, 2004).

L'utilisation de telles données devrait pouvoir être automatisée afin de les prendre en compte de manière systématique – lorsqu'elles sont disponibles – lors du processus de calage. En effet, ce type de données, de par sa nature distribuée, est porteur d'une quantité considérable d'informations qui ne peuvent qu'apporter un supplément de crédibilité aux modèles. Le grand challenge des prochaines années consiste à transférer les techniques et algorithmes d'interprétation de ces données – actuellement encore du domaine de la recherche – vers les services opérationnels. L'expérience acquise dans le pilotage d'algorithmes de traitement d'images à l'aide de techniques de systèmes à base de connaissances – et notamment les techniques utilisées dans ces travaux (van den Elst, 1996; Thonnat *et al.*, 1999) – permet d'envisager des solutions dans ce sens, en intégrant ces algorithmes au sein d'un système d'assistance au calage que l'on pourrait peut-être appeler CARMA-3.

### Vers de nouveaux horizons...

Le calage de modèles numériques s'appuie, comme nous l'avons vu au chapitre 3 (section 3.2, p. 68), sur un processus itératif d'ajustement de paramètres basé sur une comparaison avec des *données de référence*. Ces données de références, qu'elles soient

quantitatives ou qualitatives, certaines ou incertaines, sont donc indispensables pour procurer un niveau de crédibilité acceptable au modèle. Malheureusement, elles ne sont pas systématiquement disponibles sur le système étudié. L'hydraulicien doit alors se contenter d'une estimation *a priori* des coefficients de résistance, suivant par exemple la procédure développée dans le chapitre 3 (figure 3.4, p. 69). Il peut alors livrer une valeur moyenne de ceux-ci, comme le montre l'exemple récent de l'estimation à  $0,0545 \text{ s.m}^{-1/3}$  du coefficient  $n$  de Manning pour les vallées martiennes à partir de la seule taille du substrat (Wilson *et al.*, 2004).

Nous avons la chance sur notre planète de pouvoir observer des événements sur les rivières que nous étudions. Nous devons dès lors faire tout notre possible pour recueillir des données sur ces événements, afin de produire des modèles numériques qui soient véritablement en mesure de jouer leur rôle d'outil d'aide à la décision pour l'aménagement du territoire.

# Table des figures

1	Positionnement des travaux de ce mémoire. . . . .	xviii
1.1	Référentiel de modélisation de Schlesinger <i>et al.</i> (1979). . . . .	5
1.2	Éléments d'une terminologie en modélisation. . . . .	8
1.3	Approche systémique de la modélisation. . . . .	9
1.4	Position des processus du référentiel de Refsgaard et Henriksen dans l'évaluation d'une modélisation. . . . .	10
1.5	Rôles en modélisation numérique. . . . .	16
1.6	Processus de modélisation numérique. . . . .	18
1.7	Processus de construction du modèle. . . . .	19
2.1	Comparaison des calculs de la débitance pour différents codes. . . . .	40
2.2	Représentation en 3D des données hydrométriques liées à une crue. . .	46
3.1	Comparaison des mesures du coefficient $n$ avec l'intervalle pour la valeur de base de la formule de Cowan et avec les valeurs données par la formule de Strickler. . . . .	63
3.2	Comparaison des valeurs du coefficient $n$ de Manning mesurées par Barnes (1967) et Hicks et Mason (1998) aux valeurs calculées par 3 méthodes d'estimation <i>a priori</i> . . . . .	65
3.3	Comparaison des intervalles obtenus par les méthodes mises en œuvre dans notre analyse avec l'intervalle à 90% de la distribution empirique déterminée par Burnham et Davis (1986). . . . .	67
3.4	Proposition d'une procédure d'estimation de valeurs du coefficient $n$ de Manning pour un tronçon homogène. . . . .	69
3.5	Méthode heuristique d'ajustement des paramètres. . . . .	70
3.6	Méthode mathématique d'ajustement des paramètres. . . . .	71
4.1	Règle de production. . . . .	83
4.2	Pyramide des niveaux de connaissances. . . . .	83
4.3	Ontologie pour la validation opérationnelle. . . . .	88
4.4	Spécialisation du domaine d'application visé et du niveau de correspondance attendu pour l'hydraulique fluviale. . . . .	92
4.5	Spécialisation des données du système et des paramètres pour le domaine de l'hydraulique fluviale 1D. . . . .	93
4.6	Nature des données et prédictions événementielles en hydraulique fluviale unidimensionnelle. . . . .	94
4.7	Nature des données d'entrée pour le calage de modèles hydrauliques. .	96

4.8	Processus de calage d'un modèle numérique. . . . .	99
4.9	Étape d'affectation des données. . . . .	100
4.10	Étape de définition des paramètres. . . . .	102
4.11	Étape d'initialisation des paramètres . . . . .	104
4.12	Étape de réalisation d'une simulation. . . . .	104
4.13	Étape de comparaison des prédictions. . . . .	106
4.14	Étape d'ajustement des paramètres. . . . .	107
4.15	Étape de qualification du modèle. . . . .	109
4.16	Représentation de la tâche de calage au sein du projet HARMONQUA. . . . .	111
4.17	Représentation de la tâche de calage au sein du projet CLACIC . . . . .	112
4.18	Extrait de notre modélisation des fichiers utilisés par le code MAGE. . . . .	114
4.19	Modélisation simplifiée de l'étape de réalisation d'une simulation, spécialisée pour le code MAGE dans la version 6. . . . .	115
4.20	Modélisation simplifiée de la sous-tâche de comparaison entre référence et prédiction, spécialisée pour le code MAGE. . . . .	116
4.21	Macroscopie MKSM adapté aux codes de calcul, d'après Picard <i>et al.</i> (1999a). . . . .	118
5.1	Mécanisme de résolution de problème pour la tâche de pilotage de programmes. . . . .	126
5.2	Exemple de déclaration d'un argument. . . . .	128
5.3	Arborescence des opérateurs de simulation pour le code MAGE. . . . .	128
5.4	Exemple d'opérateur primitif. . . . .	129
5.5	Exemple d'opérateur composite. . . . .	129
5.6	Exemple de déclaration d'un objectif. . . . .	131
5.7	Principe de l'implémentation technique du prototype de système d'assistance au calage. . . . .	132
5.8	Exemple de traduction d'un diagramme de classes UML en <i>types d'arguments</i> YAKL. . . . .	134
5.9	Exemple de traduction d'un diagramme d'activités UML en <i>opérateurs</i> YAKL. . . . .	134
5.10	Structure de la base de connaissances en pilotage de programmes pour CARMA-1. . . . .	136
5.11	Structure de la base de faits en pilotage de programmes pour CARMA-1. . . . .	136
5.12	Identification visuelle d'un décalage temporel. . . . .	139
5.13	Identification visuelle d'un écart en ordonnées entre les points mesurés et la courbe prédite correspondante. . . . .	140
5.14	Procédure d'utilisation du système sur de nouveaux modèles. . . . .	141
5.15	Déclaration dans le langage OVAL du <i>modèle numérique</i> dans le domaine de l'hydraulique fluviale. . . . .	145
5.16	Déclaration dans le langage OVAL de l' <i>objectif du calage</i> dans le domaine de l'hydraulique fluviale. . . . .	145
5.17	Déclaration dans le langage OVAL d'un <i>type d'événement</i> – une crue – dans le domaine de l'hydraulique fluviale. . . . .	145
5.18	Déclaration dans le langage OVAL d'un <i>opérateur local</i> de résolution d'une sous-tâche spécifique. . . . .	146
5.19	Structure de la base de connaissances en pilotage de programmes pour CARMA-2. . . . .	146

5.20	Structure de la base de faits pour CARMA-2. . . . .	146
6.1	Situation du bief étudié de la Lèze. . . . .	153
6.2	Lèze – Photographies du barrage de Beaumont-sur-Lèze. . . . .	154
6.3	Lèze – Photographies d’un tronçon non influencé à l’aval du pont de la RD 43. . . . .	155
6.4	Lèze – Photographies du tronçon influencé par le barrage du Moulin des Bures, à l’aval du pont de la RD 622. . . . .	156
6.5	Extrait de la base de faits pour le calage de la Lèze – Modèle numérique. . . . .	158
6.6	Extrait de la base de faits pour le calage de la Lèze – Données événementielles. . . . .	159
6.7	Extrait de la base de faits pour le calage de la Lèze – Contexte et requête. . . . .	159
6.8	Représentation de la crue de la Lèze de février 2000. . . . .	164
7.1	Localisation géographique du site étudié. . . . .	173
7.2	Carte du bassin versant de l’Hogneau. . . . .	173
7.3	Hogneau – Photographies des différents tronçons du bief étudié, de l’amont vers l’aval (1/2). . . . .	174
7.4	Hogneau – Photographies des différents tronçons du bief étudié, de l’amont vers l’aval (2/2). . . . .	175
7.5	Extrait de la base de faits pour le calage de l’Hogneau – Faits relatifs au modèle numérique. . . . .	177
7.6	Extrait de la base de faits pour le calage de l’Hogneau – Données événementielles. . . . .	178
7.7	Extrait de la base de faits pour le calage de l’Hogneau – Contexte et requête. . . . .	179
7.8	Représentation de la crue de l’Hogneau de février 2002. . . . .	183
7.9	Résultats des expériences en terme de jeux de paramètres optimaux. . . . .	187
7.10	Évolution de la valeur des systèmes de chacune des générations de modélisation en hydroinformatique. . . . .	193
B.1	Exemple de diagramme de classes UML. . . . .	233
B.2	Exemple de diagramme d’activités UML. . . . .	234
B.3	Exemple de diagramme de cas d’utilisation UML. . . . .	235
E.1	Variation du coefficient n de Manning en fonction du rayon hydraulique. . . . .	265
F.1	Représentation des fichiers utilisés par le code MAGE – diagramme de classes UML. . . . .	268
G.1	Modélisation de l’exécution du programme TALWEG. . . . .	269
G.2	Modélisation de l’exécution du programme MAGE5. . . . .	270
G.3	Modélisation de l’exécution du programme MAGE_EXTRAIRE. . . . .	271
G.4	Modélisation de l’exécution du programme RESVIEW. . . . .	271





# Liste des tableaux

1.1	Glossaire de modélisation. . . . .	8
1.2	Typologie des situations en modélisation. . . . .	10
1.3	Classification des approches pour la validation opérationnelle, d'après Sargent (1984). . . . .	12
1.4	Description des rôles dans le processus de modélisation. . . . .	16
2.1	Logiciels d'hydraulique fluviale unidimensionnelle. . . . .	33
2.2	Valeur des coefficients de la formule générique de la pente de la ligne d'énergie. . . . .	35
2.3	Valeurs moyennes des coefficients de débit relatifs à l'équation 2.8 pour quelques types de déversoirs. . . . .	38
2.4	Valeurs moyennes des coefficients de débit relatifs à l'équation 2.9 pour quelques types d'orifices. . . . .	38
2.5	Comparaison des facteurs à prendre en compte dans l'estimation du coefficient $n$ de Manning suivant la méthode de détermination de la débitance. . . . .	39
2.6	Typologie des données requises et optionnelles pour les différentes phases de la modélisation numérique. . . . .	48
3.1	Correspondance entre les formules explicitant les composantes de la résistance à l'écoulement. . . . .	53
3.2	Récapitulatif des catalogues de sections de référence disponibles. . . . .	57
3.3	Récapitulatif des tables de valeurs du coefficient $n$ de Manning. . . . .	59
3.4	Récapitulatif des équations empiriques et de leur domaine de détermination. . . . .	61
3.5	Récapitulatif des études réalisées selon une méthode automatique à l'aide d'algorithmes classiques. . . . .	74
3.6	Comparaison synthétique des méthodes d'ajustement. . . . .	77
4.1	Utilisation des diagrammes UML pour la représentation des différents types et niveaux de connaissances. . . . .	86
4.2	Exemples de spécialisations des notions génériques pour trois cas concrets de calage de modèles numériques . . . . .	91
4.3	Comparaison de travaux sur des ontologies de domaine. . . . .	97
5.1	Quelques caractéristiques chiffrées de la base de connaissances en pilotage de programmes. . . . .	137
5.2	Fonctionnement opérationnel du prototype. . . . .	138

6.1	Descriptif des stations hydrométriques de la Lèze. . . . .	153
7.1	Descriptif de la station hydrométrique de l'Hogneau à Thivencelle. . .	173
7.2	Résultats des expériences en terme de valeur optimale de l'écart moyen entre niveaux observés et calculés. . . . .	186
A.1	Sigles et abréviations utilisés dans le document. . . . .	231
A.2	Conventions de notations utilisées dans le document. . . . .	232
D.1	Valeurs de base du coefficient $n$ de Manning. . . . .	241
D.2	Table de valeurs pour le coefficient $m$ . . . . .	241
D.3	Table de valeurs pour le coefficient $n_1$ . . . . .	242
D.4	Table de valeurs pour le coefficient $n_2$ . . . . .	242
D.5	Table de valeurs pour le coefficient $n_3$ . . . . .	242
D.6	Table de valeurs pour le coefficient $n_4$ . . . . .	243
D.7	Table de valeurs pour le coefficient $n'_1$ . . . . .	244
D.8	Table de valeurs pour le coefficient $n'_3$ . . . . .	244
D.9	Table de valeurs pour le coefficient $n'_4$ . . . . .	245
D.10	Valeurs du coefficient $n$ de Manning pour des canaux creusés ou dragués.	246
D.11	Valeurs du coefficient $n$ de Manning pour des canaux revêtus ou cons- truits. . . . .	247
D.12	Valeurs du coefficient $n$ de Manning pour des rivières naturelles. . . . .	248
D.13	Valeurs du coefficient $n$ de Manning pour des plaines d'inondation. . .	249
D.14	Valeurs du coefficient $n$ de Manning pour différentes occupations du sol	250
D.15	Valeurs du coefficient $n$ de Manning pour différentes cultures. . . . .	251
E.1	Valeurs du coefficient $H$ de la formule de Humphreys et Abbot (1861). . .	256
E.2	Table de valeurs des coefficients $\alpha$ et $\beta$ de la première formule de Bazin (1865). . . . .	257
E.3	Table des valeurs du coefficient $\gamma$ de la formule de Bazin (1897). . . . .	258
E.4	Table de valeurs des coefficients $\alpha$ et $\beta$ des formules de Gauckler (1868).	259
E.5	Table de valeurs du coefficient $n$ de Kutter. . . . .	260
E.6	Valeurs des coefficients de la formule généralisée de Colebrook et White.	264
E.7	Valeurs du coefficient $\epsilon$ de la formule de Powell (1950). . . . .	264

# Bibliographie

- ABBOTT, M. B. (1989), Review of recent developments in coastal engineering. Dans : *Hydraulic and Environmental Modelling of Coastal, Estuarine and River Waters* (R. A. Falconer, P. Goodwin et R. G. S. Matthew, éds.), p. 3–19, Avebury Technical, Alerschot, U.K. 192
- ABBOTT, M. B. (1991), *Hydroinformatics – Information Technology and the Aquatic Environment*. Avebury Technical, Alderschot, U.K. xix, 6, 17, 192
- ABBOTT, M. B. (1993), The electronic encapsulation of knowledge in hydraulics, hydrology and water resources. *Advances in Water Resources*, vol. 16, n° 1, p. 21–39. 83, 122, 193
- ABBOTT, M. B. (1994), Hydroinformatics: a copernican revolution in hydraulics. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 32, extra issue, p. 3–14. xix, 192
- ABBOTT, M. B. (2002), On definitions. *Journal of Hydroinformatics*, vol. 4, n° 2, p. i–xxvii. 4
- ABBOTT, M. B., BATHURST, J. C., CUNGE, J. A., O'CONNELL, P. E. et RASMUSSEN, J. (1986a), An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, vol. 87, n° 1-2, p. 45–59. 13
- ABBOTT, M. B., BATHURST, J. C., CUNGE, J. A., O'CONNELL, P. E. et RASMUSSEN, J. (1986b), An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, "SHE", 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, vol. 87, n° 1-2, p. 61–77. 13
- ABBOTT, M. B., LINDBERG, S. et HAVNØ, K. (1991), The fourth generation of numerical modeling in hydraulics. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 29, n° 5, p. 581–600. xix, 192
- ABIDA, H. et TOWNSEND, R. D. (1992), Parameter optimization in modeling unsteady compound channel flows. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 19, n° 3, p. 441–446. 73, 75
- ACKERS, P. (1958), *Resistance of Fluids Flowing in Channels and Pipes*. Department of scientific and industrial research, Hydraulics Research Paper n°1, Her Majesty Stationery Office, London, U.K. 263
- ALDRIDGE, B. N. et GARRETT, J. M. (1973), Roughness coefficients for stream channels in Arizona. *Open-File Report 73-3*, US Geological Survey, Tucson, Arizona. 56, 57, 58, 66, 69
- AMDISEN, L. K. (1994), An architecture for hydroinformatic systems based on rational reasoning. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 32, extra issue, p. 183–194. 82, 83, 84, 89
- ANASTASIADOU-PARTHENIOU, L. et SAMUELS, P. G. (1998), Automatic calibration of computational river models. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, vol. 130, n° 3, p. 154–162. 72, 74
- ANDERSON, J. L. (2002), Manning's formula by any other name. Dans : *Environmental and Water Resources History 2002* (J. R. Rogers et A. J. Fredrich, éds.), vol. 126, p. 5, ASCE, Washington, D.C. 261
- ANDERSON, M. P. et WOESSNER, W. W. (1992a), *Applied Groundwater Modeling – Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, San Diego, California. 12
- ANDERSON, M. P. et WOESSNER, W. W. (1992b), The role of the postaudit in model validation. *Advances in Water Resources*, vol. 15, n° 3, p. 167–173. 13, 87

- AQUALIS (1998), Étude hydraulique du canal de Condé Pommeroeul. *Rap. tech.*, Voies Navigables de France. 172
- ARCEMENT, G. J. Jr. et SCHNEIDER, V. R. (1984), Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. *Final Report FHWA-TS-84-204*, Federal Highway Administration, McLean, Virginia. 53, 56, 57, 66, 68, 69
- ARCEMENT, G. J. Jr. et SCHNEIDER, V. R. (1989), Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains. *Water Supply Paper 2339*, US Geological Survey, Washington, D.C. 53, 54
- ARONICA, G., BATES, P. D. et HORRITT, M. S. (2002), Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE. *Hydrological Processes*, vol. 16, n° 10, p. 2001–2016. 77
- ARONICA, G., HANKIN, B. C. et BEVEN, K. J. (1998a), Topographic sensitivity and parameter uncertainty in the predictions of a 2D inundation model. Dans : *Hydroinformatics'98 – Proceedings of the third International Conference on Hydroinformatics* (V. M. Babović et L. C. Larsen, éd.), vol. 2, p. 1083–1088, A. A. Balkema, Copenhagen, Denmark. 195
- ARONICA, G., HANKIN, B. C. et BEVEN, K. J. (1998b), Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data. *Advances in Water Resources*, vol. 22, n° 4, p. 349–365. 76, 77
- ASCE, Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, Irrigation and Drainage Division. (1993), Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 119, n° 3, p. 429–442. 20
- ATANOV, G. A., EVSEEVA, E. G. et MESELHE, E. A. (1999), Estimation of roughness profile in trapezoidal open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 125, n° 3, p. 309–312. 73
- AZEVEDO, L. G., FONTANE, D. G. et PORTO, R. L. L. (1993), Expert-system for the calibration of SMAP. *Water International*, vol. 18, n° 2, p. 13–109. xx
- BAFFAUT, C. et DELLEUR, J. W. (1989), Expert system for calibrating SWMM. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 115, n° 3, p. 278–298. xx
- BAFFAUT, C. et DELLEUR, J. W. (1990), Calibration of SWMM runoff quality model with expert system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 116, n° 2, p. 247–261. xx
- BALCI, O. et SARGENT, R. G. (1984), A bibliography on the credibility assessment and validation of simulation and mathematical models. *Simuletter*, vol. 15, n° 3, p. 15–27. 4
- BARNES, H. H. Jr. (1967), Roughness characteristics of natural channels. *Water Supply Report 1849*, US Geological Survey. 55, 56, 57, 60, 61, 62, 65, 66, 69, 197, 237
- BARRÉ DE SAINT-VENANT, A. J. C. (1843), Mémoire sur un mode d'interpolation applicable à des questions relatives au mouvement des eaux, et suppléant à l'intégration souvent impossible des équations aux dérivées partielles. *Comptes-Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, vol. 17, p. 1108–1115. 256
- BARRÉ DE SAINT-VENANT, A. J. C. (1851), Mémoire sur des formules nouvelles pour la solution des problèmes relatifs aux eaux courantes. *Annales des Mines*, vol. 20 (4e série), p. 183–357. 256
- BARRÉ DE SAINT-VENANT, A. J. C. (1871a), Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leurs lits. *Comptes-rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 73, p. 147–154. 23, 28
- BARRÉ DE SAINT-VENANT, A. J. C. (1871b), Théorie du mouvement non permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leurs lits [2<sup>e</sup> note]. *Comptes-rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, vol. 73, p. 237–250. 28
- BARTHELMÉ, F., ERMINE, J.-L. et ROSENTHAL-SABROUX, C. (1998), An architecture for knowledge evolution in organisations. *European Journal of Operational Research*, vol. 109, n° 2, p. 414–427. 117
- BATES, P. D. (2004), Remote sensing and flood inundation modelling. *Hydrological Processes*, vol. 18, n° 13, p. 2593–2597. 45, 47, 195

- BATES, P. D. et ANDERSON, M. G. (2001), Validation of hydraulic models. Dans : *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science* (M. G. Anderson et P. D. Bates, éd.), chap. 13, p. 325–356, Wiley, Chichester, U.K. 45, 195
- BATES, P. D. et DE ROO, A. P. J. (2000), A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, vol. 236, n° 1-2, p. 54–77. 42
- BATES, P. D., HORRITT, M. S., ARONICA, G. et BEVEN, K. J. (2004), Bayesian updating of flood inundation likelihoods conditioned on flood extent data. *Hydrological Processes*, vol. 18, n° 17, p. 3347–3370. 77
- BATES, P. D., MARKS, K. J. et HORRITT, M. S. (2003), Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models. *Hydrological Processes*, vol. 17, n° 3, p. 537–557. 42
- BATES, P. D., STEWART, M. D., SIGGERS, G. B., SMITH, C. N., HERVOUET, J.-M. et SELLIN, R. H. J. (1998), Internal and external validation of a two-dimensional finite element code for river flood simulations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, vol. 130, n° 3, p. 127–141. 45
- BATHURST, J. C. (2002), At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. *Journal of Hydrology*, vol. 269, n° 1-2, p. 11–26. 60, 61
- BAZIN, H. É. (1862), Expériences sur les lois de l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts – Extrait. *Comptes-Rendus hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences*, vol. 55, p. 274–277. 257
- BAZIN, H. É. (1865), Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts. Dans : *Mémoires présentés par différents savants à l'Académie des Sciences de l'Institut Impérial de France*, vol. 19 de *Sciences mathématiques et physiques*, p. 1–494, Académie des Sciences, Paris, France. 202, 257, 260, 262
- BAZIN, H. É. (1897), Étude d'une nouvelle formule pour calculer le débit des canaux découverts – Mémoire n° 41. *Annales des Ponts et Chaussées*, vol. 14, n° 7, p. 20–70. 202, 257, 258
- BAZIN, H. É. (1898), *Étude d'une nouvelle formule pour calculer le débit des canaux découverts – Extrait des Annales des Ponts et Chaussées, 4e trimestre 1897*. Vicq-Dunod, P., Paris, France. 257
- BECK, M. B. (1991), Principles of modeling. *Water Science and Technology*, vol. 24, n° 6, p. 1–8. 22
- BECKER, L. et YEH, W. W.-G. (1972), Identification of parameters in unsteady open channel flows. *Water Resources Research*, vol. 8, n° 4, p. 956–965. 73, 74
- BECKER, L. et YEH, W. W.-G. (1973), Identification of multiple reach channel parameters. *Water Resources Research*, vol. 9, n° 2, p. 326–335. 73, 74
- BÉLANGER, J.-B.-C.-J. (1828), *Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes*. Carilian-Goeury, Paris, France. 28
- BELLEUDY, P., CUNGE, J. A. et RAHUEL, J. L. (1986), Mathematical modeling software for river management – CARIMA and CONDOR systems. *Advances in engineering Software*, vol. 8, n° 1, p. 46–51. 152
- BEN SLAMA, E. et LEBOSSE, A. (1991), Estimation du coefficient de Strickler dans les équations de Saint-Venant monodimensionnelles. *Rap. tech. 93NJ00020*, Électricité de France – Direction des Études et Recherches – Service Applications de l'Électricité et Environnement – Département Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou, France. 74
- BENNETT, J. P. (1975), General model to simulate flow in branched estuaries. Dans : *Symposium on Modeling Techniques*, vol. 1, p. 643–662, ASCE, Reston, Virginia. 72, 74
- BENSON, M. A. et DALRYMPLE, T. (1967), General field and office procedures for indirect discharge measurements. Dans : *Book 3: Application of Hydraulics – Section A: Surface-Water Techniques* (D. L. Peck, éd.), US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, chap. A1, US Government Printing Office, Washington. 238
- BÉON, V., BRELLE, P., CAZEUX, O., DELICHÈRE, S., DERRIEN, S., DURANT, R., FUHR, N. et GRASSAY, C. (2004), Test d'un logiciel d'assistance au calage. *Rapport final TPLD*, ENSEEIHT/IMFT. 152, 154

- BERMUDEZ, L. et PIASECKI, M. (2003), Hydrologic ontology for the web. Dans : *EOS Transactions of AGU Fall Meeting Supplement*, vol. 84 (46), AGU, San Francisco, California. 96
- BERMUDEZ, L. et PIASECKI, M. (2004a), Achieving semantic interoperability with hydrologic ontologies for the web. Dans : *Proceedings of the AWRA 2004 Spring Speciality Conference – Geographic Information Systems and Water Resources III*, Nashville, Tennessee. 96
- BERMUDEZ, L. et PIASECKI, M. (2004b), Role of ontologies in creating hydrologic metadata. Dans : *International Conference on Hydrosience and Engineering*, Brisbane, Australia. 96
- BEVEN, K. J. (1993), Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling. *Advances in Water Resources*, vol. 16, n° 1, p. 41–51. 76
- BEVEN, K. J. et BINLEY, A. M. (1992), The future of distributed models – Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, vol. 6, n° 3, p. 279–298. 77
- BIRTA, L. G. et NUR ÖZMIZRAK, F. (1996), A knowledge-based approach for the validation of simulation models: the foundation. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, vol. 6, n° 1, p. 76–98. 123
- BLIND, M. W., UBBELS, A., WENTHOLT, L. R., VAN STIJN, T. L., BAKEMA, A. H., BULENS, J. D., NOORT, J. J., VAN ADRICHEM, B., STOUT, J. et VAN GEER, F. (2000), Toward a well-oiled model infrastructure for water management: the generic water framework program. Dans : *Hydroinformatics 2000 – Proceedings of the 4th International Conference on Hydroinformatics*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Cedar Rapids, Iowa. 14
- BORDA, J.-C. (Chevalier de). (1766), Expériences sur la résistance des fluides. Dans : *Histoire de l'Académie Royale des Sciences – Année 1763 – avec les Mémoires de Mathématique & de Physique pour la même Année*, p. 358–376, Imprimerie Royale, Paris, France. 32
- BORDA, J.-C. (Chevalier de). (1770), Expériences sur la résistance des fluides. Dans : *Histoire de l'Académie Royale des Sciences – Année 1767 – avec les Mémoires de Mathématique & de Physique pour la même Année*, p. 495–503, Imprimerie Royale, Paris, France. 32
- BOSSUT, C. (Abbé). (1786), *Traité théorique et expérimental d'hydrodynamique*, vol. 1. Imprimerie Royale, Paris, France. 253
- BOULEAU, N. (1999), *Philosophies des mathématiques et de la modélisation – Du chercheur à l'ingénieur*. L'Harmattan, Paris, France. 5, 23, 24
- BOULEAU, N. (2002), La modélisation et les sciences de l'ingénieur. Dans : *Enquête sur le concept de modèle* (P. Nouvel, éd.), Science, histoire et société, p. 101–119, Presses Universitaires de France, Paris, France. 23
- BOUSMAR, D. (2002), *Flow Modelling in Compound Channels – Momentum Transfert between Main Channel and Prismatic or Non-Prismatic Floodplains*. PhD thesis, Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées, Louvain, Belgique. 31
- BOUSMAR, D., RIVIÈRE, N., PROUST, S., PAQUIER, A., MOREL, R. et ZECH, Y. (2005), Upstream discharge distribution in compound channel flumes. *Journal of Hydraulic Engineering*, accepté pour publication. 31
- BOUSMAR, D. et ZECH, Y. (1999), Momentum transfer for practical flow computation in compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 125, n° 7, p. 696–706. 31
- BOUSSINESQ, J. (1877a), Additions et éclaircissements au mémoire intitulé : Essai sur la théorie des eaux courantes. Dans : *Mémoires présentés par différents savants à l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, vol. 24 de *Sciences mathématiques et physiques*, p. 1–64, Académie Royale des Sciences, Paris, France. 29
- BOUSSINESQ, J. (1877b), Essai sur la théorie des eaux courantes. Dans : *Mémoires présentés par différents savants à l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, vol. 23 de *Sciences mathématiques et physiques*, p. 1–660, Académie Royale des Sciences, Paris, France. 29
- BRAY, D. I. (1979), Estimating average velocity in gravel-bed rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 105, n° 5, p. 1103–1122. 60, 61, 62
- BRAY, D. I. (1982), Flow resistance in gravel-bed rivers. Dans : *Gravel-Bed Rivers – Fluvial Processes, Engineering and Management* (R. D. Hey, J. C. Bathurst et C. R. Thorne, eds.), chap. 6, p. 109–137, Wiley, Chichester, U.K. 59

- BRESSE, J.-A.-C. (1868), *Cours de mécanique appliquée, professé à l'École impériale des Ponts et Chaussées*, vol. 2, Hydraulique. Gauthier-Villars, Paris, France, 2<sup>e</sup> éd. 30
- BRUAUX, S. (2001a), Modélisation des connaissances appliquée au calage de codes de simulation. *Rapport Interne 2001-12*, LaRIA, Amiens, France. 85
- BRUAUX, S. (2001b), *Modélisation des connaissances appliquée au calage d'un code de simulation des trajectoires de navires*. Mémoire de DEA d'informatique, Université de Picardie – Jules Verne, Amiens, France. 85
- BRUAUX, S. (2002), Modélisation des connaissances appliquée au calage des codes de simulation. Dans : *Présentation des posters et des démonstrations, complément aux actes de la conférence Ingénierie des Connaissances – IC'2002*, p. 30–31, Rouen, France. 85
- BRUAUX, S. et KASSEL, G. (2004), ONTOKADS: a core ontology to develop expertise models of the COMMONKADS methodology. Dans : *Proceedings of the EKAW 2004 Workshop on Core Ontologies in Ontology Engineering* (A. Gangemi et S. Borgo, édés.), p. 64–75, Northamptonshire, U.K. 86
- BRUAUX, S., KASSEL, G. et MOREL, G. (2003), Étude critique de la méthode COMMONKADS – Application au calage de codes de calcul. Dans : *Actes de la conférence Ingénierie des Connaissances IC'2003*, ESIEA Recherche, Laval, France. 86, 98, 110, 112
- BRUNELLI, S. (1993), *Un système multi-agents pour le pilotage de codes numériques dans le domaine de l'hydrosédimentologie*. Mémoire de DEA, Université Technologique de Compiègne, Compiègne, France. 124
- BRUNELLI, S., TANGUY, J.-M. et SAYETTAT, C. (1994), SEMAPHOR: A system for long-term morphodynamic simulations. Dans : *Hydroinformatics'94 – Proceedings of the First International Conference on Hydroinformatics* (A. Verwey, A. W. Minns, V. Babović et Č. Maksimović, édés.), vol. 1, p. 217–223, IHE-Delft, Balkema, Delft, The Netherlands. 124
- BRUNNER, G. W. (2001a), HEC-RAS, River Analysis System – Hydraulic reference manual. *Computer Program Documentation CPD-69*, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, California. 33
- BRUNNER, G. W. (2001b), HEC-RAS, River Analysis System – User's manual. *Computer Program Documentation CPD-68*, US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, California. 33
- BRUTSAERT, W. (1971), De Saint-Venant equations experimentally verified. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 97, n° 9, p. 1387–1401. 23
- BURNHAM, M. W. et DAVIS, D. W. (1986), Accuracy of computed water surface profiles. *Research report RD-26*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California. 43, 66, 67, 197
- BURNHAM, M. W. et DAVIS, D. W. (1990), Effects of data errors on computed steady-flow profiles. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 116, n° 7, p. 914–929. 43, 195
- CARLIER, M. (1972), *Hydraulique générale et appliquée*, vol. 14 de *Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France*. Eyrolles, Paris, France. 12, 52, 53, 58, 257, 258, 264
- CARTER, R. W., EINSTEIN, H. A., HINDS, J., POWELL, R. W. et SILBERMANN, E. (1963), Friction factors in open channels – Progress report of the task force on friction factors in open channels of the committee on hydromechanics of the hydraulics division. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 89, n° 1, p. 97–143. 36, 263, 264
- CASTAINGS, W., DARTUS, D., HONNORAT, M., LOUKILI, Y., LE DIMET, F.-X. et MONNIER, J. (2005), Automatic differentiation: a tool for variational data assimilation and adjoint sensitivity analysis for flood modeling. Dans : *Automatic Differentiation: Applications, Theory, and Tools* (H. M. Bücker, G. Corliss, P. Hovland, U. Naumann et B. Norris, édés.), Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Springer, Chicago, Illinois. 78
- CAUCHY, A.-L. (1827), Théorie de la propagation des ondes à la surface d'un fluide pesant d'une profondeur indéfinie. Dans : *Mémoires présentés par différents savans à l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, vol. 1 de *Sciences mathématiques et physiques*, p. 3–310, Académie Royale des Sciences, Paris, France. 28



- CEMAGREF (1983), Programme FLUVIA – Calcul de ligne d'eau en écoulement fluvial – Théorie ligne d'eau. *Rap. tech. 1.0*, Cemagref, Antony, France. 33
- CEMAGREF (1984), Programme TALWEG – Traitement de la géométrie – Modélisation. *Rap. tech. 1.0*, Cemagref, Antony, France. 33, 269
- CESARE, M. A. (1991), First-order analysis of open-channel flow. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 117, n° 2, p. 242–247. 66
- CHARLET, J., ZACKLAD, M., KASSEL, G. et BOURIGAULT, D. (2000a), Ingénierie des connaissances : recherches et perspectives. Dans : *Ingénierie des connaissances : Évolutions récentes et nouveaux défis* (J. Charlet, M. Zacklad, G. Kassel et D. Bourigault, eds.), Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, p. 1–22, Eyrolles, Paris, France. 81
- CHARLET, J., ZACKLAD, M., KASSEL, G. et BOURIGAULT, D. (2000b), *Ingénierie des connaissances : Évolutions récentes et nouveaux défis*. Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Eyrolles, Paris, France. 81
- CHATELAIN, C., BUY, S., PERNIN, M. et LASAYGUES, F. (2004), Un an après les inondations du Sud-Est – Rhône, le fleuve rendu fou. *GEO*, n° 309, p. 129–153. xvii
- CHAU, K. W. (2002), Calibration of flow and water quality modeling using genetic algorithm. Dans : *AI 2002: Advances in Artificial Intelligence - Proceedings of the 15th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence* (B. McKay et J. Slaney, eds.), vol. 2557 de *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, p. 720, Springer, Camberra, Australia. 75
- CHAU, K. W. (2004), Selection and calibration of numerical modeling in flow and water quality. *Environmental Modelling and Assessment*, vol. 9, n° 3, p. 169–178. 192
- CHAU, K. W. et CHEN, W. (2001), A fifth generation numerical modelling system in coastal zone. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 25, n° 10, p. 887–900. 192
- CHAU, K. W., CHENG, C., LI, Y. S., LI, C. W. et WAI, O. (2002a), An intelligent knowledge processing system on hydrodynamics and water quality modeling. Dans : *Developments in Applied Artificial Intelligence – Proceedings of the 15th International Conference on Industrial and Engineering. Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems, IEA/AIE 2002* (T. Hendtlass et M. Ali, eds.), vol. 2358 de *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, p. 670–679, Springer, Cairns, Australia. xix
- CHAU, K. W., CHUNTIAN, C. et LI, C. W. (2002b), Knowledge management system on flow and water quality modeling. *Expert Systems with Applications*, vol. 22, n° 4, p. 321–330. 82
- CHAU, K. W. et WEN-WU, Y. (1992), A knowledge-based expert system for unsteady open channel flow. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 5, n° 5, p. 425–430. xix
- CHAU, K. W. et WEN-WU, Y. (1993), Development of an integrated expert system for fluvial hydrodynamics. *Advances in Engineering Software*, vol. 17, n° 3, p. 165–172. xix
- CHAU, K. W. et YANG, W.-W. (1994), Structuring and evaluation of VP-expert based knowledge bases. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 7, n° 4, p. 447–454. xix
- CHAU, K. W. et ZHANG, X. N. (1995), An expert system for flow routing in a river network. *Advances in Engineering Software*, vol. 22, n° 3, p. 139–146. xix
- CHIU, C.-L. et ISU, E. O. (1978), Kalman filter in open channel flow estimation. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 104, n° 8, p. 1137–1152. 75
- CHOW, V. T. (1973), *Open Channel Hydraulics*. Civil Engineering Series, McGraw-Hill, London, U.K., international éd. 52, 57, 58, 59, 62, 64, 65, 66, 69, 161, 166, 179, 257, 262, 263, 264, 265
- CHRISTENSEN, B. A. (1993), Discussion about "Dimensionally homogeneous Manning's formula". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 119, n° 12, p. 1442–1443. 35
- CLÉMENT, V. et THONNAT, M. (1993), A knowledge-based approach to integration of image-processing procedures. *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 57, n° 2, p. 166–184. 126
- COLEBROOK, C. F. et WHITE, C. M. (1937), Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A—Mathematical and Physical sciences*, vol. 161, p. 367–381. 202, 264

- COON, W. F. (1995), Estimates of roughness coefficients for selected natural stream channels with vegetated banks in New York. *Open-File Report 93-161*, US Geological Survey, Ithaca, New York. 56, 57, 58, 59, 64, 66
- COON, W. F. (1998), Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks. *Water Supply Paper 2441*, US Geological Survey. 56, 58, 69
- CORNET, J.-M., DESCATOIRE, I. et TEKATLIAN, A. (2002), Bathymétrie et topographie. Dans : *Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques*, chap. 6, Version 2.0, CETMEF, Compiègne, France. 42
- COWAN, W. L. (1956), Estimating hydraulic roughness coefficients. *Agricultural Engineering*, vol. 37, n° 7, p. 473–475. 52, 53, 54, 62, 64, 65, 66, 68, 69, 103, 166, 179, 241
- CRANFIELD, S. et PURVIS, M. (1999), UML as an ontology modelling language. Dans : *Proceedings of the Workshop on Intelligent Information Integration, 16th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'99)*, Stockholm, Sweden. 84, 132
- CRISSMAN, R. D., CHIU, C.-L., YU, W., MIZUMURA, K. et CORBU, I. (1993), Uncertainties in flow modeling and forecasting for Niagara River. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 119, n° 11, p. 1231–1250. 75
- CRUBÉZY, M., AUBRY, F., MOISAN, S., CHAMEROY, V., THONNAT, M. et DI PAOLA, R. (1997), Managing complex processing of medical image sequences by program supervision techniques. Dans : *PACS Design and Evaluation: Engineering and Clinical Issues – Medical Imaging 1997* (S. C. Horii et G. J. Blaine, éd.), vol. 3035 de *Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE)*, p. 614–625, Newport Beach, California. 127
- CRUBÉZY, M., MARCOS, M. et MOISAN, S. (1998), Experiments in building program supervision engines from reusable components. Dans : *ECAI 98 – Proceedings of the 13th European Conference on Artificial Intelligence, Workshop on Applications of Ontologies and Problem-Solving Methods* (H. Prade, éd.), Wiley, Brighton, U.K. 127
- CRUBÉZY, M., MOISAN, S., AUBRY, F., VAN DEN ELST, J. et CHAMEROY, V. (1995), Program supervision in medical imagery. Dans : *Proceedings of the 8th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence* (X. Yao, éd.), p. 32–40, Canberra, Australia. 127
- CULP, M. M., COWAN, W. L. et REESE, C. A. (1956), Hydraulics. *Rap. tech. 210-VI-NEH-5*, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service. 53, 55, 58
- CUNGE, J. A. (1969), On the subject of the flood propagation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*, vol. 7, n° 2. 27
- CUNGE, J. A. (1975), Applied mathematical modeling of open channel flow. Dans : *Unsteady Flow in Open Channels* (K. Mahmood et V. Yevjevich, éd.), vol. 1, chap. 17, p. 379–405, Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado. 10, 41
- CUNGE, J. A. (2003), Of data and models. *Journal of Hydroinformatics*, vol. 5, n° 2, p. 75–98. 7, 20, 21, 22, 23, 48, 73
- CUNGE, J. A., HOLLY, F. M. J. et VERWEY, A. (1980), *Practical Aspects of Computational River Hydraulics*, vol. 3 de *Monographs and surveys in water resources engineering*. Pitman, London, U.K. 98
- DALRYMPLE, T. et BENSON, M. A. (1967), Measurement of peak discharge by the slope-area method. Dans : *Book 3: Application of Hydraulics – Section A: Surface-Water Techniques* (D. L. Peck, éd.), US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, chap. A2, US Government Printing Office, Washington. 237
- DARCY, H.-P.-G. (1858), Recherches expérimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux. Dans : *Mémoires présentés par différents savants à l'Académie des Sciences de l'Institut Impérial de France*, vol. 15 de *Sciences mathématiques et physiques*, p. 141–403, Imprimerie impériale. 257
- DARCY, H.-P.-G. et BAZIN, H. É. (1865), *Recherches hydrauliques – Première partie – Recherches expérimentales sur l'écoulement de l'eau dans les canaux découverts – Atlas*. Dunod, Paris, France. 257
- DAS, A. (2004a), Parameter estimation for flow in open-channel networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 130, n° 2, p. 160–165. 71

- DAS, A. (2004b), Parameter estimation for muskingum models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 130, n° 2, p. 140–147. 71
- DAVIDSON, B. Z., VICHNEVETSKY, R. et WANG, H. T. (1978), Numerical techniques for estimating best distributed Manning's roughness coefficients for open estuarial river systems. *Water Resources Research*, vol. 14, n° 5, p. 777–789. 73, 74
- DAVIS, D. W. et BARKIN, R. (1989), Preliminary Analysis System for water surface profile computations (PAS) – User's manual. *Report FHWA-IP-89-013*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California. 43
- DE MARSILY, G. (1997), De la validation des modèles en sciences de l'environnement. Dans : *Tendances nouvelles en modélisation de l'environnement – Journées du Programme Environnement, Vie et Société du CNRS*, p. 375–382, Elsevier. 11
- DE PRONY, G.-C.-F. R. (1804), *Recherches physico-mathématiques sur la théorie des eaux courantes*. Imprimerie Impériale, Paris, France. 254, 257
- DEE, D. P., CUNGE, J. A., LABADIE, G., MATEO, A. R., MATHIESEN, M., PRICE, R. K., SANTOS, M. et WARREN, R. (1994), Guidelines for documenting the validity of computational modelling software. *Rap. tech.*, International Association for Hydraulic Research. 21
- DEFRA/ENVIRONMENT AGENCY (2003), Reducing uncertainty in river flood conveyance – Review of methods for estimating conveyance. *Interim Report 2 W5A – 057*, DEFRA/Environment Agency. 29
- DEFRA/ENVIRONMENT AGENCY (2004a), Reducing uncertainty in river flood conveyance – Conveyance Manual. *R&D Technical Report W5A-057/PR/1*, HR Wallingford, Bristol, U.K. 36, 54, 64
- DEFRA/ENVIRONMENT AGENCY (2004b), Reducing uncertainty in river flood conveyance, phase 2. *Interim Report 3 – Further details of development and testing of Conveyance Estimation System (CES) W5A-057/TR*, HR Wallingford. 54
- DELLEUR, J. W. (1991), Expert systems in hydrology. Dans : *Computer Methods in Water Resources II – Proceedings of the second International Conference* (C. A. Brebbia, D. Ouazar et D. B. Sari, éd.), vol. 3: Computer Aided Engineering in Water Resources, p. 119–133, Computational Mechanics Publications & Springer-Verlag, Marrakesh, Morocco. xix
- DESLANDRES, V. et PIERREVAL, H. (1991), An expert system prototype assisting the statistical validation of simulation models. *Simulation*, vol. 56, n° 2, p. 79–89. 123
- DHERVILLEZ, L. (2001), *Incertitude sur l'extension d'une zone inondable*. Mémoire de DESS modélisation et simulation en mécanique, Université Joseph Fourier, Lyon, France. 43
- DHI (2003a), MIKE 11 – A modelling system for rivers and channels – Reference manual. *Rap. tech.* 33, 39
- DHI (2003b), MIKE 11 – A modelling system for rivers and channels – User guide. *Rap. tech.* 33
- DHONDIA, J. F. (2004), Good modelling practice using SOBEK – An integrated hydraulics modelling package. Dans : *Proceedings of the Sixth International Conference on Hydroinformatics* (S. Y. Liong, K.-K. Phoon et V. M. Babović, éd.), vol. 1, p. 529–536, World Scientific Publishing Company, Singapore. 14
- DIETRICH, C. R. (2001), On simulation, calibration and ill-conditioning with application to environmental system modelling. Dans : *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science* (M. G. Anderson et P. D. Bates, éd.), chap. 6, p. 77–115, Wiley, Chichester, U.K. 157
- DING, Y., JIA, Y. et WANG, S. S. Y. (2004), Identification of Manning's roughness coefficients in shallow water flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 130, n° 6, p. 501–510. 74
- DINGMAN, S. L. et SHARMA, K. P. (1997), Statistical development and validation of discharge equations for natural channels. *Journal of Hydrology*, vol. 199, n° 1-2, p. 13–35. 60, 61
- DIREN (2000), Crue du 11 juin 2000 – recueil photographique, étude géographie et hydrologique – confluence ariège-lèze. *Rap. tech.*, DIREN Midi-Pyrénées. 157
- DIREN (2002), Hogneau – Photographies aériennes du 13 février 2002. Web <http://www.nord-pas-de-calais.ecologie.gouv.fr/> 172

- DIREN (2002), Rapport sur les crues de l'hiver 2002. *Rap. tech.*, DIREN Nord-Pas de calais, Service de l'Eau et des Milieux Aquatiques. 172
- DIREN (2003), Recueil hydrologique – Somme et cours d'eau du Nord-Pas de Calais. *Rap. tech.*, DIREN Nord – Pas de calais, Service de l'Eau et des Milieux Aquatiques. 172
- DISKIN, M. H. et SIMON, E. (1977), A procedure for the selection of objective functions for hydrologic simulation models. *Journal of Hydrology*, vol. 34, n° 1-2, p. 129–149. 72
- DOOGE, J. C. I. (1991), The Manning formula in context. Dans : *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula* (B. C. Yen, éd.), p. 136–185, Water Resources Publications, Littleton, Colorado. 261
- DOUKIDIS, G. I. et ANGELIDES, M. C. (1994), A framework for integrating artificial intelligence and simulation. *Artificial Intelligence Review*, vol. 8, n° 1, p. 55–85. 122
- DU BUAT, P.-L.-G. (Chevalier). (1786), *Principes d'hydraulique vérifiés par un grand nombre d'Expériences faites par ordre du Gouvernement*, vol. 1. Imprimerie de Monsieur, Paris, France, 2<sup>e</sup> éd. 254
- DUPOIT, J.-E.-J. (1863), *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables avec des considérations relatives au régime des grandes eaux, au débouché à leur donner, et à la marche des alluvions dans les rivières à fond mobile*. Dunod, Paris, France, 2<sup>e</sup> éd. 28, 255, 262
- DUVAL, S. (2000), *Conception et réalisation d'un programme d'apprentissage pour le pilotage de codes*. Rapport de stage de fin d'études, IRESTE, Nantes, France. 167
- EINSTEIN, A. (1916), Grundlagen der allgemeinen relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, vol. 49, p. 769–882. 24
- EL KADI ABDERREZZAK, K. et PAQUIER, A. (2004), Simulation and prediction of river morphologic changes using RUBARBE. Dans : *River Flow 2004 – Proceedings of the Second International Conference on Fluvial Hydraulics* (M. Greco, A. Carravetta et R. D. Morte, édés.), vol. 1, p. 89–98, Balkema, Napoli, Italy. 124
- ENGMAN, E. T. (1986), Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 112, n° 1, p. 39–53. 58, 59
- ENGMAN, E. T. (1988), Diagnostic strategies of an expert system for simulating snowmelt runoff. Dans : *Planning Now for Irrigation and Drainage in the 21st Century – Proceedings* (D. R. Hay, éd.), p. 242–249, Irrigation and Drainage Engineering Division of the ASCE, ASCE, Lincoln, Nebraska. xx
- ERMINE, J.-L. (1996), *Les systèmes de connaissances*. Hermès, Paris, France. 117
- ERMINE, J.-L. (2003), *La gestion des connaissances*. Lavoisier, Paris, France. 117
- ERMINE, J.-L., CHAILLOT, M., BIGEON, P., CHARRETON, B. et MALAVIELLE, D. (1996), MKSM, une méthode pour la gestion des connaissances. *Ingénierie des Systèmes d'Information*, vol. 4, n° 4, p. 541–575. 117
- ESTUPINA-BORRELL, V. (2004), *Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair – Applications à de petits bassins versants du sud de la France*. Thèse de doctorat, spécialité : Hydrologie, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France. 158
- EVANS, E. P., PENDER, G., SAMUELS, P. J. et ESCARAMEIA, M. (2001), Scoping Study for Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance. *Research and Development Technical Report to DEFRA / Environment Agency Final report*, HR Wallingford, Bristol, U.K. 29
- EWEN, J. et PARKIN, G. (1996), Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 1. Method. *Journal of Hydrology*, vol. 175, n° 1-4, p. 583–594. 22
- EYTELWEIN, J. A. (1823), *Handbuch der Mechanik fester Körper und der Hydraulik, mit vorzüglicher Rücksicht auf ihre Anwendung in der Architektur*. Köchly, H. A., Leipzig, Allemagne. 255
- EYTELWEIN, J. A. (1825), Recherches sur le mouvement de l'eau en ayant égard à la contraction qui a lieu au passage par divers orifices, et à la résistance qui retarde le mouvement le long des parois des vases. *Annales des Mines*, vol. 11, première série, p. 417–468. 255

- FASKEN, G. B. (1963), Guide for selecting roughness coefficient "n" for channels. *Rap. tech.*, US Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Lincoln, Nebraska. 55, 57, 69
- FAURE, J.-B. (2004), Choix de la modélisation. Dans : *Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques*, chap. 5, Version 1.1, CETMEF, Compiègne, France. 27
- FAURE, J.-B., DHERVILLEZ, L. et VIDAL, J.-P. (2002), Automatic evaluation of the uncertainty on the surface of a flooded area. Dans : *Hydroinformatics 2002 – Proceedings of the 5th International Conference on Hydroinformatics* (I. D. Clukie, D. Han, J. P. Davis et S. Heslop, édés.), vol. 2: Software Tools and Management Systems, p. 1319–1324, IWA, Cardiff, U.K. 43, 195
- FAWCETT, K. R., ANDERSON, M. G., BATES, P. D., JORDAN, J.-P. et BATHURST, J. C. (1995), The importance of internal validation in the assessment of physically based distributed models. *Transactions of the Institute of British Geographers*, vol. 20, p. 248–265. 44
- FINDLER, N. V. et MAZUR, N. M. (1989), System for automatic model verification and validation. *Transactions of the Society for Computer Simulation*, vol. 6, n° 3, p. 153–172. 123
- FISHER, K. R. et DAWSON, H. (2003), Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance – Roughness review. *Rap. tech.*, DEFRA / Environment Agency, Project W5A – 57. 52, 56, 57, 58
- FLAMANT, A. (1900), *Hydraulique*. Encyclopédie des Travaux Publics, Béranger, C., 2<sup>e</sup> éd. 261
- FLAVELLE, P. (1992), A quantitative measure of model validation and its potential use for regulatory purposes. *Advances in Water Resources*, vol. 15, n° 1, p. 5–13. 6
- FOSSET, C. A., HARRISON, D., WEINTROB, H. et GASS, S. I. (1991), An assessment procedure for simulation models: A case study. *Operations Research*, vol. 39, n° 5, p. 710–723. 11
- FOUCAULT, M. (1990), *Les mots et les choses – Une archéologie des sciences humaines*, vol. 166 de *Collection Tel*. Gallimard, Paris, France. 83
- FOURNIÉ, V. (1867), *Résumé des expériences hydrauliques exécutées par le gouvernement américain sur le Mississipi, avec remarques sur les conséquences qui en découlent relativement à la théorie des eaux courantes*. Dunod, Paris, France. 255
- FREAD, D. L. (1993), Flow routing. Dans : *Handbook of Hydrology* (D. R. Maidment, éd.), chap. 10, McGraw-Hill. 43
- FREAD, D. L. et LEWIS, J. M. (1998), NWS FLDWAV model. *Theoretical description and user documentation*, Hydrologic Research Laboratory, Office of Hydrology, National Weather Service. 43
- FREAD, D. L. et SMITH, G. F. (1978), Calibration technique for 1-D unsteady flow models. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 104, n° 7, p. 1027–1044. 74
- FREEMAN, G. E., COPELAND, R. R. et COWAN, W. L. (1996), Uncertainty in stage-discharge relationships. Dans : *Stochastic Hydraulics'96 – Proceedings 7th IAHR Symposium on Stochastic Hydraulics* (K. S. Tickle, C. Goulter, C. Xu, S. A. Wasimi et F. Bouchart, édés.), p. 601–608, International Association for Hydraulic Research. 194
- FRENCH, R. H. (1994), *Open-Channel Hydraulics*. Civil Engineering Series, Mc Graw-Hill International Editions, 2<sup>e</sup> éd. 52, 55, 59
- FRIDMAN NOY, N., FERGERSON, R. W. et MUSEN, M. A. (2000), The knowledge model of Protégé-2000: Combining interoperability and flexibility. Dans : *Proceedings of the second International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management (EKAW 2000)* (R. Dieng et O. Corby, édés.), vol. 1937 de *Lecture Notes in Computer Science*, p. 17–32, Springer, Juan-les-Pins, France. 96
- FRIEDMAN, R., ANSELL, C., DIAMOND, S. et HAIMES, Y. Y. (1984), The use of models for water resources management, planning, and policy. *Water Resources Research*, vol. 20, n° 7, p. 793–802. 20
- GATES, T. K., WATSON, C. C. et WITTLER, R. J. (1998), How spacing of cross-section surveys affects understanding of variability in channel hydraulic geometry. Dans : *Water Resources Engineering 98 – Proceedings of the International Water Resources Engineering Conference* (S. R. Abt, J. Young-Pezeshk et C. C. Watson, édés.), vol. 2, p. 1703–1708, ASCE, Memphis, Tennessee. 43

- GAUCKLER, P.-G. (1867a), Etudes théoriques et pratiques sur l'écoulement et le mouvement des eaux – Extrait. *Le technologiste ou archive des progrès de l'industrie française et étrangère*, vol. 28, p. 612–615. 259
- GAUCKLER, P.-G. (1867b), Études théoriques et pratiques sur l'écoulement et le mouvement des eaux – Extrait. *Comptes-rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, vol. 64, p. 818–822. 259
- GAUCKLER, P.-G. (1868), Du mouvement de l'eau dans les conduites. Dans : *Annales des Ponts et Chaussées – Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur ; lois, décrets arrêtés et autres actes concernant l'administration des ponts et chaussées – 4<sup>ème</sup> série – 1<sup>er</sup> semestre*, vol. 15, p. 229–281, Dunod, Paris, France. 202, 259, 260
- GHAVASIEH, A.-R. (2003), *Contribution à la modélisation des aménagements hydrauliques des bassins versants en lit majeur*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard – Lyon I, Lyon, France. 172, 184
- GHIDAGLIA, J.-M. et RITTAUD, B. (2004), La simulation numérique. *La Recherche*, n° 380, p. 73–76. xvii
- GILLEN, D. F. (1996), Determination of roughness coefficients for streams in west-central Florida. *Open-File Report 96-226*, US Geological Survey, Tampa, Florida. 57
- GILLEY, J. E. et KOTTWITZ, E. R. (1992), Darcy-Weisbach roughness coefficients for gravel and cobble surfaces. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 118, p. 104–112. 58, 59, 251
- GIRARD, P.-S. (1804), *Essai sur le mouvement des eaux courantes et la figure qu'il convient de donner aux canaux qui les contiennent*. Imprimerie de la République, Paris, France. 254
- GIRARD, P.-S. (1831), *Essai sur le mouvement des eaux courantes et la figure qu'il convient de donner aux canaux qui les contiennent*. Dans : *Mémoires sur le canal de l'Ourcq et la distribution de ses eaux ; sur le dessèchement et l'assainissement de Paris, et les divers canaux navigables qui ont été mis à exécution ou projetés dans le bassin de la Seine pour l'extesion du commerce de la capitale ; avec un atlas descriptif*, vol. 1, p. 243–312, Carilian - Goeury, Paris, France. 254
- GIRAUD, F., FAURE, J.-B., ZIMMER, D., LEFEUVRE, J. C. et SKAGGS, R. W. (1997), Hydrologic modeling of a complex wetland. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 123, n° 5, p. 344–353. 33
- GOODRICH, M. T. (1992), Discussion about “The modeling process and model validation”. *Ground Water*, vol. 30, n° 2, p. 276–277. 9, 11
- GOUTX, D. (2004), Données hydrauliques. Dans : *Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques*, chap. 4, Version 1.0, CETMEF, Compiègne, France. 43
- GOUTX, D. et LADREYT, S. (2000), LIDO 2.0, logiciel de modélisation filaire des écoulements à surface libre. *Guide méthodologique*, CETMEF. 124
- GRAHAM, D. et JACOBSEN, T. (2001), MIKE SHE code verification and validation. *Final report*, DHI Software, Hørsholm, Denmark. 13
- GREEN, I. R. A. et STEPHENSON, D. (1986), Criteria for comparison of single event models. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 31, n° 3, p. 395–411. 71, 72, 73, 158
- GRIFFITHS, G. A. (1981), Flow resistance in coarse gravel bed rivers. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 107, n° 7, p. 899–918. 60, 61
- GRUBER, T. R. (1993), Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing. Dans : *Formal Ontology in Conceptual Analysis and Knowledge Representation* (N. Guarino et R. Poli, eds.), Kluwer, Deventer, The Netherlands. 84
- GUANGUILLET, É. O. et KUTTER, W. R. (1893), *A General Formula for the Uniform Flow of Water in Rivers and Other Channels*. Wiley, New-York, 2<sup>e</sup> éd. 58, 260
- GUINOT, V. et GOURBESVILLE, P. (2003), Calibration of physically based models: Back to basics? *Journal of Hydroinformatics*, vol. 5, n° 4, p. 233–244. 9, 20, 21, 22, 23
- HAFEZ, Y. I. et EL KADY, M. (2001), A self-calibrated water surface profile computer model for the Nile river in Egypt. Dans : *World water and environment resources congress* (D. Phelps et G. Shelke, eds.), vol. 1, p. 397, Orlando, Florida. 71

- HAGER, W. H. (2001), Gauckler and the GMS formula. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 127, n° 8, p. 635–638. 261
- HAGER, W. H. (2003), *Hydraulicians in Europe 1800-2000 – A Biographical Dictionnary of Leaders in Hydraulic Engineering and Fluid Mechanics*. International Association of Hydraulic engineers. 253
- HAGER, W. H. (2004), Jules Dupuit—Eminent hydraulic engineer. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 130, n° 9, p. 843–848. 255
- HALCROW/HR WALLINGFORD (1999), Isis FLOW – User manual. *Rap. tech.* 33
- HALL, J. W. (2003), Handling uncertainty in the hydroinformatic process. *Journal of Hydroinformatics*, vol. 5, n° 4, p. 215–232. 195
- HALL, J. W., TARANTOLA, S., BATES, P. D. et HORRITT, M. S. (2005), Distributed sensitivity analysis of flood inundation model calibration. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 131, n° 2, p. 117–126. 195
- HARBAUGH, A. W. et McDONALD, M. G. (1996), User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. *Open-File Report 96-485*, US Geological Survey, Reston, Virginia. 91
- HARMONICQUA Consortium (2004), MoST (Modelling Support Toolbox). Web <http://www.harmoniqua.org> 14, 111
- HARTNACK, J. et MADSEN, H. (2001), Data assimilation in river flow modelling. Dans : *4 th DHI Software Conference*, Helsingør, Denmark. 75
- HARVEY, D. P. (2002), *A Generic Modelling Framework Component for Hydroinformatics Systems*. PhD thesis, University of Bristol, Bristol, U.K. xix, 192, 193
- HARVEY, D. P., HAN, D. et CLUKIE, I. D. (2002), A blueprint for next-generation modelling software. Dans : *Hydroinformatics 2002 – Proceedings of the 5th International Conference on Hydroinformatics* (R. A. Falconer, B. Lin, E. L. Harris et C. A. M. E. Wilson, édés.), vol. 2: Software Tools and Management Systems, p. 1276–1281, IWA, Cardiff, U.K. 192
- HASSANIZADEH, S. M. et CARRERA, J. (1992), Editorial – Special Issue: 1. Validation of geohydrological models. *Advances in Water Resources*, vol. 15, n° 1, p. 1–3. 24
- HÄUSLEIN, A. et PAGE, B. (1991), Knowledge-based approaches to modeling and simulation support. *Systems Analysis Modelling Simulation*, vol. 8, n° 4-5, p. 257–272. 122, 123
- HAWKING, S. W. (2003), *Sur les épaules des géants – Les plus grands textes de physique et d'astronomie*. Dunod, Paris, France. 24
- HAYDEN, K., MCCANN, M. et SMITH, R. (1999), Roughness Characteristics of Natural Channels. Web <http://www.engr.utk.edu/hydraulics/openchannels/cover.htm> 55
- HENDERSON, F. M. (1969), *Open Channel Flow*. Series in Civil Engineering, McMillan, New-York, 3<sup>e</sup> éd. 265
- HENRIKSEN, H. J., TROLDORG, L., NYEGAARD, P., SONNENBORG, T. O., REFSGAARD, J. C. et MADSEN, B. (2003), Methodology for construction, calibration and validation of a national hydrological model for Denmark. *Journal of Hydrology*, vol. 280, n° 1-4, p. 52–71. 13
- HERSKOVITZ, P. J. (1991), A theoretical framework for simulation validation: Popper's falsification. *International Journal of Modelling and Simulation*, vol. 11, n° 2, p. 56–58. 24
- HICKS, D. M. et MASON, P. D. (1998), *Roughness Characteristics of New Zealand Rivers*. National Institute of Water and Atmospheric Research – Water Resources Publications, LLC, Englewood, Colorado. 56, 57, 58, 60, 62, 63, 64, 65, 66, 69, 197, 237
- HOLZ, K. P. et JANUSZEWSKI, U. (1980), Automatic calibration of numerical tidal models. Dans : *17th Coastal Engineering Conference*, vol. 3, p. 2450–2460, Sydney, Australia. 74
- HORNUNG, U. (1996), Mathematical aspects of inverse problems, model calibration, and parameter identification. *The Science of The Total Environment*, vol. 183, n° 1-2, p. 17–23. 4
- HORRITT, M. S. (2000), Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery. *Water Resources Research*, vol. 36, n° 11, p. 3279–3291. 47

- HORRITT, M. S. et BATES, P. D. (2001), Predicting floodplain inundation: Raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrological Processes*, vol. 15, n° 5, p. 825–842. 47
- HUMPHREYS, A. A. et ABBOT, H. L. (1861), *Report upon the physics and hydraulics of the Mississippi river; upon the protection of the alluvial region against overflow and upon the deepening of the mouths: based upon surveys and investigations made under the acts of Congress directing the topographical and hydrographical survey of the delta of Mississippi river, with such investigations as might lead to determine the most practicable plan for securing it from inundation, and the best mode of deepening the channels at the mouths of the river*, vol. 4 de *Professional papers of the corps of topographical engineers – United States Army*. Lippincott, J. B., Philadelphia, Pennsylvania. 202, 255, 256
- HUMPHREYS, A. A. et ABBOT, H. L. (1867), Théorie du mouvement de l'eau dans les fleuves, les rivières et les canaux. *Le technologiste ou archive des progrès de l'industrie française et étrangère*, vol. 28, p. 501–504. 255
- IGN (1986), 2045 est – Lézat-sur-Lèze 152
- IGN (1991), 2044 est – Muret 152
- JACKSON, P. (1999), *Introduction to Expert Systems*. International Computer Science, Addison Wesley Longman, Harlow, U.K., 3<sup>e</sup> éd. xx
- JARRETT, R. D. (1985), Determination of roughness coefficients for streams in Colorado. *Water Resources Investigation Report 85-4004*, US Geological Survey, Lakewood, Colorado. 57, 58, 66
- JARRETT, R. D. et PETSCH, H. E. (1985), *Computer Program NCALC User's Manual – Verification of Manning's Roughness Coefficient in Channels*. 239
- JEBARI, H. (2004), *Coefficient, constante, facteur, nombre – Sens et statut en sciences physiques*. Mémoire de DEA didactique et construction des savoirs scientifiques, Université Claude Bernard-Lyon 1 – Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche en Didactique et en Histoire des Sciences et Techniques (LIRDHiST), Lyon, France. 3
- JOHNSON, P. A. (1996), Uncertainty of hydraulic parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, n° 2, p. 112–114. 66
- JOURDAN, L. (2002), *Contribution à la quantification des effets d'ouvrages ralentisseurs et/ou écre-teurs en lit majeur par modélisation hydraulique 1D*. Mémoire de fin d'études, ISTIL. 172
- KASSAHUN, A., SCHOLTEN, H., ZOMPANAKIS, G. et GAVARDINA, C. (2004), Support for model based water management with the HARMONIQUE toolbox. Dans : *Complexity and Integrated Resources Management, Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, iEMMSs* (C. Pahl-Wostl, S. Schmidt, A. E. Rizzoli et A. J. Jakeman, éd.), iEMMSs, Manno, Switzerland. 14
- KASSEL, G. (2002), OntoSpec: une méthode de spécification semi-informelle d'ontologies. Dans : *Actes des 13èmes journées francophones d'Ingénierie des Connaissances IC'2002* (B. Bachimont, éd.), p. 75–87, Rouen, France. 97
- KHATIBI, R. H. (2001), Some issues in computational hydraulics practice. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 127, n° 6, p. 438–442. xvii, 194
- KHATIBI, R. H., WILLIAMS, J. J. R. et WORMLEATON, P. R. (1997), Identification problem of open-channel friction parameters. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 123, n° 12, p. 1078–1088. 4, 74
- KIDSON, R. (2003), Manning's n Expert Panel experiment: an invitation – Website announcement abstract. *Hydrological processes*, vol. 17, n° 7, p. 1469. 51
- KING, H. W. (1954), *Handbook of Hydraulics – for the Solution of Hydraulic Problems*. McGraw-Hill, New-York, 4<sup>e</sup> éd. 58, 260
- KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D. Jr. et VECCHI, M. P. (1983), Optimization by simulated annealing. *Science*, vol. 220, n° 4598, p. 671–683. 186
- KLEMEŠ, V. (1986), Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 31, n° 1, p. 13–24. 12, 20



- KLEMEŠ, V. (1997), Guest editorial: Of carts and horses in hydrologic modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 2, n° 2, p. 43–49. 22
- KLEMEŠ, V. (2000a), Of carts and horses in hydrological modelling. Dans : *Common sense and Other Heresies – Selected Papers on Hydrology and Water Resources Engineering* (C. D. Sellars, éd.), chap. 2.1, p. 53–68, Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ontario. 22
- KLEMEŠ, V. (2000b), Operational testing of hydrological simulation models. Dans : *Common Sense and Other Heresies – Selected Papers on Hydrology and Water Resources Engineering* (C. D. Sellars, éd.), chap. 2.4, p. 111–121, Canadian Water Resources Association, Cambridge, Ontario. 12
- KNEPELL, P. L. et ARANGNO, D. C. (1993), *Simulation Validation: a Confidence Assessment Methodology*, vol. 3512 de *IEEE Computer Society Press Monograph*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1<sup>re</sup> éd. 6, 11
- KNIGHT, D. W. (2001), Conveyance in 1-D river models. *Review paper for the scoping study on reducing uncertainty in river flood conveyance*, HR Wallingford & the Environment Agency. 29
- KOGUT, P. A., CRANFIELD, S., HART, L., DUTRA, M., BACKLAWSKI, K., KOKAR, M. et SMITH, J. (2002), UML for ontology development. *The Knowledge Engineering Review*, vol. 17, n° 1, p. 61–64. 84, 132
- KONIKOW, L. F. (1992), Discussion about “The modeling process and model validation”. *Ground Water*, vol. 30, n° 4, p. 622–623. 11
- KONIKOW, L. F. et BREDEHOEFT, J. D. (1992), Groundwater models cannot be validated. *Advances in Water Resources*, vol. 15, n° 1, p. 75–83. 24
- KUHN, T. S. (1983), *La structure des révolutions scientifiques*. Champs, Flammarion, Paris, France. 24, 25
- KUTTER, W. R. (1885), *Bewegung des Wassers in Canälen und Flüssen, Tabellen und Beiträge zur Erleichterung des Gebrauchs der neuen allgemeinen Geschwindigkeits-Formel von Ganguillet und Kutter*. Parey, P., Berlin, Allemagne. 260
- LAVEDRINE, I. A. et ANASTASIADOU-PARTHENIOU, L. (1995), Calibration criteria for 1D river models – Assessment of objective functions and automatic calibration. *Rap. tech. SR442*, HR Wallingford. 72
- LE DROGO, J. (2004), *Suite du développement d'AM0v2*. Rapport de stage de deuxième année isima, CEMAGREF, U. R. Hydrologie-Hydraulique, Lyon. 95, 124, 192
- LE MOIGNE, J.-L. (1990), *La modélisation des systèmes complexes*. collection « AFCET-Systèmes », Dunod, Paris, France. 9, 117
- LEBOSSÉ, A. (1991), Estimation of Manning-Strickler roughness coefficient in Saint-Venant equations. Dans : *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula* (B. C. Yen, éd.), p. 436–450, Water Resources Publications, Littleton, Colorado. 74
- LEBOSSÉ, A. et LADREYT, S. (2000), LIDO 2.0, logiciel de modélisation filaire des écoulements à surface libre. *Notice théorique*, CETMEF. 124
- LENCASTRE, A. (1999), *Hydraulique générale*. Eyrolles, Paris, France, 2<sup>e</sup> éd. 257, 258
- LEOPOLD, L. B. et WOLMAN, M. G. (1957), River channel patterns: Braided, meandering and straight. *Professional Paper 282-B*, US Geological Survey. 60, 61
- LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M. G. et MILLER, J. P. (1964), *Fluvial Processes in Geomorphology*. Books in Geology, Freeman, W. H. and Company, San Francisco, California. 35
- LI, S.-G., VENKATARAMAN, L. et MCLAUGHLIN, D. (1992), Stochastic-theory for irregular stream modeling – 1. Flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 118, n° 8, p. 1079–1090. 37
- LIMERINOS, J. T. (1970), Determination of the Manning coefficient from measured bed roughness in natural channels. *Water Supply Paper 1898-B*, US Geological Survey, Washington, D.C. 60, 61
- LIONG, S. Y., CHAN, W. T. et LAW, C. L. (1991a), An expert system for storm water management modelling and its application. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 4, n° 5, p. 367–375. xx

- LIONG, S. Y., CHAN, W. T. et LUM, L. H. (1991*b*), Knowledge-based system for SWMM runoff component calibration. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 117, n° 5, p. 507–524. xx
- LIONG, S. Y., IBRAHIM, Y., CHAN, W. T. et LAW, C. L. (1993), Computer-aided catchment-calibration model. *Advances in Engineering Software*, vol. 17, n° 3, p. 147–154. xx
- LIONG, S. Y., SELVALINGAM, S. et BRADY, D. K. (1989), Roughness values for overland flow in subcatchments. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 11(, n° 2, p. 203–214. 58
- LUMB, A. M. et KITTLE, J. L. J. (1993), Expert system for calibration and application of watershed models. Dans : *Proceedings of The Federal Interagency Workshop on Hydrologic Demands for the 90's* (J. S. Burton, éd.), vol. 93-4018, p. 4-1-4-7, US Geological Survey, Water Resources Investigation Report, Fort Collins, Colorado. xx
- LUMB, A. M., MCCAMMON, R. B. et KITTLE, J. L. J. (1994), *Users Manual for an Expert System (HSPEXP) for Calibration of the Hydrological Simulation Program—Fortran*. US Geological Survey, Reston, Virginia. xx
- LUSSIER, L., ROBERT, B. et MARCHE, C. (1990), Diagnostic d'une simulation hydrologique : une approche à l'étalonnage automatique. *Sciences et Techniques de l'Eau*, vol. 23, n° 2, p. 179–183. xx
- LYNESS, J. F., MYERS, W. R. C. et WARK, J. B. (1997), The use of different conveyance calculations for modelling flows in a compact compound channel. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management*, vol. 11, n° 5, p. 335–340. 31
- MARCA, D. A. et MCGOWAN, C. L. (1988), *SADT, Structured Analysis and Design Technique*. McGraw-Hill, New-York. 86
- MARCOS, M., MOISAN, S. et DEL POBIL, A. P. (1998), Knowledge modeling of program supervision task. Dans : *11th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems (IEA-98-AIE)* (J. Mira, A. P. del Pobil et M. Ali, édés.), vol. 1 de *Methodology and tools in knowledge-based systems*, p. 124–133, Lecture Notes in Artificial Intelligence – Subseries of Lecture Notes in Computer Science, Springer, Benicassim, Spain. 125
- MARKS, K. J. et BATES, P. D. (2000), Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrological Processes*, vol. 14, n° 11-12, p. 2109–2122. 42
- MARSH, S. B., JOHNSON, G. P. et HOLMES, R. H. (2004), Data base and computational tools to aid in determination of roughness coefficients of streams. *Water resources investigation report, in progress*, US Geological Survey. 68
- MAYS, L. W. et TUNG, Y.-K. (1992), *Hydrosystems Engineering and Management*. Water Resources and Environmental Management, McGraw-Hill, New-York. 66
- MAZAUERIC, C. (2003), *Assimilation de données pour les modèles d'hydraulique fluviale. Estimation de paramètres, analyse de sensibilité et décomposition de domaine*. Thèse de doctorat en mathématiques appliquées, Université Joseph Fourier – Grenoble 1, Grenoble, France. 78
- MCGAHEY, C. et SAMUELS, P. G. (2004), River roughness – The integration of diverse knowledge. Dans : *River Flow 2004 – Proceedings of the Second International Conference on Fluvial Hydraulics* (M. Greco, A. Carravetta et R. D. Morte, édés.), vol. 1, p. 405–414, Balkema, Napoli, Italy. 54
- MCILRAITH, S. A. (1989), Qualitative data modeling: Application of a mechanism for interpreting graphical data. *Computational Intelligence*, vol. 5, p. 111–120. 166
- MEYER-PETER, E. et MÜLLER, R. (1948), Formulas for bed-load transport. Dans : *Proceedings of the second Congress of the International Association of Hydraulic Research*, p. 39–64, Stockholm, Sweden. 60, 61
- MOISAN, S. (1998), *Une plate-forme pour une programmation par composants de systèmes à base de connaissance*. Habilitation à diriger les recherches, Université de Nice. 127, 143
- MOISAN, S. (2002), Knowledge representation for program reuse. Dans : *Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence, ECAI-2002* (F. van Harmelen, éd.), vol. 77 de *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, p. 240–244, IOS Press, Lyon, France. 127

- MOISAN, S. (2003), Program supervision: YAKL and PEGASE+ reference and user manual. *Research Report 5066*, INRIA Sophia-Antipolis, Projet ORION, Sophia-Antipolis, France. 127, 130
- MOISAN, S. et ERMINE, J.-L. (2000), Gestion opérationnelle des connaissances sur les codes. Dans : *Actes de la conférence Ingénierie des Connaissances IC'2000* (P. Tchounikine, éd.), Toulouse, France. 118, 127
- MOISAN, S., PLOYETTE, F., THONNAT, M., CLÉMENT, V. et VINCENT, R. (1995a), Documentation de l'interface du logiciel OCAPI version 2.0. *Rapport Technique 0186*, INRIA, Sophia-Antipolis, France. 126
- MOISAN, S., SHEKHAR, C. et THONNAT, M. (1995b), Real-time perception program supervision for vehicle driving assistance. Dans : *International Conference on Recent Advances in Mechatronics (ICRAM'95)*, vol. 1, p. 173–179, Istanbul, Turkey. 126
- MOISAN, S., VINCENT, R. et THONNAT, M. (1997), Program supervision: from knowledge modeling to dedicated engines. *Research report 3324*, Inria. 127
- MOISAN, S., VINCENT, R., THONNAT, M., CLÉMENT, V. et VAN DEN ELST, J. (1995c), Manuel de référence du logiciel OCAPI version 2.0. *Rapport Technique 0183*, INRIA, Sophia-Antipolis, France. 126
- MOISAN, S., VINCENT, R., VAN DEN ELST, J. et VAN HARMELLEN, F. (1995d), Towards an intelligent failure handling mechanism in program supervision. Dans : *First International Workshop on Knowledge Based Systems for the (re)Use of Program Libraries – KBUP'95*, p. 109–118, INRIA, Sophia-Antipolis, France. 126
- MOISAN, S. et ZIÉBELIN, D. (2000), Résolution de problèmes en pilotage de programmes. Dans : *RFLA'00. 13ème congrès Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle*, vol. 3, p. 387–396, Paris, France. 127
- MOREL, G. (1997), *Réutilisation et intégration de codes de calcul dans des systèmes à base de connaissances – Application aux systèmes de conduite avancée de bassins versants*. Mémoire de DEA, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France. 97, 122, 124
- MOREL, G. (2002), *Contribution au rapprochement entre l'ingénierie des connaissances et le génie logiciel dans le cadre de la conception d'applications techniques – Application au domaine de la gestion du risque inondation*. Thèse de doctorat, spécialité contrôle des systèmes, Université de Technologie de Compiègne. 86, 97, 132
- MOREL, G. et KASSEL, G. (1999), Définition d'un cadre conceptuel pour rapprocher l'Ingénierie des Connaissances, la Représentation des Connaissances Objet et le Génie Logiciel Objet. Dans : *Journées Ingénierie des Systèmes d'Information et Ingénierie des Connaissances du GDR-PRC I3*, Université de Dauphine, Paris, France. 132
- MOREL, G. et KASSEL, G. (2001), Connaissances, objets et composants : complémentarité et intégration pour le développement d'applications industrielles. Dans : *Ingénierie des Connaissances : IC'2001*, Grenoble, France. 132
- MOREL, G. et ROUAS, G. (1998), Principles and architecture of a prediction and diagnosis support system for river basins. Dans : *Hydroinformatics'98 – Proceedings of the third International Conference on Hydroinformatics* (V. M. Babović et L. C. Larsen, éd.), vol. 1, p. 401–408, Balkema, Copenhagen, Denmark. 125
- MORIN, A. J. (1863), Rapport sur un mémoire présenté par M. Bazin, ingénieur des Ponts et Chaussées, sur le mouvement de l'eau dans les canaux découverts. *Comptes-Rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 57, p. 192–205. 257
- MORRIS, M. W. et ANASTASIADOU-PARTHENIOU, L. (1994), Calibration criteria for 1D river models – Literature review and preliminary assessment. *Rap. tech. SR391*, HR Wallingford. 72
- MORTON, J. A. et SUÁREZ, M. (2001), Kinds of models. Dans : *Model Validation: Perspectives in Hydrological Science* (M. G. Anderson et P. D. Bates, éd.), chap. 2, p. 11–21, Wiley, Chichester, U.K. 5, 7
- MOURET, G. (1921a), Antoine Chézy – Histoire d'une formule d'hydraulique. *Annales des Ponts et Chaussées*, vol. 91, p. 165–269. 254

- MOURET, G. (1921*b*), *Antoine Chézy – Histoire d'une formule d'hydraulique – Extrait des Annales des Ponts et Chaussées, II – 1921*. Dumas, A., Paris, France. 254
- MOUSSA, R. et BOCQUILLON, C. (1996), Criteria for the choice of flood-routing methods in natural channels. *Journal of Hydrology*, vol. 186, n° 1-4, p. 1–30. xix
- MOUSSA, R. et BOCQUILLON, C. (2000), Approximation zones of the Saint-Venant equations for flood routing with overbank flow. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 4, n° 2, p. 251–261. xix
- MULLER, P.-A. et GAERTNER, N. (2000), *Modélisation objet avec UML*. Collection Best of, Eyrolles, Paris, France, 2<sup>e</sup> éd. 84, 233
- MURRAY, K. J. et SHEPPARD, S. V. (1988), Knowledge-based simulation model specification. *Simulation*, vol. 50, n° 3, p. 112–119. 122
- NASH, J. E. et SUTCLIFFE, J. V. (1970), River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, vol. 10, p. 282–290. 72, 168
- NAULET, R. (2002), *Utilisation de l'information des crues historiques pour une meilleur prédétermination du risque d'inondation – Application au bassin de l'Ardèche à Vallon Pont d'Arc et St-Martin d'Ardèche*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, Grenoble, France. 47
- NAVIER, H. (1827), Mémoire sur les lois du mouvement des fluides. Dans : *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France – Année 1823*, vol. 6, p. 389–440, Gauthier-Villars, Paris, France. 28
- NAVRAITIL, O. (2005), *Débit de pleins bords et géométrie hydraulique : une description synthétique de la morphologie des cours d'eau pour relier le bassin versant et les habitats aquatiques*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, France. 86
- NELDER, J. A. et MEAD, R. (1965), A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, vol. 7, n° 4, p. 308–313. 75
- NELSON, J. M. (2001), Book review: Roughness characteristics of New Zealand Rivers. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 127, n° 6, p. 526–527. 56
- NEWTON, Sir. I. (1687), *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Pepys, Samuel, London, U.K. 24
- NICOLLET, G. et UAN, M. (1979), Écoulements permanents à surface libre en lits composés. *La Houille Blanche*, n° 1, p. 21–30. 30
- NIELSEN, J. B., LINDBERG, S., AMDISEN, L. K. et JENSEN, N. E. (1987), Towards the fifth generation of numerical modelling systems. Dans : *Proceedings of the Fourth International Conference on Urban Storm Drainage*, p. 291–296, Lausanne, Switzerland. 192
- NOLAN, M. K., FREY, C. et JACOBSON, J. (1998), Surface-water Field Techniques Training Class (Version 1.0). *Water Resources Investigations Report 98-4252*, US Geological Survey. 56
- NOUVEL, P. (2002), *Enquête sur le concept de modèle*. Science, histoire et société, Presses Universitaires de France, Paris, France. 4
- OBJECTEERING SOFTWARE (2004), Objecteering / UML Modeler. *Manuel utilisateur version 5.3*. 233
- O'KEEFE, R. (1986), Simulation and expert systems – A taxonomy and some examples. *Simulation*, vol. 46, n° 1, p. 10–16. 124
- OMG (2003), *Unified Modeling Language (UML) specification – version 1.5*. Object Management Group, Needham, Massachusetts. 15, 84, 233
- ÖREN, T. I. (1981), Concepts and criteria to assess acceptability of simulation studies: A frame of reference. *Communications of the ACM*, vol. 24, n° 4, p. 180–189. 12
- ORESQUES, N., SHRADER-FRECHETTE, K. et BELITZ, K. (1994), Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth-sciences. *Science*, vol. 263, n° 5147, p. 641–646. 23
- PAPPENBERGER, F., BEVEN, K. J., HORRITT, M. S. et BLAZKOVA, S. (2005), Uncertainty in the calibration of effective roughness parameters in HEC-RAS using inundation and downstream level observations. *Journal of Hydrology*, vol. 302, n° 1-4, p. 46–49. 195

- PARKIN, G., O'DONNELL, G., EWEN, J., BATHURST, J. C., O'CONNELL, P. E. et LAVABRE, J. (1996), Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 2. Case study for a Mediterranean catchment. *Journal of Hydrology*, vol. 175, n° 1-4, p. 595–613. 22
- PARTIOT (1871), Mémoire sur les marées fluviales – Extrait. *Compte-rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences*, vol. 73, p. 91–95. 28
- PASSONE, S., CHUNG, P. W. H. et NASSEHI, V. (2002), The use of a genetic algorithm in the calibration of estuary models. Dans : *ECAI 2002 – Proceedings of the 15th European Conference on Artificial Intelligence* (F. van Harmelen, éd.), vol. 77 de *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, p. 183–187, IOS Press, Lyon, France. 75
- PETERSEN-ØVERLEIR, A. (2004), Accounting for heteroscedasticity in rating curve estimates. *Journal of Hydrology*, vol. 292, n° 1-4, p. 173–181. 194
- PHILLIPS, J. V. et INGERSOLL, T. L. (1998), Verification of roughness coefficients for selected natural and constructed stream channels in Arizona. *Professional Paper 1584*, US Geological Survey. 56, 57, 58
- PIASECKI, M. et BERMUDEZ, L. (2003), HYDROML: Conceptual development of a hydrologic markup language. Dans : *Water Engineering and Research in a Learning Society: Modern Developments and Traditional Concepts – Proceedings of the XXX IAHR Congress* (J. Ganoulis et P. Prinos, éd.), vol. D: Hydroinformatics, p. 271–278, International Association of Hydraulic Engineers, Thessaloniki, Greece. 96
- PICARD, S. (2002), *Capitalisation des connaissances sur de grands logiciels de calcul scientifique*. Thèse de doctorat, Université d'Orsay, Paris, France. 117, 118, 122, 127
- PICARD, S., CHAILLOT, M. et MILLERAT, P. (1997), Modélisation des connaissances associées à un simulateur de procédé industriel. Dans : *Actes des Journées Ingénierie des Connaissances et Apprentissage Automatique (JICAA'97)*, p. 655–668, Université de Rennes I, Roscoff, France. 118
- PICARD, S., ERMINE, J.-L. et SCHEURER, B. (1999a), Gestion des connaissances pour des grands logiciels de calcul scientifique. Dans : *Actes de la conférence Ingénierie des Connaissances IC'99* (R. Teulier, éd.), p. 171–180. 117, 118, 198
- PICARD, S., ERMINE, J.-L. et SCHEURER, B. (1999b), Knowledge management for large scientific software. Dans : *Proceedings of the second International Conference on the Practical Application of Knowledge Management – PAKeM'99*, p. 93–114, The Practical Application Company, London, U.K. 117
- PITROU, A. (1998), *Conception et réalisation d'un module de description symbolique et d'évaluation de jeux de courbes*. Mémoire de DEA, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Paris, France. 167
- PONCE, V. M., SHETTY, A. V. et ERCAN, S. (2001), Manning's  $n$  pictorial. Web <http://manningsn.sdsu.edu/> 56
- PONCE, V. M., SHETTY, A. V. et NOGUÉS, J. P. (2002), Manning's  $n$  pictorial for natural channels and flood plains. Web <http://manningsn2.sdsu.edu/> 56
- POPPER, K. R. (1991), *La connaissance objective – Une approche évolutionniste*, vol. 405 de *Collection Champs*. Flammarion. 24
- POULARD, C. (2002), Étude de l'Hogneau : Analyse hydrologique et construction d'hydrogrammes de projet ; Tests de scénarios d'aménagements, dont la création de Zones d'Épandage de Crue. *Rapport interne*, CEMAGREF/ANTEA, Lyon, France. 172
- POWELL, R. O., MILLER, S. J., WESTERGARD, B. E., MULVIHILL, C. I., BALDIGO, B. P., GALLAGHER, A. S. et STARR, R. R. (2004), Guidelines for surveying bankfull channel geometry and developing regional hydraulic-geometry relations for streams of New York State. *Open-File Report 03-92*, US Geological Survey. 87
- POWELL, R. W. (1950), Resistance to flow in rough channels. *Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 31, n° 4, p. 575–582. 202, 264
- POWELL, R. W. (1968), The origin of Manning's formula. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 94, n° 4, p. 1179–1181. 261

- PRICE, R. K., AHMAD, K. et HOLZ, K. P. (1998), Hydroinformatics concepts. Dans : *Hydroinformatics Tools* (J. Marsalek, Č. Maksimović, E. Zeman et R. K. Price, éd.), p. 47–76, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. xix
- PROUST, S. (2005), *Écoulements en lit composé en présence de singularités topographiques dans le lit majeur*. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1. 31, 54
- PROUST, S., RIVIÈRE, N., BOUSMAR, D., PAQUIER, A., ZECH, Y. et MOREL, R. (2005), Flow in compound channel with abrupt floodplain contraction. *Journal of Hydraulic Engineering*, soumis pour publication. 31
- QUINE, W. V. O. (1999), *Le mot et la chose*, vol. 450 de *Collection Champs*. Flammarion, Paris, France. 24
- RACLOT, D. (2003), *Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France. 47, 49, 195
- RACLOT, D. et PUECH, C. (2003), What does AI contribute to hydrology? Aerial photos and flood levels. *Applied Artificial Intelligence*, vol. 17, n° 1, p. 71–86. 47
- RAMESH, R., DATTA, B., BHALLAMUDI, S. M. et NARAYANA, A. (2000), Optimal estimation of roughness in open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 126, n° 4, p. 299–303. 72, 74
- RAMSER, C. E. (1929), *Flow of Water in Drainage Channels – The Results of Experiments to Determine the Roughness Coefficient  $n$  in Kutter's Formula*, vol. 129 de *Technical Bulletin*. US Department of Agriculture, Washington, D.C. 52, 55, 57, 58, 69
- RAO, V. S., CONTRACTOR, D. N. et TIYAMANI, C. (1976), Optimal river cross sections for flood routing. Dans : *Symposium on Inland Waters for Navigation, Flood Control, and Water Diversions*, p. 421–433. 73
- RATHBURN, S. L. (2004), Review of "Roughness characteristics of New Zealand rivers" by D. Murray Hicks and Peter D. Mason. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 130, n° 6, p. 593–594. 56
- REBOH, R., REITER, J. et GASCHING, J. (1982), Development of a Knowledge-Based Interface to a Hydrological Simulation Program. *SRI Technical Report 3477*, SRI International, Menlo Park, California. xx
- REFSGAARD, J. C. (1996), Terminology, modelling protocol and classification of hydrological model codes. Dans : *Distributed Hydrological Modelling* (M. B. Abbott et J. C. Refsgaard, éd.), vol. 22 de *Water Science and Technology Library*, chap. 2, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. 5, 13, 22
- REFSGAARD, J. C. (1997), Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, vol. 198, n° 1-4, p. 69–97. 13, 165
- REFSGAARD, J. C. (2002), State-of-the-Art Report on Quality Assurance in Modelling Related to River Basin Management. *HarmoniQuA-report D-WP1-1*. 6
- REFSGAARD, J. C. et HENRIKSEN, H. J. (2002), Modelling guidelines – A theoretical framework. Dans : *HarmoniQUA – State-of-the-Art Report on Quality Assurance in Modelling Related to River Basin Management* (J. C. Refsgaard, éd.), chap. 3, HarmoniQUA. 6
- REFSGAARD, J. C. et HENRIKSEN, H. J. (2004), Modelling guidelines—terminology and guiding principles. *Advances in Water Resources*, vol. 27, n° 1, p. 71–82. 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, 15, 23, 24, 25, 32, 68, 88, 89, 90, 96, 110, 143, 189
- REFSGAARD, J. C., HENRIKSEN, H. J., HARRAR, W. G., SCHOLTEN, H. et KASSAHUN, A. (2004), Quality assurance in model based water management – review of existing practice and outline of new approaches. *Environmental Modelling and Software*, vol. 20, p. 1201–1215. 14, 109, 194
- REFSGAARD, J. C. et KNUDSEN, J. (1996), Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resources Research*, vol. 32, n° 7, p. 2189–2202. 12

- REFSGAARD, J. C. et STORM, B. (1996), Construction, calibration and validation of hydrological models. Dans : *Distributed Hydrological Modelling* (M. B. Abbott et J. C. Refsgaard, édés.), vol. 22 de *Water Science and Technology Library*, chap. 3, p. 41–54, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. 165
- REGGIANI, P., HASSANIZADEH, S. M., SIVAPALAN, M. et GRAY, W. G. (1999), A unifying framework for watershed thermodynamics: Constitutive relationships. *Advances in Water Resources*, vol. 23, n° 1, p. 15–39. 91
- REGGIANI, P., SIVAPALAN, M. et HASSANIZADEH, S. M. (1998), A unifying framework for watershed thermodynamics: Balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics. *Advances in Water Resources*, vol. 22, n° 4, p. 367–398. 91
- ROGERS, D. (2002), The art and science of hydraulic model calibration. Dans : *Hydroinformatics 2002 – Proceedings of the 5th International Conference on Hydroinformatics* (R. A. Falconer, B. Lin, E. L. Harris et C. A. M. E. Wilson, édés.), vol. 1: Model Development and Data Management, p. 277–282, IWA, Cardiff, U.K. 189
- ROMANOWICZ, R. J. et BEVEN, K. J. (2003), Estimation of flood inundation probabilities as conditioned on event inundation maps. *Water Resources Research*, vol. 39, n° 3, p. 1073–1086. 77, 195
- ROMANOWICZ, R. J., BEVEN, K. J. et TAWN, J. (1996), Bayesian calibration of flood inundation models. Dans : *Floodplain Processes* (M. G. Anderson, D. E. Walling et P. D. Bates, édés.), p. 333–360, Wiley, Chichester, U.K. 77
- ROSENBROCK, H. H. (1960), An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *The Computer Journal*, vol. 3, n° 3, p. 175–184. 75
- ROSSMAN, L. A. (1997), Environmental engineering forum: When has a model been sufficiently calibrated and tested to be put in efficient use? *Journal of Environmental Engineering*, vol. 123, n° 11, p. 1070–1071. xvii
- ROUSE, H. (1965), Critical analysis of open-channel resistance. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 91, n° 4, p. 1–25. 36, 37, 262, 263
- ROZENBLIT, J. W. et JANKOWSKI, P. L. (1991), An integrated framework for knowledge-based modeling and simulation of natural systems (water quality). *Simulation*, vol. 57, n° 3, p. 152–165. 123
- RUYSCHAERT, F. (2005), *Modélisation des flux associés aux rejets urbains en temps de pluie et de leur devenir dans le contexte d'une petite rivière périurbaine*. Thèse de doctorat, ENGREF, Lyon, France. 91
- SABLANI, S. S., SHAYYA, W. H. et PRASHER, S. O. (2000), An artificial neural network model for non-iterative calculation of the friction coefficient in open channel flow. *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 16, n° 2, p. 191–196. 264
- SAFEGE (2000), Étude hydraulique et d'aménagement de l'Hogneau : Compréhension des phénomènes de débordement – Propositions de solutions d'aménagements. *Rap. tech.*, Communauté de communes de la vallée de l'Escaut. 172
- SALOMON, P. (2000), Fiabilité des données topographiques et bathymétriques pour les calculs d'hydraulique. *Note technique*, CETMEF, CETE Normandie Centre, France. 43
- SAMANI, H. M. V. et SHAMSIPOUR, G. (2004), Hydrologic flood routing in branched river systems via nonlinear optimization. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 42, n° 1, p. 55–59. 71
- SAMUELS, P. G. (1990), Cross-section location in 1-D models. Dans : *International Conference on River Flood Hydraulics* (W. R. White, éd.), p. 339–350, HR Wallingford, Wiley, Wallingford, U.K. 42
- SANCHEZ, D. et WESTPHAL, J. A. (1999), Optimized calibration for unsteady flow modeling using a genetic algorithm. Dans : *WRPMD 1999 26th Annual Water Resources Planning and Management Conference* (E. M. Wilson, éd.), vol. 102, p. 22, ASCE, Tempe, Arizona, USA. 75

- SARGENT, R. G. (1979), Variation of Manning's  $n$  roughness coefficient with flow in open river channels. *Journal of the Institution of Water Engineers and Scientists*, vol. 33, n° 3, p. 290–294. 63, 64
- SARGENT, R. G. (1984), A tutorial on verification and validation of simulation models. Dans : *Proceedings of the 1984 Winter Simulation Conference* (S. Sheppard, U. Pooch et D. Pegden, édés.), p. 115–122, Piscataway IEEE, New Jersey, Dallas, Texas. 4, 5, 6, 11, 12, 13, 194, 201
- SARGENT, R. G. (1986), An exploration of possibilities for expert aids in model validation. Dans : *Modelling and Simulation Methodology in the Artificial Intelligence Era* (M. S. Elzas, T. I. Ören et B. P. Zeigler, édés.), chap. V.2, p. 279–298, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands. 123
- SARGENT, R. G. (1996), Some subjective validation methods using graphical displays of data. Dans : *Proceedings of the 1996 Winter Simulation Conference* (J. M. Charnes, D. J. Morrice, D. T. Brunner et J. J. Swain, édés.), p. 345–351. 167
- SARGENT, R. G. (1999), Validation and verification of simulation models. Dans : *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference* (P. Farrington, D. Nembhard, D. Sturrock et G. Evans, édés.), Informs College on Simulation, Phoenix, Arizona. 5
- SARGENT, R. G. (2000), Validation, verification and accreditation of simulation models. Dans : *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*, Informs College on Simulation, Arlington, Virginia. 5
- SARGENT, R. G. (2001), Some approaches and paradigms for verifying and validating simulation models. Dans : *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference* (B. A. Peters, J. S. Smith, D. J. Medeiros et M. W. Rohrer, édés.), Informs College on Simulation, Arlington, Virginia. 5, 194
- SATKOWSKI, R., LUND, J., MOREL-SEYTOUX, H., NELSON, A. et ROEFS, T. (2000), Modeling Protocols for Water & Environmental Modeling. *Bay-Delta Modeling Forum BDMF 2000-01*, California Water & Environmental Modeling Forum. 14
- SCHAFFRANEK, R. W. et LAI, C. (1996), Friction-term response to boundary-condition type in flow models. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 122, n° 2, p. 73–81. 262
- SCHLESINGER, S., CROSBIE, R. E., GAGNÉ, R. E., INNIS, G. S., LALWANI, C. S., LOCH, J., SYLVESTER, R. J., WRIGHT, R. D., KHEIR, N. et BARTOS, D. (1979), Terminology for model credibility. *Simulation*, vol. 32, n° 3, p. 103–104. 5, 7, 12, 13, 123, 167, 197
- SCHLICHTING, H. (1979), *Boundary Layer Theory*. Classic TextBook Reissue Series, McGraw-Hill, New-York, 7<sup>e</sup> éd. 263
- SCHNEIDER, V. R., BOARD, J. W., COLSON, B. E., LEE, F. N. et DRUFFEL, L. (1977), Computation of backwater and discharge at width constrictions of heavily vegetated flood plains. *Water-Resources Investigation Report 76-129*, US Geological Survey. 56
- SCHOLTEN, H. (1994), Quality assurance of the simulation modeling process. Dans : *Proceedings of the European Simulation Symposium Istanbul – ESS'94* (A. R. Kaylan, A. Lehmann et T. I. Ören, édés.), p. 85–89, The Society for Computer Simulation International, Istanbul, Turkey. 13
- SCHOLTEN, H. (2001), An ontological approach in quality assessment of modelling and simulation. Dans : *EUROSIM 2001, Shaping future with simulation, The 4th International EUROSIM Congress* (A. W. Heemink, L. Dekker, H. d. S. Arons, I. Smit et T. L. v. Stijn, édés.), Delft, The Netherlands. 96
- SCHOLTEN, H. et BEULENS, A. J. M. (2002), Ontologies to structure models and modeling tasks. Dans : *Proceedings of the 16th JISR-IIASA Workshop on methodologies and tools for complex system modeling and integrated policy assessment* (M. Makowski, éd.), Laxenburg, Austria. 96
- SCHOLTEN, H. et GROOT, S. (2002), Dutch guidelines. Dans : *HarmoniQUA – State-of-the-Art Report on Quality Assurance in Modelling Related to River Basin Management* (J. C. Refsgaard, éd.), chap. 12, HarmoniQUA. 14
- SCHOLTEN, H., REFGAARD, J. C. et KASSAHUN, A. (2004), Structuring multidisciplinary knowledge for model based water management: The HARMONIQUA approach. Dans : *Complexity*



- and Integrated Ressources Management, *Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society, iEMMSs* (C. Pahl-Wostl, S. Schmidt, A. E. Rizzoli et A. J. Jakeman, éd.), iEMMSs, Manno, Switzerland. 14, 15, 96
- SCHOLTEN, H. et UDINK TEN CATE, A. J. (1995), Testing simulation modeling quality. Dans : *Proceeding of the first IMACS Symposium on Mathematical Modelling and Simulation in Agriculture and Bio-Industries*, vol. 1, II.A.3.1-6, International Association for Mathematics and Computers in Simulation / International Federation of Automatic Control, Brussels, Belgium. 13
- SCHOLTEN, H. et UDINK TEN CATE, A. J. (1999), Quality assessment of the simulation modeling process. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 22, n° 2-3, p. 199–208. 13, 15, 20
- SCHOLTEN, H., VAN WAVEREN, R. H., GROOT, S., VAN GEER, F. C., WÖSTEN, J. H. M., KOEZE, R. D. et NOORT, J. J. (2000), Good modelling practice in water management. Dans : *Hydroinformatics'2000 – Proceedings of the 4th International Conference on Hydroinformatics*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Cedar Rapids, Iowa. 14
- SCHOLTEN, H., VAN WAVEREN, R. H., GROOT, S., VAN GEER, F. C., WÖSTEN, J. H. M., KOEZE, R. D. et NOORT, J. J. (2001), Improving the quality of model-based decision support: Good modelling practice in water management. Dans : *Regional Management of Water Resources – Proceedings of symposium S2 held during the sixth IAHS Scientific Assembly* (A. Schumman, J. Xia, M. Marino et D. Rosbjerg, éd.), vol. 268, p. 223–230, International Association of Hydrological Sciences, IAHS Publications, Maastricht, The Netherlands. 7, 14
- SCHREIBER, G., AKKERMANS, H., ANJEWIERDEN, A., DE HOOG, R., SHADBOLT, N., VAN DE VELDE, W. et WIELINGA, B. J. (1999), *Knowledge Engineering and Management – The COMMONKADS Methodology*. MIT Press, Cambridge, Massachussets. 85
- SCHRUBEN, L. W. (1980), Establishing the credibility of simulations. *Simulation*, vol. 34, n° 3, p. 101–105. 123
- SCOBAY, F. C. (1933), *The Flow of Water in Flumes*, vol. 393 de *Technical Bulletin*. US Department of Agriculture, Washington, DC. 55, 57, 69
- SCOBAY, F. C. (1939), *The Flow of Water in Irrigation and Similar Canals*, vol. 652 de *Technical Bulletin*. US Department of Agriculture, Washington, D.C. 55, 57, 69
- SCOT–GEOSPFAIR (2000), Cartographie des laisses de crue – Crues du 1-12 juin 2000 sur le bassin supérieur de la Garonne – Vallées de la Garonne, de l'Ariège, de la Lèze, de l'Arize, de la Save. *Rapport final 2.0*, DIREN Midi-Pyrénées. 157
- SEED, D. J., SAMUELS, P. G. et RAMSBOTTOM, D. M. (1993), Quality assurance in computational river modelling. *First Interim Report SR374*, HR Wallingford. 13
- SHEKHAR, C., MOISAN, S. et THONNAT, M. (1994), Use of a real-time perception program supervisor in a driving scenario. Dans : *Intelligent Vehicle Symposium '94*, Paris, France. 126
- SHENG, G., ELZAS, M. S., ÖREN, T. I. et CRONHJORT, B. T. (1993), Model validation: a systemic and systematic approach. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 42, n° 2-3, p. 247–259. 4, 12
- SIMONOVIC, S. P. (1991), Knowledge-based systems and operational hydrology. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 18, n° 1, p. 1–11. xix
- SMART, G. (2004), An improved flow resistance formula. Dans : *River Flow 2004 – Proceedings of the Second International Conference on Fluvial Hydraulics* (M. Greco, A. Carravetta et R. D. Morte, éd.), vol. 1, p. 259–263, Balkema, Napoli, Italy. 57
- SMART, G. M., DUNCAN, M. J. et WALSH, J. M. (2002), Relatively rough flow resistance equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, n° 6, p. 568–578. 57
- SOGREAH (1996), Étude des zones inondables et diagnostic environnemental de la Lèze – Volet 1 : Étude des zones inondables. *Rap. tech.*, Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique de la Lèze & Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Haute-Garonne. 152, 157
- SOGREAH (1997), Étude des zones inondables et diagnostic environnemental de la Lèze – Volet 2 : Propositions d'objectifs d'aménagements. *Rap. tech.*, Syndicat Intercommunal d'Aména-

- gement Hydraulique de la Lèze & Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Haute-Garonne. 152
- SOGREAH (1998), Étude des zones inondables et diagnostic environnemental de la Lèze – Définition des aménagements. *Rap. tech.*, Syndicat Intercommunal d'Aménagement Hydraulique de la Lèze & Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt de Haute-Garonne. 152
- SOONG, D. T., HALFAR, T. M., JUPIN, M. A. et WOBIG, L. A. (2004), Mannings's roughness coefficients for Illinois streams. Web <http://il.water.usgs.gov/proj/nvalues/68>
- STAFFER (1869), Sur l'usage des formules des M. Gauckler et de Prony, relatives au mouvement de l'eau dans les canaux découverts. Dans : *Annales des Ponts et Chaussées – Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur ; lois, décrets arrêtés et autres actes concernant l'administration des ponts et chaussées – 4<sup>ème</sup> série – 2<sup>ème</sup> semestre*, vol. 18, p. 51–64, Dunod, Paris, France. 260
- STEWART, M. D., BATES, P. D., ANDERSON, M. G., PRICE, D. A. et BURT, T. P. (1999), Modelling floods in hydrologically complex lowland river reaches. *Journal of Hydrology*, vol. 223, n° 1-2, p. 85–106. 45
- SUMNER, N. R., FLEMING, P. M. et BATES, B. C. (1997), Calibration of a modified SFB model for twenty-five Australian catchments using simulated annealing. *Journal of Hydrology*, vol. 197, n° 1-4, p. 166–188. 186
- SYED MUSTAPHA, M. F. D. S., PHILLIPS, T. N., PRICE, C. J., MOSELEY, L. G. et JONES, T. E. R. (1999), Viscometric flow interpretation using qualitative and quantitative techniques. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 12, n° 3, p. 255–272. 167
- TARDY, P. (2003), *Développement du logiciel AMOv2*. Rapport de stage de deuxième année, ISIMA, Clermont-Ferrand, France. 95, 124, 192, 271
- TATE, E. C., MAIDMENT, D. R., OLIVERA, F. et ANDERSON, D. J. (2002), Creating a terrain model for floodplain mapping. *Journal of Hydrologic Engineering*, vol. 7, n° 2, p. 100–108. 42
- TEKATLIAN, A. (2001a), Catalogue de techniques d'acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques. *Rap. tech.*, Centre d'Études Techniques, Maritimes et Fluviales. 42
- TEKATLIAN, A. (2001b), Étude de sensibilité des modélisation 1D – Étape 1 : Recensement et quantification des sources d'incertitudes extrêmes. *Rap. tech.*, CETMEF. 194
- THONNAT, M., CLÉMENT, V. et VAN DEN ELST, J. (1994), Supervision of perception tasks for autonomous systems: the OCAPI approach. *Journal of Information Science and Technology*, vol. 3, n° 2, p. 140–163. 126
- THONNAT, M. et MOISAN, S. (1995), Knowledge-based systems for program supervision. Dans : *First International Workshop on Knowledge Based systems for the (re)Use of Program Libraries – KBUP'95*, p. 3–8, INRIA, Sophia-Antipolis, France. 126
- THONNAT, M. et MOISAN, S. (2000), What can program supervision do for program reuse? *IEE Proceedings: Software*, vol. 147, n° 5, p. 179–185. 127
- THONNAT, M., MOISAN, S. et CRUBÉZY, M. (1999), Experience in integrating image processing programs. Dans : *Computer Vision Systems - Proceedings of the first International conference, ICVS'99* (H. I. Christensen, éd.), vol. 1542 de *Lecture Notes in Computer Science*, p. 200–215, Springer, Las Palmas, Spain. 127, 195
- TRAVER, R. G. et MILLER, A. C. (1993), Open-channel interpolation of cross-sectional properties. *Water Resources Bulletin*, vol. 29, n° 5, p. 767–776. 43
- TSANG, C.-F. (1991), The modeling process and model validation. *Ground Water*, vol. 29, n° 6, p. 825–831. 7, 11
- TSANG, C.-F. (1992a), Reply to the discussion about “The modeling process and model validation”. *Ground Water*, vol. 30, n° 2, p. 277. 11
- TSANG, C.-F. (1992b), Reply to the discussion about “The modeling process and model validation”. *Ground Water*, vol. 30, n° 4, p. 623–624. 11

- TURING, A. (1950), Computer machinery and intelligence. *Mind*, vol. 59, n° 236, p. 433–460. 191
- TYAGI, A. et HAAN, C. T. (2001), Uncertainty analysis using corrected first-order approximation method. *Water Resources Research*, vol. 37, n° 6, p. 1847–1858. 66
- ÜNDEY, C., TATARA, E. et ÇINAR, A. (2003), Real-time batch process supervision by integrated knowledge-based systems and multivariate statistical methods. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 16, n° 5-6, p. 555–566. 167
- USACE (1993), River hydraulics. *Engineer Manual 1110-2-1416*, US Army Corps of Engineers, Washington, D.C. 23, 89
- VAN DEN ELST, J. (1996), *Modélisation de connaissances pour le pilotage de programmes de traitement d'images*. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, Nice, France. 127, 195
- VAN DEN ELST, J., VAN HARMELEN, F., SCHREIBER, G. et THONNAT, M. (1994), A functional specification of reusing software components. Dans : *Sixth International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering*, p. 374–381, Knowledge Systems Institute, Jurmala, Latvia. 125
- VAN DEN ELST, J., VAN HARMELEN, F. et THONNAT, M. (1995), Modelling software components for reuse. Dans : *Seventh International Conference on Software Engineering and Knowledge Engineering (SEKE95)*, p. 350–357, Knowledge Systems Institute, Rockville, Maryland. 126
- VAN DER WAL, T. et VAN ELSWIJK, M. J. B. (2000), Generic framework for hydro-environmental modelling. Dans : *Hydroinformatics'2000 – Proceedings of the 4th International Conference on Hydroinformatics*, Iowa Institute of Hydraulic Research, Cedar Rapids, Iowa. 14
- VAN WAVEREN, R. H., GROOT, S., SCHOLTEN, H., VAN GEER, F., WÖSTEN, J. H. M., KOEZE, R. D. et NOORT, J. J. (1999), Good Modelling Practice Handbook. *STOWA Report 99-05*, RWS-RIZA, Utrecht, The Netherlands. 14, 111
- VAN ZUYLEN, H. J. (1993), From scientific computation to decision support. *Knowledge-Based Systems*, vol. 6, n° 1, p. 3–10. 123, 124
- VAN ZUYLEN, H. J. (1994), Knowledge based support of users of numerical programs. *Mathematics and Computers in Simulation*, vol. 36, n° 4-6, p. 327–336. 20
- VANN, A. M. et DAVIS, J. P. (1994), A shape recognition technique for hydraulic applications. Dans : *Hydroinformatics'94 – Proceedings of the First International Conference on Hydroinformatics* (A. Verwey, A. W. Minns, V. Babović et Č. Maksimović, eds.), vol. 2, p. 699–708, IHE-Delft, Balkema, Delft, The Netherlands. 167
- VARADO, N. (2004), *Contribution au développement d'une modélisation hydrologique distribuée – Application au bassin versant de la Donga, au Bénin*. Thèse de doctorat, spécialité : Mécanique des milieux géophysiques et environnement, Institut National Polytechnique de Grenoble. 91
- VAUTHIER, P. (1836), De la théorie du mouvement permanent des eaux courantes et de ses applications à la solution de plusieurs problèmes d'hydraulique. Dans : *Annales des Ponts et Chaussées – Mémoires et documents relatifs à l'art des constructions et au service de l'ingénieur ; lois, ordonnances et autres actes concernant l'administration des ponts et chaussées – Première série – 6<sup>ème</sup> année – 1<sup>er</sup> semestre*, vol. 1, p. 241–313, Carilian-Goeury, Paris, France. 262
- VIDAL, J.-P. (2004), La prévention des inondations, entre savoir et savoir-faire. *Le Gluon, journal de vulgarisation scientifique de l'université Joseph Fourier*, n° 19, p. 1–2. xix
- VIDAL, J.-P., FAURE, J.-B., MOISAN, S. et DARTUS, D. (2004), Decision support system for calibration of 1-D river models. Dans : *Proceedings of the 6th International Conference on Hydroinformatics* (S. Y. Liong, K.-K. Phoon et V. M. Babović, eds.), vol. 2, p. 1067–1074, World Scientific Publishing, Singapore. 171
- VIDAL, J.-P. et MOISAN, S. (2004), Opérationnalisation de connaissances pour le calage de modèles numériques – Application en hydraulique fluviale. Dans : *Actes des 15<sup>èmes</sup> journées francophones sur l'Ingénierie des Connaissances (IC'2004)*, p. 261–272, Presses Universitaires de Grenoble, Lyon, France. 81

- VIDAL, J.-P., MOISAN, S. et FAURE, J.-B. (2003), Knowledge-based hydraulic model calibration. Dans : *KES'2003 – Proceedings of the seventh International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems* (V. Palade, R. J. Howlett et L. C. Jain, éd.), vol. 2773 de *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, p. 676–683, Springer, Oxford, U.K. 81
- VIDAL, J.-P., MOISAN, S., FAURE, J.-B. et DARTUS, D. (2005), Towards a reasoned 1-D river model calibration. *Journal of Hydroinformatics*, *Sous presse*. 23, 121
- VINCENT, R., MOISAN, S. et THONNAT, M. (1996), Une bibliothèque pour des moteurs de pilotage de programmes. *Rapport de recherche 3011*, INRIA. 127
- VINCENT, R., THONNAT, M. et OSSOLA, J.-C. (1997), Program supervision for automatic galaxy classification. Dans : *Proceedings of the International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology (CISST'97)* (H. R. Arabnia, éd.), CSREA Press, Las Vegas, Nevada. 130
- VISCHER, D. L. (1987), Strickler formula, a Swiss contribution to hydraulics – A short note on the 100th anniversary of Strickler's birth. *Wasser, Energie, Luft*, vol. 79, n° 7/8, p. 139–142. 35, 59, 61, 261
- VON BERTALANFFY, L. (1993), *Théorie générale des systèmes*. Dunod, Paris, France. 76
- WAGNER, R. A. et FISCHER, M. J. (1974), The string-to-string correction problem. *Journal of the Association for Computing Machinery*, vol. 21, n° 1, p. 168–173. 168
- WALLIS, S. G. et KNIGHT, D. W. (1984), Calibration studies concerning a one-dimensional numerical tidal model with particular reference to resistance-coefficients. *Estuarine, Coastal and Shelf science*, vol. 19, n° 5, p. 541–562. 63, 74
- WALSKI, T. M. (1998), Environmental engineering forum: Model calibration forum paper discussion. *Journal of Environmental Engineering*, vol. 124, n° 1, p. 3. xvii
- WASANTHA LAL, A. M. (1995), Calibration of river bed roughness. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 121, n° 9, p. 664–671. 10
- WEISBACH, J. A. (1847), *Principles of the Mechanics of Machinery and Engineering – Volume 1: Theoretical Mechanics*, vol. 2 de *Library of Illustrated Standard Scientific Works*. Hippolyte Bailliere, London, U.K. 256
- WERNER, M., BLAZKOVA, S. et PETR, J. (2004), Value of data in reducing uncertainties in inundation modelling. Dans : *Proceedings of the Sixth International Conference on Hydroinformatics* (S. Y. Liong, K.-K. Phoon et V. M. Babović, éd.), vol. 2, p. 1745–1752, World Scientific Publishing Company, Singapore. 195
- WHITTEMORE, R. (2001), Is the time right for consensus on model calibration guidance? *Journal of Environmental Engineering*, vol. 127, n° 2, p. 95–96. xvii
- WILLIAMS, D. T. et JULIEN, P. Y. (1991), Examination of stage-discharge relationships of compound/composite channels. Dans : *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula* (B. C. Yen, éd.), p. 341–355, Water Resources Publications, Littleton, Colorado. 41
- WILLIAMS, G. P. (1970), Manning formula—A misnomer? *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 96, n° 1, p. 193–200. 261
- WILLIAMS, M. D., GORMAN, E. C. et SHIVA, S. G. (1996), Design of a knowledge-based simulation environment. *Simulation*, vol. 67, n° 2, p. 121–135. 123
- WILSON, L., GHATAN, G. J., HEAD, J. W. III. et MITCHELL, K. L. (2004), Mars outflow channels: A reappraisal of the estimation of water flow velocities from water depths, regional slopes, and channel floor properties. *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, n° E9, E09003. 196
- WORMLEATON, P. R. et KARMEGAM, M. (1980), Model parameter identification for flood routing in natural networks. Dans : *International Conference in Water resources development*, p. 681–689, Asian and Pacific Division of the International Association for Hydraulic Research, Taipei, Taiwan. 73
- WORMLEATON, P. R. et KARMEGAM, M. (1984), Parameter optimization in flood routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 110, n° 12, p. 1799–1814. 73
- XIA, R. J. et YEN, B. C. (1994), Significance of averaging coefficients in open-channel flow equations. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 120, n° 2, p. 169–190. 53

- YEH, K.-C. et TUNG, Y.-K. (1993), Uncertainty and sensitivity analyses of pit-migration model. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 119, n° 2, p. 262–283. 66
- YEH, W. W.-G. et BECKER, L. (1973), Linear programming and channel flow identification. *Journal of the Hydraulics Division*, vol. 99, n° 11, p. 2013–2021. 74
- YEN, B. C. (1973), Open-channel flow equations revisited. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, vol. 99, n° 5, p. 979–1009. 53
- YEN, B. C. (1991a), *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado. 261
- YEN, B. C. (1991b), Hydraulic resistance in open channels. Dans: *Channel Flow Resistance: Centennial of Manning's Formula* (B. C. Yen, éd.), p. 1–135, Water Resources Publications, Littleton, Colorado. 30, 63
- YEN, B. C. (1992), Dimensionally homogeneous Manning's formula. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 118, n° 9, p. 1326–1332. 35
- YEN, B. C. (1993), Closure to "Dimensionally homogeneous Manning's formula". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 119, n° 12, p. 1443–1445. 35
- YEN, B. C. (1995), Discussion about "Criteria for evaluation of watershed models". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 121, n° 1, p. 130–131. 21
- YEN, B. C. (1999), Discussion about "Identification problem of open-channel friction parameters". *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 125, n° 5, p. 552–553. 53
- YEN, B. C. (2002), Open channel flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 128, n° 1, p. 20–39. 30, 35, 36
- YOON, J. et PADMANABHAN, G. (1993), Parameter estimation of linear and nonlinear Muskingum models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 119, n° 5, p. 600–610. 71
- ZADEH, L. A. (1965), Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8, p. 338–353. 167
- ZEIGLER, B. P., ROZENBLIT, J. W. et CHRISTENSEN, E. R. (1991), Reducing the validation bottleneck with a knowledge-based, distributed simulation environment. *Expert Systems with Applications*, vol. 3, n° 3, p. 329–342. 123

# Annexes



## Annexe A

# Abréviations et notations

<i>Abréviation</i>	<i>Terme</i>
AIRH	Association International de Recherche Hydraulique
ASCE	<i>American Society of Civil Engineers</i>
CETMEF	Centre d'Études Techniques Maritimes et Fluviale
CML	<i>Conceptual Modeling Language</i>
DHI	<i>Danish Hydraulic Institute</i>
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
IA	Intelligence Artificielle
IAHR	<i>International Association of Hydraulic Research</i>
IMFT	Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et Automatique
LARIA	Laboratoire de Recherche en Informatique d'Amiens
OCL	<i>Object Constraint Language</i>
SADT	<i>Structured Analysis and Design Technique</i>
UML	<i>Unified Modeling Language</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

TAB. A.1 – Sigles et abréviations utilisés dans le document.



<i>Symbole</i>	<i>Signification</i>	<i>Dimension</i>
A	Section mouillée	m <sup>2</sup>
B	Largeur au miroir	m
C	Coefficient de Chézy	m <sup>1/2</sup> .s <sup>-1</sup>
<b>C</b>	Forme de la section	
D	Diamètre d'une conduite	m
f	Coefficient de Darcy-Weisbach	–
$\mathcal{F}$	Nombre de Froude défini par $\mathcal{F} = \frac{V}{\sqrt{g h}}$	–
g	Accélération de la pesanteur = 9,81	m.s <sup>-2</sup>
h ou y	Hauteur d'eau	m
H	Charge hydraulique	m
K	Débitance	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
$\mathcal{K}$	Rugosité relative définie par $\mathcal{K} = \frac{k_s}{R}$	–
k <sub>s</sub>	Rugosité équivalente	m
K <sub>s</sub>	Coefficient de Strickler	m <sup>1/3</sup> .s <sup>-1</sup>
L	Largeur d'un déversoir	m
n	Coefficient de Manning	s.m <sup>-1/3</sup>
<b>N</b>	Irrégularité du canal en profil et en plan	
P	Périmètre mouillé	m
q	Débit linéique d'apport latéral	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
Q	Débit	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>
R	Rayon hydraulique défini par $R = \frac{A}{P}$	m
$\mathcal{R}$	Nombre de Reynolds d'un écoulement à surface libre défini par $\mathcal{R} = \frac{RV}{\nu}$	–
$\mathcal{R}_p$	Nombre de Reynolds d'un écoulement en conduite défini par $\mathcal{R}_p = \frac{DV}{\nu}$	–
S	Pente de la ligne d'eau	m.m <sup>-1</sup>
S <sub>f</sub>	Pente de la ligne d'énergie définie par $S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2$	m.m <sup>-1</sup>
<b>U</b>	Variabilité temporelle de l'écoulement	
V	Vitesse moyenne définie par $V = \frac{Q}{A}$	m.s <sup>-1</sup>
V <sub>f</sub>	Vitesse de frottement définie par $V_f = \sqrt{g R S}$	m.s <sup>-1</sup>
x	Variable générique (hauteur d'eau, débit, rayon hydraulique, section mouillée etc.)	[x]
$\bar{x}$	Moyenne temporelle de la variable x	[x]
x <sub>c</sub>	Valeur de la variable x en lit mineur ( <i>main channel</i> )	[x]
x <sub>f</sub>	Valeur de la variable x en lit majeur ( <i>flood plain</i> )	[x]
x <sub>c</sub> <sup>i</sup>	i <sup>e</sup> valeur calculée de la variable x	[x]
x <sub>o</sub> <sup>i</sup>	i <sup>e</sup> valeur observée de la variable x	[x]
z	Cote de la surface	m
β	Coefficient de Boussinesq	–

TAB. A.2 – Conventions de notations utilisées dans le document. Sauf indication contraire, toutes les formules énoncées dans ce document utilisent les unités du Système International (S.I.). Les notations spécifiques à certaines formules sont explicitées dans le texte.

## Annexe B

# Formalisme graphique UML

Cette annexe se veut être une rapide introduction à la notation graphique UML utilisée tout au long de ce mémoire. Ce formalisme, décrit dans les spécifications du langage (OMG, 2003, chap. 3), est présenté de façon très claire dans l'ouvrage de Muller et Gaertner (2000, chap. 3). Les diagrammes présents dans ce mémoire ont été tracés à l'aide du logiciel OBJECTEERING<sup>1</sup> (Objecteering Software, 2004). Les principaux types de diagrammes de cette notation sont détaillés dans les sections suivantes par l'intermédiaire d'exemples. Ceux-ci ne prétendent pas constituer une véritable modélisation et ne sont livrés ici qu'à titre d'illustration.

### B.1 Diagrammes de classes

Les diagrammes de classes permettent de représenter les différents types d'éléments étudiés et les relations les liant les uns aux autres. La figure B.1 propose un exemple d'un tel diagramme.

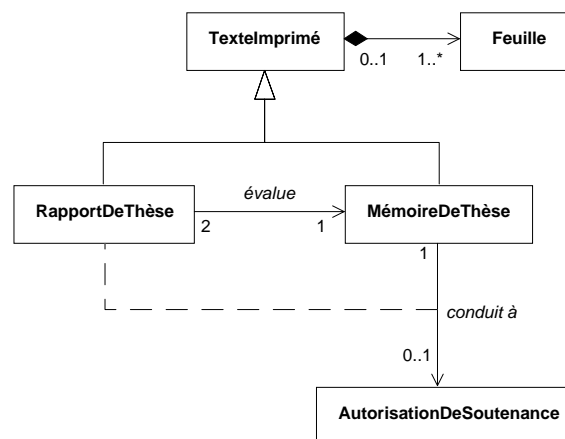


FIG. B.1 – Exemple de diagramme de classes UML.

Les encadrés représentent des *classes* d'éléments. La flèche triangulaire désigne une relation de généralisation du type « *est un* » : un *MémoireDeThèse* est un *TextelImprimé*, tout comme un *RapportDeThèse*. Une flèche simple désigne une association binaire, et

1. Téléchargeable sur [www.objecteering.com](http://www.objecteering.com).

les nombres à chacune de ses extrémités désignent la multiplicité des éléments associés : 2 RapportsDeThèse *évaluent* 1 MémoireDeThèse. Un trait tireté reliant une classe à une association désigne une *classe-association* : un MémoireDeThèse *conduit* à une AutorisationDeSoutenance – ou non – par l'intermédiaire d'un RapportDeThèse. Enfin, une flèche avec un diamant noir désigne une relation de composition : un TextImprimé est composé d'une Feuille ou plus.

## B.2 Diagrammes d'activités

Les diagrammes d'activités permettent de représenter une structure de *tâches*, ainsi que les *flux d'objets* utilisés et produits par les différentes tâches. La figure B.2 propose un exemple d'un tel diagramme.

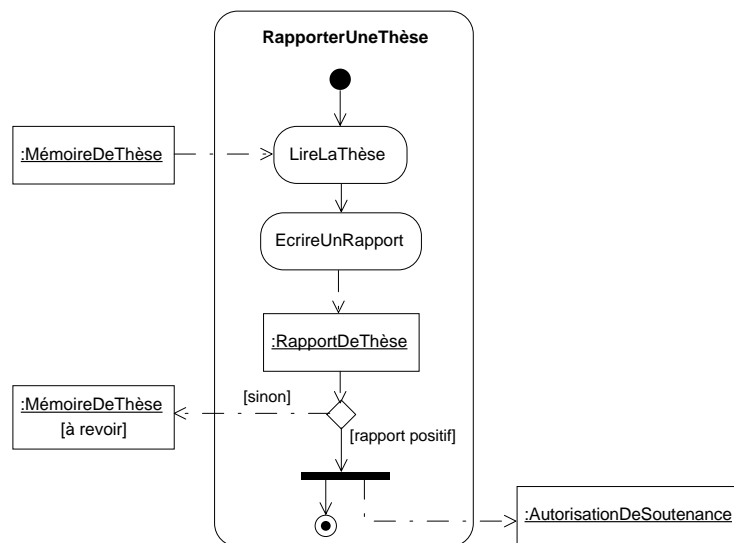


FIG. B.2 – Exemple de diagramme d'activités UML.

Les encadrés au contenu souligné représentent des *instances anonymes* de classes, classes déclarées par ailleurs dans un diagramme de classes. Ces instances anonymes représentent un objet donné quelconque appartenant à la classe considérée. Dans ce diagramme, on peut ainsi retrouver des instances des classes MémoireDeThèse, RapportDeThèse et AutorisationDeSoutenance définies dans la figure B.1. Les encadrés arrondis représentent les *activités* – ou tâches – et les disques désignent le début (disque noir plein) et la fin (disque noir et blanc) de l'activité RapporterUneThèse. Les flèches désignent des flux d'objets, et le losange représente un *choix*. La barre épaisse noire désigne une synchronisation d'événements : l'activité RapporterUneThèse s'achève en même temps qu'est produite une AutorisationDeSoutenance. On peut voir sur ce diagramme que cette activité se décompose en deux activités principales : LireLaThèse et EcrireUnRapport.

## B.3 Diagrammes de cas d'utilisation

Les diagrammes de cas d'utilisation permettent de représenter un système et les cas d'utilisation de celui-ci par différents acteurs. La figure B.3 propose un exemple d'un tel

diagramme. L'encadré représente un système, ici le manuscrit de Thèse. Deux acteurs – ou plutôt deux *rôles* – représentés par des personnages schématisés interviennent sur ce système : Doctorant et Rapporteur. Les encadrés ovales représentent des cas d'utilisation du système. Un Doctorant Rédige un manuscrit, et un Rapporteur l'Évalue.

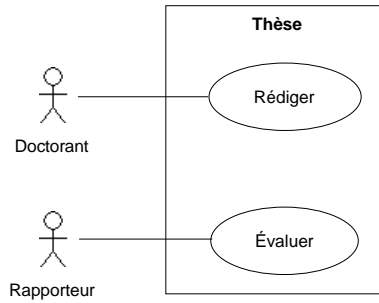


FIG. B.3 – Exemple de diagramme de cas d'utilisation UML.



## Annexe C

# Méthode de mesure directe du coefficient $n$ de Manning

Cette annexe vise à décrire la méthode utilisée dans la littérature pour déterminer une valeur du coefficient  $n$  de Manning à partir de mesures de terrain de plusieurs variables hydrauliques. Cette méthode est décrite précisément par Dalrymple et Benson (1967) et reprise notamment par Barnes (1967) et Hicks et Mason (1998), mais il nous a semblé utile de la faire figurer explicitement dans ce mémoire. Cette initiative participe en effet de l'établissement d'un « code de bonnes pratiques » pour le calage en hydraulique fluviale.

### C.1 Choix du tronçon et des conditions hydrauliques

Le tronçon concerné par les mesures de terrain doit satisfaire à de nombreuses conditions pour assurer la validité de la méthode. Celles-ci sont rappelées ci-dessous :

- le tronçon doit être le plus uniforme possible en évitant les changements de forme de la section en travers ;
- le tronçon doit être de préférence rectiligne, ou à défaut se rétrécissant. Les tronçons en phase d'élargissement sont à éviter ;
- le tronçon ne doit pas comporter de méandres ou des courbures trop prononcées. Cette condition ainsi que les précédentes vise à permettre de mesurer un coefficient de résistance qui soit le plus proche possible d'un coefficient de frottement, du uniquement à la nature du sol et à la végétation ;
- la distribution des vitesses dans les sections limites du tronçon ne doit pas être influencée par des facteurs extérieurs (singularités, etc.) pour assurer l'homogénéité – mais pas l'égalité – de la débitance tout au long du tronçon ;
- la longueur  $L$  du tronçon doit satisfaire l'un au moins des critères suivants :
  - longueur supérieure à 75 fois la profondeur d'eau moyenne sur le tronçon,
  - différence de niveau totale supérieure à l'énergie cinétique moyenne sur le tronçon,
  - différence de niveau totale supérieure à 15 cm.

## C.2 Mesure des variables hydrauliques

En plus du débit  $Q$  de l'écoulement, les variables hydrauliques requises sont :

- la hauteur d'eau  $h$  ;
- la section mouillée  $A$  ;
- le périmètre mouillé  $P$ , ou à défaut la hauteur moyenne  $h_{\text{moy}}$  sur la section <sup>1</sup>.

Ces variables doivent être mesurées dans *au minimum* trois sections différentes sur le tronçon. Considérant la mesure pratique de ces variables et l'emplacement des sections en travers, on pourra se référer aux indications de Benson et Dalrymple (1967).

Ces mesures doivent être impérativement réalisées dans des conditions hydrauliques proches – mais inférieures – au débordement pour prendre en compte la résistance totale du lit mineur.

## C.3 Équation de conservation de l'énergie

En écrivant la conservation de l'énergie entre deux sections en travers indicées 1 (amont) et 2 (aval) séparées d'une distance  $L_{1 \rightarrow 2}$ , on obtient :

$$h_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + L_{1 \rightarrow 2} S_f + k_{1 \rightarrow 2} \left( \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} - \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (\text{C.1})$$

Le coefficient  $\alpha$  est considéré comme égal à 1. Le coefficient  $k$  est pris égal à 0 pour un tronçon se rétrécissant et égal à 0,5 pour un tronçon s'élargissant.

## C.4 Formule entre deux sections

En exprimant la pente de la ligne d'énergie à l'aide de la moyenne géométrique des débitances des deux sections, et en exprimant celles-ci avec la formule de Manning, on obtient :

$$S_f = \frac{Q^2}{K_1 K_2} = \frac{Q^2 n^2}{(A_1 R_1^{2/3}) (A_2 R_2^{2/3})} \quad (\text{C.2})$$

En combinant les équations C.1 et C.2, on obtient une expression du coefficient  $n$  de Manning :

$$n = \frac{1}{Q} \left[ \frac{(A_1 R_1^{2/3}) (A_2 R_2^{2/3})}{L_{1 \rightarrow 2}} \left( (h_1 - h_2) + (1 - k_{1 \rightarrow 2}) \left[ \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} - \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \right] \right) \right]^{1/2} \quad (\text{C.3})$$

1. On veut calculer le rayon hydraulique, et  $R = \frac{A}{P} \simeq h_{\text{moy}}$ .

## C.5 Formule générale

Avec  $N$  sections de mesure, on peut calculer le coefficient  $n$  avec la formule suivante :

$$n = \frac{1}{Q} \left( \frac{\Delta_{1 \rightarrow N} h + \Delta_{1 \rightarrow N} h_v + \sum_{i=1}^{N-1} (k_{i \rightarrow i+1} \Delta h_{v_{i \rightarrow i+1}})}{\sum_{i=1}^{N-1} \frac{L_{i \rightarrow i+1}}{(A_i R_i^{2/3})(A_{i+1} R_{i+1}^{2/3})}} \right)^{1/2} \quad (\text{C.4})$$

où :

$$\Delta_{i \rightarrow i+1} h = h_i - h_{i+1} \quad (\text{C.5})$$

et :

$$\Delta_{i \rightarrow i+1} h_v = \alpha_i \frac{V_i^2}{2g} - \alpha_{i+1} \frac{V_{i+1}^2}{2g} \quad (\text{C.6})$$

Cette méthode a été implémentée par Jarrett et Petsch (1985) dans un logiciel dédié appelé N<sub>CALC</sub><sup>2</sup>.

---

2. Téléchargeable sur le site [water.usgs.gov/software/ncalc.html](http://water.usgs.gov/software/ncalc.html)





## Annexe D

# Tables de valeurs

Cette annexe présente différentes tables de valeurs utiles lors de l'estimation *a priori* d'une valeur du coefficient  $n$  de Manning pour un tronçon de rivière homogène par la procédure décrite dans la figure 3.4 (p. 69). La première section présente les différentes tables de valeurs des coefficients de la formule de Cowan (1956) (équation 3.1, p. 52). La deuxième section présente les tables de valeurs à utiliser avec la formule de Cowan modifiée pour les plaines d'inondation (équation 3.2, p. 54). La dernière section présente enfin des tables de valeurs du coefficient  $n$  de Manning basées sur des typologies de cours d'eau.

### D.1 Tables de valeurs pour les coefficients de la formule de Cowan : $n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m$

Matériau	Taille (mm)	$n_b$	
		min	max
Béton		0,012	0,018
Terre		0,025	0,032
Sable	1 – 2	0,026	0,035
Graviers	2 – 64	0,028	0,035
Galets	64 – 256	0,030	0,050
Blocs rocheux	> 256	0,040	0,070

TAB. D.1 – Valeurs de base du coefficient  $n$  de Manning, d'après Benson et Dalrymple (1967).

Méandrement	$m$	Longueur du lit mineur sur longueur du lit majeur
Modéré	1,00	1 – 1,2
Appréçiable	1,15	1,2 – 1,5
Important	1,30	> 1,5

TAB. D.2 – Table de valeurs pour le coefficient  $m$ .

<i>Degré d'irrégularité</i>	$n_1$		<i>Descriptif</i>
	min	max	
Parois lisses	0,000		Comparable au canal le plus lisse possible pour un matériau du lit donné
Irrégularités légères	0,001	0,005	Comparable à des canaux dragués soigneusement, dans un bon état mais avec des berges légèrement érodées ou affouillées.
Irrégularités modérés	0,006	0,010	Comparable à des canaux dragués à la rugosité modérée à conséquente et aux berges modérément dégradées ou érodées.
Irrégularités importantes	0,011	0,020	Berges de cours d'eau naturels éboulées ou sérieusement dégradées ; Parois sérieusement érodées ou éboulées de canaux de navigation ou de drainage ; surface irrégulière et non profilée de canaux creusés dans le rocher.

TAB. D.3 – *Table de valeurs pour le coefficient  $n_1$ .*

<i>Variation de la section</i>	$n_2$		<i>Descriptif</i>
	min	max	
Progressive	0,000		La taille et la forme de la section en travers changent progressivement.
Alternant occasionnellement	0,001	0,005	Grandes sections et sections réduites alternent parfois, ou bien le courant principal se déplace d'une rive à l'autre en raison des changements de la forme de la section en travers.
Alternant fréquemment	0,010	0,015	Grandes sections et sections réduites alternent fréquemment, ou bien le courant principal se déplace d'une rive à l'autre en raison des changements de forme de la section en travers.

TAB. D.4 – *Table de valeurs pour le coefficient  $n_2$ .*

<i>Effet des obstructions</i>	$n_3$		<i>Descriptif</i>
	min	max	
Négligeable	0,000	0,004	Quelques obstacles épars, incluant dépôts de débris, souches, racines apparentes, branchages, piles ou rochers isolés, occupant moins de 5% de la section mouillée.
Faible	0,005	0,015	Les obstacles occupent moins de 15% de la section mouillée, and l'espacement entre ceux-ci est tel que la sphère d'influence autour de l'un d'entre eux ne s'étend pas jusqu'à celle de l'obstacle suivant. De plus petits ajustements sont utilisés pour des objets arrondis et lisses que pour des objets anguleux.
Sensible	0,020	0,030	Les obstacles occupent de 15 à 50% de la section mouillée, ou bien l'espace entre ceux-ci est assez réduit pour provoquer le cumul des effets dus à différents obstacles, obstruant ainsi une partie équivalente de la section mouillée.
Très marqué	0,040	0,050	Les obstacles occupent plus de la moitié de la section mouillée, ou bien l'espace entre eux est assez réduit pour générer de la turbulence dans la quasi-totalité de la section.

TAB. D.5 – *Table de valeurs pour le coefficient  $n_3$ .*

Quantité de végétation	$n_4$		Descriptif
	min	max	
Négligeable	0,000		N'importe quel type et densité de végétation sur les berges de cours d'eau de plus de 30 m de large, avec moins de 25% du périmètre mouillé végétalisé et sans végétation notable sur le fond. Herbe fauchée ou vesce sur les berges de cours d'eau de plus de 15 m de large (peut s'appliquer à de plus petits cours d'eau).
Faible	0,002	0,010	Surfaces denses d'herbe souple, comme le cynodon, ou plantes aquatiques poussant là où la profondeur de l'eau atteint au moins deux fois la taille de la végétation. Arbustes souples plantés, comme le saule, le peuplier, la marante ou le cèdre maritime poussant là où la profondeur de l'eau atteint au moins trois fois la hauteur de la végétation. Buissons arbustifs denses, plantes annuelles à tige souple, et éventuellement quelques arbres matures, occupant 25 à 50% du périmètre mouillé, cela en toutes saisons sur les berges de cours d'eau larges de 30 à 75 m, et durant la morte-saison sur les berges de cours d'eau de 15 à 30 m de large.
Moyenne	0,010	0,025	Gazon poussant là où la profondeur moyenne de l'eau est de une à deux fois la taille de la végétation ; plantes racinaires modérément denses, plantes aquatiques, ou arbres plantés, poussant là où la profondeur moyenne de l'eau est de deux à trois fois la hauteur de la végétation ; Végétation modérément dense, buissonnante, comparable à des saules âgés d'un à deux ans en morte-saison, ou bien hautes herbes et plantes à tige souple en haute saison, poussant le long des berges et sans végétation notable sur le fond de cours d'eau dont le rayon hydraulique est supérieur à 60 cm. Buissons arbustifs denses, plantes annuelles à tige souple, et éventuellement quelques arbres matures, occupant 25 à 50% du périmètre mouillé sur les berges de cours d'eau de 9 à 30 m de large.
Importante	0,025	0,050	Gazon poussant là où la profondeur moyenne est environ égal à la hauteur de la végétation ; saules ou peupliers âgés de 8 à 10 ans entremêlés de mauvaises herbes et de buissons (tous sans feuillage) où le rayon hydraulique est supérieur à 60 cm ; saules buissonnants âgés d'un an entremêlés de mauvaises herbes sur les berges (feuillage complet) et pas de végétation notable sur le fond de cours d'eau où le rayon hydraulique est supérieur à 60 cm.
Très importante	0,050	0,100	Gazon poussant là où la profondeur de l'eau n'excède pas la moitié de la hauteur de la végétation ; saules buissonnants d'environ un an entremêlés de mauvaises herbes ou de buissons (feuillage complet) ou roseaux denses poussant sur le fond ; arbres entremêlés de mauvaises herbes et de buissons (feuillage complet).

TAB. D.6 – Table de valeurs pour le coefficient  $n_4$ .

## D.2 Tables de valeurs pour les coefficients de la formule de Cowan modifiée pour les plaines d'inondation : $n = n_b + n'_1 + n'_3 + n'_4$

<i>Degré d'irrégularité</i>	$n'_1$		<i>Description</i>
	min	max	
Section lisse	0,000		Comparable à la plaine d'inondation la plus lisse et plate possible avec le matériau considéré.
Irrégularités légères	0,001	0,005	Plaine d'inondation de forme légèrement irrégulière. Quelques creux et bosses ou dépressions marécageuses peuvent être visibles sur la plaine.
Irrégularités modérées	0,006	0,010	Plus de bosses et de creux. Dépressions et monticules peuvent être présents.
Irrégularités importantes	0,011	0,020	Plaines d'inondations de forme très irrégulière. De nombreux creux et bosses sont visibles. Des sols irréguliers de pâturages et des sillons perpendiculaires au courant sont aussi présents.

TAB. D.7 – Table de valeurs pour le coefficient  $n'_1$ .

<i>Effet des obstructions</i>	$n'_3$		<i>Description</i>
	min	max	
Négligeable	0,000	0,004	Quelques obstacles disséminés, incluant dépôts de débris, souches, racines apparentes, branchages, ou rochers isolés, qui occupent moins de 5% de la section mouillée
Faible	0,005	0,019	Les obstacles occupent moins de 15% de la section mouillée.
Appréciable	0,020	0,030	Les obstacles occupent de 15 à 50% de la section mouillée.

TAB. D.8 – Table de valeurs pour le coefficient  $n'_3$ .

Quantité de végétation	$n'_4$		Description
	min	max	
Faible	0,001	0,010	Surfaces denses d'herbe souple, comme le cynodon, ou plantes aquatiques poussant là où la profondeur de l'eau atteint au moins deux fois la taille de la végétation. Arbustes souples plantés, comme le saule, le peuplier, la marante ou le cèdre maritime poussant là où la profondeur de l'eau atteint au moins trois fois la hauteur de la végétation.
Moyenne	0,011	0,025	Gazon poussant là où la profondeur moyenne de l'eau et de une à deux fois la taille de la végétation ; plantes racinaires modérément denses, plantes aquatiques, ou arbres plantés, poussant là où la profondeur moyenne de l'eau est de deux à trois fois la hauteur de la végétation ; Végétation modérément dense, buissonnante, comparable à des saules âgés d'un à deux ans en morte-saison.
Importante	0,025	0,050	Gazon poussant là où la profondeur moyenne est environ égal à la hauteur de la végétation ; saules ou peupliers âgés de 8 à 10 ans entremêlés de mauvaises herbes et de buissons (tous sans feuillage) où le rayon hydraulique est supérieur à 60 cm, ou bien cultures en lignes matures comme des petits légumes, ou bien encore cultures sur pied là où la profondeur de l'eau est au moins deux fois la hauteur de la végétation.
Très impor- tante	0,050	0,100	Gazon poussant là où la profondeur de l'eau n'excède pas la moitié de la hauteur de la végétation, ou buissons denses ou modérément denses, ou bien d'importants peuplements d'arbres avec quelques arbres tombés et quelques broussailles là où la profondeur de l'eau est inférieur aux première branches, ou récoltes sur pied là où la profondeur de l'eau est au moins deux fois la hauteur de la végétation.
Extrême	0,100	0,200	Broussailles denses de saules, prosopis, ou cèdre maritime (en plein feuillage), ou bien peuplement d'arbres important, quelques arbres à terre, la profondeur de l'eau atteignant les branches.

TAB. D.9 – Table de valeurs pour le coefficient  $n'_4$ .

D.3 Tables de valeurs du coefficient  $n$  de Manning

<i>Description</i>	<i>Minimum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Maximum</i>
En terre, rectilignes et uniformes			
Propres, juste après la mise en eau	0,016	0,018	0,020
Propres, après érosion naturelle	0,018	0,022	0,025
Lit de graviers, section uniforme, net	0,022	0,025	0,030
Herbe rase, quelques touffes	0,022	0,027	0,033
En terre, sinueux et dormants			
Sans végétation	0,023	0,025	0,030
Avec de l'herbe et quelques touffes	0,025	0,030	0,033
Touffes d'herbe denses ou plantes aquatiques en eau profonde	0,030	0,035	0,040
Fond en terre et berges en enrochements	0,028	0,030	0,035
Fond rocheux et berges à végétation dense	0,025	0,035	0,040
Fond de galets et berges nettes	0,030	0,040	0,050
Canaux creusés ou dragués à la pelle mécanique			
Sans végétation	0,025	0,028	0,033
Buissons épars sur les berges	0,035	0,050	0,060
Canaux creusés dans la roche			
Section lisse et uniforme	0,025	0,035	0,040
Section brute et irrégulière	0,035	0,040	0,050
Canaux non entretenus, mauvaises herbes et buissons non taillés			
Touffes d'herbe denses, de la hauteur de l'eau	0,050	0,080	0,120
Idem, avec des hauteurs d'eau plus importantes	0,045	0,070	0,110
Fond propre, buissons sur les berges	0,040	0,050	0,080
Buissons denses, hauteur d'eau importante	0,080	0,100	0,140

TAB. D.10 – Valeurs du coefficient  $n$  de Manning pour des canaux creusés ou dragués, d'après Chow (1973).

<i>Description</i>	<i>Minimum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Maximum</i>
En métal			
Surface en acier lisse			
Brut	0,011	0,012	0,014
Peint	0,012	0,013	0,017
En tôle ondulée	0,021	0,025	0,030
Dans une autre matière			
En ciment			
Sans sable	0,010	0,011	0,013
Mortier	0,011	0,013	0,015
En bois			
Raboté et non traité	0,010	0,012	0,014
Raboté et traité au goudron	0,011	0,012	0,015
Planches et liteaux	0,012	0,015	0,018
Revêtu en toile goudronnée	0,010	0,014	0,017
En béton			
Lissé à la truelle	0,011	0,013	0,015
Lissé grossièrement	0,013	0,015	0,016
Lissé, avec un fond de gravier	0,015	0,017	0,020
Brut	0,014	0,017	0,020
En gunite, section correcte	0,016	0,019	0,023
En gunite, section ondulée	0,018	0,022	0,025
Sur rocher lisse	0,017	0,020	–
Sur rocher irrégulier	0,022	0,027	–
Fond en béton lissé grossièrement avec côtés en			
Pierres taillées dans du mortier	0,015	0,017	0,020
Pierres en vrac dans du mortier	0,017	0,020	0,024
Maçonnerie de moellons et de ciment, crépie	0,016	0,020	0,024
Maçonnerie de moellons et de ciment	0,020	0,025	0,030
Moellons bruts ou enrochements	0,020	0,030	0,035
Fond en gravier et côtés en			
Béton coffré	0,017	0,020	0,025
Pierres en vrac dans du mortier	0,020	0,023	0,026
Moellons bruts ou enrochements	0,023	0,033	0,036
En briques			
Émaillées	0,011	0,013	0,015
dans du mortier de ciment	0,012	0,015	0,018
Maçonnerie			
Enrochements cimentés	0,017	0,025	0,030
Moellons bruts	0,023	0,032	0,035
En pierres de taille	0,013	0,015	0,017
En asphalte			
Lisse	0,013	0,013	–
Rugueux	0,016	0,016	–
Végétalisé	0,030	–	0,500

TAB. D.11 – Valeurs du coefficient  $n$  de Manning pour des canaux revêtus ou bâtis, d'après Chow (1973).



<i>Description</i>	<i>Minimum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Maximum</i>
Petites rivières (largeur en crue < 30 m)			
Rivières de plaine			
Propres, rectilignes, à pleins bords, sans seuils ou mouilles marqués	0,025	0,030	0,033
Idem, mais avec plus de pierres et d'herbes	0,030	0,035	0,040
Propres, sinueuses, quelques seuils et mouilles	0,033	0,040	0,045
Idem, mais avec des herbes et des pierres	0,035	0,045	0,050
Idem, mais avec des hauteurs d'eau moins importantes et plus de zones d'eau morte	0,040	0,048	0,055
Propres, sinueuses, quelques seuils et mouilles, avec des herbes et de nombreuses pierres	0,045	0,050	0,060
Eaux dormantes avec des mouilles profondes et herbeuses	0,050	0,070	0,080
Biefs très herbeux, mouilles profondes ou lônes avec de nombreux arbres et broussailles	0,075	0,100	0,150
Rivières de montagne, pas de végétation dans le cours d'eau, berges habituellement profondes, arbres et buissons le long des berges submergées en hautes eaux			
Lit de graviers, galets et parsemé de quelques blocs rocheux	0,030	0,040	0,050
Lit de galets et de gros blocs rocheux	0,040	0,050	0,070
Rivières importantes (largeur en crue > 30 m)			
Section régulière sans blocs ni buissons	0,025	–	0,060
Section irrégulière et accidentée	0,035	–	0,100

TAB. D.12 – Valeurs du coefficient  $n$  de Manning pour des rivières naturelles, d'après Chow (1973).

<i>Description</i>	<i>Minimum</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Maximum</i>
Pâturages, pas de buissons			
Herbe rase	0,025	0,030	0,030
Herbe haute	0,030	0,035	0,050
Aires cultivées			
Moissonnées	0,020	0,030	0,040
Cultures développées en rangées	0,025	0,035	0,045
Cultures développées en vrac	0,030	0,040	0,050
Buissons			
Buissons épars et mauvaises herbes	0,035	0,050	0,070
Buissons légers et arbres, en hiver	0,035	0,050	0,060
Buissons légers et arbres, en été	0,040	0,060	0,080
Buissons assez épais à épais, en hiver	0,045	0,070	0,110
Buissons assez épais à épais, en été	0,070	0,100	0,160
Arbres			
Saules nombreux, en été, droits	0,110	0,150	0,200
Bois clairs avec souches, sans arbustes	0,030	0,040	0,050
Idem mais avec de nombreux arbustes	0,050	0,060	0,080
Peuplement d'arbres important, quelques arbres tombés, sous-bois clairsemé, hautes eaux en-dessous des branches	0,080	0,100	0,120
Idem, mais avec les hautes eaux atteignant les branches	0,100	0,120	0,160

TAB. D.13 – Valeurs du coefficient  $n$  de Manning pour des plaines d'inondation, d'après Chow (1973).

Occupation du sol	Taux de résidus (t/ha)	$n$		
		Min	Moy	Max
Béton ou asphalte		0,010	0,011	0,013
Sable nu		0,010	0,010	0,016
Gravier		0,012	0,020	0,03
Argile		0,012	0,020	0,033
Friche		0,006	0,050	0,016
Labours (charrue à ciseau)	< 0,6	0,006	0,07	0,17
	0,6-2,5	0,070	0,180	0,340
	2,5-7,4	0,190	0,300	0,470
	> 7,4	0,340	0,400	0,460
Labours (charrue à disques ou herse)	< 0,6	0,008	0,080	0,410
	0,6-2,5	0,100	0,160	0,250
	2,5-7,4	0,140	0,250	0,530
	> 7,4	–	0,300	–
Sol non labouré	< 0,6	0,030	0,040	0,070
	0,6-2,5	0,010	0,070	0,130
	2,5-7,4	0,160	0,300	0,470
Labours (charrue verseuse)		0,020	0,060	0,100
Labours (charrue avec couteaux)		0,050	0,100	0,130
Prairie (état naturel)		0,010	0,130	0,320
Prairie (fauchée)		0,020	0,100	0,240
Herbe (mottes de pâturin des champs)		0,390	0,450	0,630
Plaine herbeuse		0,100	0,150	0,200
Herbe dense		0,170	0,240	0,300
Chiendent		0,300	0,410	0,480

TAB. D.14 – Valeurs du coefficient  $n$  de Manning pour différentes occupations du sol, d'après Engman (1986).

<i>Description</i>		<i>Min</i>	<i>Max</i>
<i>Culture</i>	<i>Disposition par rapport au courant</i>		
Maïs	parallèle	0,036	0,240
	perpendiculaire	0,012	0,134
Coton	parallèle	0,008	0,140
	perpendiculaire	0,017	0,082
Sorgho	parallèle	0,019	0,260
	perpendiculaire	0,015	0,093
Soja	parallèle	0,050	0,210
	perpendiculaire	0,037	0,149
Tournesol	parallèle	0,046	0,250
	perpendiculaire	0,012	0,120
Blé	parallèle	0,280	1,260
	perpendiculaire	0,015	0,130

TAB. D.15 – Valeurs du coefficient  $n$  de Manning pour pour différentes cultures, d'après Gilley et Kottwitz (1992).



## Annexe E

# Résistance à l'écoulement – Historique

Cette annexe présente l'historique des formules permettant de déterminer la vitesse moyenne d'un écoulement à surface libre. Au fil des ans, les coefficients « universels » des premières formules se sont transformés en paramètres de calage. Les équations empiriques se sont adaptées aux contraintes de l'ingénierie pour parvenir au standard actuel qu'est l'équation de Manning, malgré les avancées théoriques de la mécanique des fluides.

Toutes les références citées dans la partie bibliographie sont disponibles soit dans une version électronique depuis le portail de la bibliothèque numérique GALLICA<sup>1</sup>, soit dans leur version papier, en consultation à la Bibliothèque Nationale de France (BNF)<sup>2</sup>.

### E.1 Les premières formules empiriques

L'histoire des premières formules impliquant un coefficient de résistance à l'écoulement est intimement liée à celle de l'hydraulique elle-même, et la plupart des pionniers de l'hydraulique des XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles se sont intéressés à cette question centrale (voir Hager, 2003). Il est de plus intéressant de noter que les premières recherches ont été motivées par des problèmes d'ingénierie et sont donc de nature empirique. Les propos de l'Abbé Bossut (1786) cités au début du chapitre 2 prennent ainsi tout leur sens. Les recherches menées sur la résistance à l'écoulement en canaux découverts ont été fortement liées à celles sur les phénomènes physiques similaires en conduites.

#### E.1.1 Chézy

Dans un rapport manuscrit daté de 1775<sup>3</sup> et rédigé dans le cadre d'un projet de dérivation des eaux de l'Yvette pour l'alimentation en eau de Paris, l'Inspecteur Général des Ponts et Chaussées Antoine Chézy présente la première formule en régime uniforme sur la base de données expérimentales :

$$V = C \sqrt{RS} \quad (\text{E.1})$$

---

1. [bnf.gallica.fr](http://bnf.gallica.fr)

2. Catalogue consultable sur [www.bnf.fr](http://www.bnf.fr)

3. CHÉZY, A. (1775), Mémoire sur la vitesse de l'eau conduite dans une rigole donnée.

Chézy ne prétend pas donner de valeur « universelle » pour le coefficient  $C$ . Cela n'enlève en rien à la simplicité révolutionnaire de cette formule qui ne va pourtant pas connaître la diffusion qu'elle méritait à travers la communauté scientifique de l'époque. Le rapport ne sera en effet publié que plus d'un siècle plus tard aux États-Unis par Herschel<sup>4</sup>. Un hommage à ce précurseur qu'était Chézy sera rendu au début du xx<sup>e</sup> siècle dans les *Annales des Mines* (Mouret, 1921a)<sup>5</sup>, école qu'il a dirigée dans les dernières années de sa vie. De nombreuses autres formules ont donc été développées à partir d'expériences réalisées en grande partie dans des canaux artificiels où était mesurée la vitesse de surface. Cette vitesse était ensuite reliée par des formules empiriques à la vitesse moyenne qui nous intéresse ici.

### E.1.2 Du Buat

Dans la deuxième édition des *Principes d'hydraulique vérifiés par un grand nombre d'expériences* – ouvrage majeur de l'hydraulique du xviii<sup>e</sup> siècle –, Pierre-Louis-Georges du Buat (1786, p. 63) propose la formule suivante reliant la vitesse moyenne au rayon hydraulique et à la pente de la surface :

$$V = \frac{243,7 g (\sqrt{R} - 0,1)}{\sqrt{\frac{1}{S}} - \ln \sqrt{\frac{1}{S}} + 1,60} - 0,3 (\sqrt{R} - 0,1) \quad (\text{E.2})$$

où  $g=362$  pouces, et les constantes 0,1 et 0,3 sont elles aussi exprimées en pouces. Cette formule n'aura malheureusement pas un grand succès en raison de sa forme pour le moins alambiquée.

### E.1.3 Girard

Pierre-Simon Girard, successeur de Chézy dans le projet d'alimentation en eau de Paris va quant à lui proposer une formule rationnelle (Girard, 1804) qu'il appliquera pour le creusement du canal de l'Ourcq (Girard, 1831) :

$$g R S = 0,0012181 (V + V^2) \quad (\text{E.3})$$

### E.1.4 De Prony

Après avoir comparé les formules établies par Girard et du Buat, Gaspard-Clair-François Riche de Prony (1804) établit une formule rationnelle à partir de méthodes de régressions<sup>6</sup> en référence aux travaux de Laplace sur ce sujet :

$$0,000436 V + 0,003034 V^2 = g R S \quad (\text{E.4})$$

4. HERSHEL, C. (1897), On the origin of the Chézy formula. *Journal of the Association of Engineering Societies*, vol. 18, p. 363–368.

5. Ce rapport est un extrait des *Annales des Ponts et Chaussées* (Mouret, 1921b).

6. Dans le texte: *corrections d'anomalies*.

### E.1.5 Eytelwein

En Allemagne, Johann Albert Eytelwein (1825, §XIV)<sup>7</sup> propose quant à lui une autre formule rationnelle :

$$V = -0,0067675 \text{ g} + \sqrt{557,798 \text{ g R S} + 0,0000458 \text{ g}^2} \quad (\text{E.5})$$

Deux paragraphes plus loin, il propose une simplification de cette formule pour une utilisation pratique et retombe ainsi de manière fortuite sur une formule de type Chézy :

$$V = 24,12 \sqrt{\text{g}} \sqrt{\text{R S}} \quad (\text{E.6})$$

### E.1.6 Dupuit<sup>8</sup>

Jules-Étienne-Juvénal Dupuit (1863, p. 57) va critiquer l'application de ces formules rationnelles à des cours d'eau naturels :

Il ne faut pas s'attendre à ce qu'on arrive jamais à rien de précis pour des circonstances aussi accidentelles, aussi irrégulières que celles des grands cours d'eau naturels. Tout ce qu'on peut espérer de la théorie et de l'expérience, c'est de renfermer les erreurs dans des limites plus restreintes.

Ces formules empiriques intègrent en effet des données d'expériences hétéroclites – mais principalement sur des canaux de petites dimensions – et visent à obtenir des formules « universelles » et donc des coefficients de résistance constants. Les rares confrontations à des données recueillies sur des cours d'eau naturels reste alors malheureusement insatisfaisante.

### E.1.7 Humphreys et Abbot

Aux États-Unis, Humphreys et Abbot (1861) déterminent à partir de nombreuses expériences sur le Mississippi la formule suivante, basée directement sur la vitesse moyenne :

$$V = H K \sqrt{\frac{A}{P + B}} \sqrt[4]{S} \quad (\text{E.7})$$

où H coefficient variable,  $K = 8,28972$ , A section mouillée, P périmètre mouillé et B largeur au miroir. Le tableau E.1 présente les valeurs du coefficient H pour des catégories-types de cours d'eau.

Ce rapport a été traduit tout d'abord en allemand par Heinrich Grebenau, puis résumé en français (Humphreys et Abbot, 1867). Une critique en a ensuite été faite par Fournié (1867). La plus grande réserve est que ces expériences ont été réalisées sur une rivière au caractère alluvial fortement marqué, et pour laquelle l'hypothèse de fond rigide peut être aisément mise en défaut.

7. Cet article est une traduction par Lejeune-Dirichlet de l'article original en allemand (Eytelwein, 1823).

8. Une biographie de cet éminent ingénieur hydraulicien français est parue récemment dans le *Journal of Hydraulic Engineering* (Hager, 2004).



Catégorie	Valeur moyenne de H
Pour les petits canaux ou rigoles au-dessous d'une section de 1 m <sup>2</sup>	0,8543
Pour les ruisseaux d'une section de 1 à 5 m <sup>2</sup>	0,8796
Pour les petites rivières d'une section de 5 à 10 m <sup>2</sup>	0,8890
Pour les rivières d'une section de 20 à 400 m <sup>2</sup>	0,9223
Pour les grands fleuves d'une section supérieure à 400 m <sup>2</sup>	0,9459

TAB. E.1 – Valeurs du coefficient H de la formule de Humphreys et Abbot (1861).

### E.1.8 Saint-Venant

Adhémar Jean-Claude Barré de Saint-Venant (1843, 1851) tente quant à lui de revenir à une formule monôme dans laquelle l'exposant de la vitesse moyenne serait une fraction rationnelle et propose :

$$V = 60 (RI)^{\frac{11}{21}} \quad (\text{E.8})$$

## E.2 De coefficients « universels » en paramètres

La confrontation de toutes ces formules empiriques à des données de plus en plus nombreuses et variées suscite alors la question de l'invariabilité des coefficients de résistance. Il faut noter que ces interrogations sur ces formules n'ont nullement empêché leur large utilisation pendant des dizaines d'années pour résoudre des problèmes pratiques d'ingénierie.

### E.2.1 Weisbach

Julius Albin Weisbach (1847), revenant à une formule monôme, propose alors une équation introduisant un coefficient de frottement  $\zeta$  :

$$V = \sqrt{\frac{2gRS}{\zeta}} \quad (\text{E.9})$$

Afin de coller aux résultats expérimentaux produits jusqu'alors, et notamment ceux de du Buat, il attribue à ce coefficient une valeur moyenne. Il propose ensuite de faire varier ce coefficient avec la vitesse moyenne  $V$  (1847, §368) :

*The co-efficient of friction for rivers, brooks, &c., the mean value of which, in the foregoing paragraphs, we have taken at 0,007565, is not constant, but, as in pipes, increases somewhat for small and diminishes for great velocities.*

Le coefficient de résistance est ainsi pour la première fois considéré comme variable, et devient un paramètre fonction de la vitesse moyenne. Quelques années plus tard, Weisbach<sup>9</sup> formule l'équation suivante donnant la perte de charge relative à une conduite :

$$h_f = f \frac{L}{d_0} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{E.10})$$

9. WEISBACH, J. A. (1850), *Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinen-Mechanik mit den nöthigen Hülfslehren aus der Analysis, für den Unterricht an technischen Lehranstalten sowie zum Gebrauche für Techniker bearbeitet*. F. Vieweg und Sohn, Braunschweig, Deutschland.

où  $h_f$  perte de charge,  $f$  facteur de friction,  $L$  longueur de la conduite,  $d_0$  diamètre de la conduite et  $V$  vitesse moyenne. Le coefficient  $f$  est depuis lors appelé coefficient de Darcy-Weisbach. Cette équation peut être appliquée aux écoulements à surface libre en introduisant la pente de la ligne d'énergie et le rayon hydraulique  $R = \frac{d_0}{4}$  (Chow, 1973, p. 8). On obtient alors :

$$V = \sqrt{\frac{8 g R S}{f}} \quad (\text{E.11})$$

### E.2.2 Bazin

Prenant la suite des expériences réalisées en conduites par Henri-Philibert-Gaspard Darcy (1858), Henri Émile Bazin (1865)<sup>10</sup> s'est intéressé aux écoulements dans des canaux découverts. En étudiant les expériences conduites par de Prony, du Buat et Eytelwein, il constate – confirmant ainsi les doutes de de Prony (1804) – que les coefficients des formules rationnelles développées jusque-là sont « variables à l'infini suivant la nature de la paroi dans laquelle s'opère l'écoulement. » (1865, p. 16) Considérant que l'influence de la pente et de la « figure » du profil transversal sur les coefficients peut être négligée, il propose de revenir à une formule monôme à deux coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  dont les valeurs dépendent pour la première fois de la catégorie des parois :

$$\frac{R S}{V^2} = \alpha + \frac{\beta}{R} \quad (\text{E.12})$$

Une table des valeurs de ces coefficients peut être trouvée dans le tableau E.2.

Catégorie	$\alpha$	$\beta$
Parois très unies : ciment lissé, bois raboté avec soin, etc.	0,00015	0,03
Parois unies : pierres de taille, briques, planches, etc.	0,00019	0,07
Parois peu unies, en maçonnerie de moellons	0,00024	0,25
Parois en terre	0,00028	1,25

TAB. E.2 – Table de valeurs des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  de la première formule de Bazin (1865).

La formule pour des parois en terre, qui nous intéresse ici, donne une bonne concordance graphique avec les expériences effectuées sur plusieurs rivières (Darcy et Bazin, 1865, planche XVI). En 1897<sup>11</sup>, Bazin propose une nouvelle formule comportant un seul coefficient représentant uniquement le frottement aux parois :

$$\frac{\sqrt{R S}}{V} = 0,0115 \left( 1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}} \right) \quad (\text{E.13})$$

Le coefficient  $\gamma$  peut être extrait d'une table comportant six catégories de parois, reproduite dans le tableau E.3. Cette table a été reprise de nombreuses fois dans les ouvrages de références en hydraulique (voir par exemple Carlier, 1972; Lencastre, 1999).

10. Les résultats principaux ont été publiés (Bazin, 1862) et rapportés (Morin, 1863) quelques années plus tôt dans les *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences*.

11. L'article des *Annales des Mines* a été tiré à part et publié l'année suivante (Bazin, 1898).

Catégorie	Caractéristiques		$\gamma$
	<i>d'après Bazin (1897), repris par Carlier (1972)</i>	<i>d'après Lencastre (1999)</i>	
1	Parois très unies (ciment, bois raboté)	Canaux en béton bien lissé; canaux en bois raboté, avec la plus grande dimension des planches selon la direction du courant; parois métalliques sans rouille et décrochements dans les joints.	0,06
2	Parois unies (planches, briques, pierres de taille, etc.)	Canaux en béton, revêtus, mais non complètement lissés et avec des décrochements peu importants dans les joints. Canaux en bois raboté avec des joints réguliers, mais sans décrochements dans les joints. Canaux en maçonnerie régulière de pierre de taille.	0,16
3	Parois en maçonnerie de moellons	Canaux en béton, partiellement revêtus, avec des joints saillants, où coule de l'eau peu claire avec végétation et mousse. Canaux revêtus en pierres sèches.	0,46
4	Parois de nature mixte (sections en terre très régulières, rigoles revêtues de perrés, etc.)	Canaux en terre de section régulière, végétation peu haut sur le fond, sans végétation et courbes amples. Canaux en maçonnerie régulière, avec le fond lisse par suite du dépôt de vase.	0,85
5	Canaux en terre dans les conditions ordinaires	Canaux en terre de section régulière, végétation peu haute sur le fond, végétation courte sur les berges. Cours d'eau naturels d'allure régulière, sans végétation ni grand dépôt sur le fond.	1,30
6	Canaux en terre présentant une résistance exceptionnelle (fonds de galets, parois herbées, etc.)	Canaux en terre mal entretenus, avec de la végétation sur le fond et les berges. Canaux en terre, exécutés par des excavateurs mécaniques, mal entretenus.	1,75

TAB. E.3 – Table des valeurs du coefficient  $\gamma$  de la formule de Bazin (1897).

### E.3 Vers une formule standard d'ingénierie

Les différentes formules empiriques présentées dans la section précédente ont été usitées par de nombreux ingénieurs. Aucune d'entre elles ne s'imposera pourtant ni de façon durable, ni au niveau international comme la formule développée indépendamment par Gauckler, Manning et Strickler.

#### E.3.1 Gauckler

En 1868<sup>12</sup>, Philippe-Gaspard Gauckler<sup>13</sup>, utilisant les expériences de Darcy et Bazin, développe deux formules monôme dont le choix dépend de la valeur de la pente du lit :

$$\begin{cases} \sqrt{V} = \alpha \sqrt[3]{R} \sqrt[4]{S} & \text{pour } S \geq 0,0007 \\ \sqrt[4]{V} = \beta \sqrt[3]{R} \sqrt[4]{S} & \text{pour } S < 0,0007 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{(E.14)} \\ \text{(E.15)} \end{matrix}$$

Il fournit également une table sommaire de valeurs des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  déterminées à partir de nombreuses expériences, reproduite dans le tableau E.4.

<i>Nature de la paroi</i>	$\alpha$	$\beta$
Maçonnerie de pierre de taille et de ciment	de 8,5 à 10	de 8,5 à 9
Bonne maçonnerie ordinaire	de 7,6 à 8,5	de 8 à 8,5
Parois en maçonnerie avec fond en terre	de 6,8 à 7,6	de 7,7 à 8
Rigoles en terre, sans herbes	de 5,7 à 6,7	de 7 à 7,7
Rigoles en terre, avec herbes sur les talus	de 5 à 5,7	de 6,6 à 7
Rivière	de 5 à 5,7	de 6,4 à 7

TAB. E.4 – *Table de valeurs des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  des formules de Gauckler (1868).*

Il se montre tout à fait conscient des limites pratiques d'utilisation de cette table :

Nous comprenons tout ce que ces coefficients présentent d'indéterminé et ce que leur emploi peut entraîner d'erreurs dans la pratique ; mais nous ne pouvons ici faire plus que de poser la question, en tirant tout le parti possible des expériences, dont la science peut disposer dans le moment présent.

mais reste confiant dans les recherches futures pour une détermination plus fine de ces coefficients :

Il est évident que lorsque l'attention des ingénieurs se portera spécialement sur l'influence que la paroi exerce sur les débits, les expériences de l'avenir renfermeront des descriptions minutieuses de la nature des lits, dans lesquels s'effectuent les écoulements ; il en résultera que chaque espèce particulière du lit sera affectée d'un coefficient connu, qui répondra avec le plus de précision à sa loi d'écoulement.

12. Un résumé de ce mémoire est paru l'année précédente à la fois dans le *Technologiste* (Gauckler, 1867a) et dans les *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences* (Gauckler, 1867b).

13. Une biographie axée sur le développement de la formule E.14 est parue récemment dans le *Journal of Hydraulic Engineering*.

Ces formules ont été vérifiées expérimentalement par Stapfer (1869). Gauckler (1868, p. 269) est aussi le premier à faire allusion à la variation avec la vitesse de la résistance due à la végétation :

Quand un perré est recouvert d'herbes, elles opposent une grande résistance aux vitesses faibles. Mais quand les vitesses croissent de façon à incliner et coucher les herbes sur les talus, la résistance diminue et le coefficient augmente.

### E.3.2 Guanguillet et Kutter

Émile Oscar Guanguillet et Wilhelm Rudolph Kutter (1893)<sup>14</sup> – en compilant de nombreuses expériences dont celles de Bazin (1865) – expriment le coefficient  $C$  de Chézy en fonction de la pente  $S$ , du rayon hydraulique  $R$  et d'un coefficient de rugosité  $n$  pour arriver à la formule suivante :

$$V = \frac{23 + \frac{0,00155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0,00155}{S}\right) \frac{n}{\sqrt{R}}} \sqrt{RS} \quad (\text{E.16})$$

Ils proposent aussi la première table de valeurs du coefficient  $n$ , reproduite dans le tableau E.5 :

Catégorie de cours d'eau	Valeur moyenne de $n$
Canaux de planches soigneusement dégauchies ou de ciment lisse	0,010
Canaux de planches brutes	0,012
Canaux de pierres de taille ou de briques ajustées	0,013
Canaux en maçonnerie brute	0,017
Canaux en terre, ruisseaux et rivières	0,025
Cours d'eau avec des détritrus ou des plantes aquatiques	0,030

TAB. E.5 – *Table de valeurs du coefficient  $n$  de Kutter, d'après Guanguillet et Kutter (1893, p. 61).*

Horton (1916)<sup>15</sup> a publié une table plus complète de valeurs de ce coefficient  $n$ , appelé coefficient de Kutter. La reprise de cette table par King dans la première édition de son *Handbook of hydraulics* (1918) a sans aucun doute favorisé la diffusion et l'utilisation de cette formule et surtout du coefficient  $n$  associé.

14. L'ouvrage cité en référence est la traduction d'un ouvrage publié en langue allemande (Kutter, 1885) compilant notamment les deux articles fondateurs des auteurs :

GUANGUILLET, É. O. et KUTTER, W. R. (1869), Versuch zur Aufstellung einer neuen allgemeinen Formel für die gleichförmige Bewegung des Wassers in Canälen und Flüssen. *Zeitschrift des Oesterreichischen Ingenieur und Architekten Vereines*, vol. 21, n° 1, p. 6–25 et n° 2-3, p. 46–59.

15. HORTON, R. E. (1916), Some better Kutter's formula coefficients. *Engineering News*, vol. 75, n° 8, p. 373–374.

### E.3.3 Manning

L'ingénieur irlandais Robert Manning<sup>16</sup> présente quant à lui en 1889 au cours d'une conférence<sup>17</sup> deux nouvelles formules dont celle qui allait devenir sa formule éponyme :

$$V = C_M R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{E.17})$$

Cette équation n'avait pas ses faveurs en raison de sa non-homogénéité du point de vue dimensionnel et de la difficulté d'extraire une racine cubique. Il a ainsi proposé une autre formule incluant une mesure de la pression atmosphérique qui est demeurée quasiment ignorée (Powell, 1968). En répondant à une question de l'audience, il note aussi la correspondance de  $C_M$  avec le coefficient de Kutter<sup>18</sup> :

*It is worthy of remark that the value of the reciprocal of  $C_M$  corresponds closely with that of  $n$ , as determined by Guanguillet and Kutter; both  $C_M$  and  $n$  being constant for the same channel.*

Le coefficient  $C_M$  sera assumé – et promu – comme étant l'inverse du coefficient  $n$  de Kutter par Flamant (1900, p. 191)<sup>19</sup> et l'équation E.17 sera modifiée pour aboutir à la forme suivante<sup>20</sup> :

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{E.18})$$

Le coefficient  $n$  de Kutter est ainsi devenu le coefficient  $n$  de Manning, et l'équation E.18 l'équation de Manning (Williams, 1970). Pour un recueil d'articles jalonnant l'histoire de cette formule, le lecteur pourra consulter l'ouvrage édité à l'occasion du centenaire de celle-ci (Yen, 1991a), et en particulier, un article de Dooge (1991) qui remet le développement de cette formule dans le contexte de l'époque.

### E.3.4 Strickler

En Europe, les hydrauliciens utilisent plus volontiers l'inverse du coefficient de Manning, appelé coefficient de Strickler et noté  $K_s$  dans la formule suivante établie de manière indépendante par Albert Strickler<sup>21</sup> :

$$V = K_s R^{2/3} S^{1/2} \quad (\text{E.19})$$

L'histoire a ainsi gardé le nom de Manning pour qualifier la formule standard utilisée par les hydrauliciens du monde entier, au détriment des autres protagonistes (voir Anderson, 2002), et notamment de l'apport de Gauckler (voir Hager, 2001) et de Strickler (voir Vischer, 1987).

16. MANNING, R. (1891), On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, vol. 20, p. 161–207. et MANNING, R. (1895), On the flow of water in open channels and pipes – Supplement to 1889 paper. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, vol. 24, p. 179–207.

17. *Institute of Civil Engineers of Ireland*, 4 décembre 1889.

18. Cité par Dooge (1991, p. 205).

19. La première édition date de 1891.

20. Cette forme sera suggérée pour un usage international par Lindquist (LINDQUIST, E. G. W. (1933), On velocity formulas for open channels and pipes. Dans: *Transactions of the World Power Conference, Sectional Meeting*, vol. 1, p. 177–234, Stockholm, Sweden.) et effectivement recommandée par le Comité Exécutif de la troisième *World Power Conference* (Washington, D.C., 1936).

21. STRICKLER, A. (1923), Beiträge zur frage der eschwindigkeitsformel und der rauhigkeitszahlen für ströme, kanäle und geschlossene leitungen. *Mitteilungen des eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft*, n° 16.

## E.4 Applicabilité hors du régime uniforme

La formule de Manning a été établie, comme toutes les formules empiriques qui l'ont précédée, en régime permanent uniforme. Or, son incorporation au sein d'un modèle conceptuel pour la simulation de rivières naturelles en crue requiert une utilisation non seulement en régime permanent graduellement varié, mais aussi bien sûr en régime transitoire.

### E.4.1 Régime permanent graduellement varié

Les premières équations empiriques, établies d'après des expériences en régime uniforme, ont été utilisées très tôt en mouvement varié, notamment par Vauthier (1836) et Dupuit (1863). Bazin (1865, p. 35) se pose pourtant la question de la valeur du coefficient de résistance en régime graduellement varié :

Quelle valeur doit-on dès lors lui attribuer dans la formule du mouvement varié ? Il y a là une certaine indétermination. Nous avons toutefois constaté que cette formule [celle du régime permanent] représentait assez exactement les faits observés...

Si l'on admet – comme il est de rigueur de le faire – que la perte de charge dans une section pour un écoulement graduellement varié est la même que pour un écoulement uniforme de mêmes vitesse et rayon hydraulique, alors les formules développées en régime uniforme sont aussi applicables, comme l'écrit Chow (1973, p. 217) :

*... the uniform flow formula may be used to evaluate the energy slope of a gradually varied flow at a given channel section, and the corresponding coefficient of roughness developed primarily for uniform flow is applicable to the varied flow.*

Et il rappelle aussi que cette hypothèse n'a jamais été vérifiée par l'expérience, mais que les erreurs commises sont d'un ordre de grandeur inférieur à celles dues à l'utilisation même de la formule en régime uniforme :

*This assumption has never been precisely confirmed by either experiment or theory, but errors arising from it are believed to be small compared with those ordinarily incurred in the use of a uniform-flow formula and in the selection of the roughness coefficient. Over years of use this assumption has proved to be a reliable basis for design.*

### E.4.2 Régime transitoire

Pour les écoulements non stationnaires qui nous intéressent ici, à savoir la propagation d'ondes de crue dans des rivières naturelles, la même approximation que précédemment est réalisée pour utiliser une formule de type Manning, comme le confirme Rouse (1965, p. 18)

*... The other limit of the problem, comparable to gradually varied flow, has long since proved even more amenable to treatment. This is the propagation of true flood waves, which takes place in such a manner that inertial effects are small in comparison with resistance. Under these conditions the resistance can be assumed to have essentially the same magnitude as that of steady uniform flow at the same depth and velocity.*

Pourtant, cette hypothèse n'a elle non plus jamais été vérifiée théoriquement, comme le déplorent Schaffranek et Lai (1996, p. 73), malgré son importance dans les modèles numériques :

*Because boundary stress is a highly influential factor, effective treatment and accurate evaluation of frictional-resistance effects are vital to successful implementation of unsteady open-channel flow models. Unfortunately, although efforts are continually directed toward developing new and varied numerical methods for solving the unsteady flow equations, less attention is paid to the importance of proper and exacting implementation and calibration of resultant models.*

Ils constatent aussi que le modélisateur ne possède que peu de moyens pour s'assurer d'employer une valeur convenable du coefficient de résistance :

*As a consequence, little quantitative information and few guidelines are available for evaluating, assessing, and specifying the frictional-resistance coefficient in unsteady open-channel flow simulation.*

## E.5 Lien avec la mécanique des fluides

Le début du xx<sup>e</sup> siècle aura vu, avec les avancées de la mécanique des fluides, l'avènement d'une théorie pour la résistance à l'écoulement. Pour plus de précisions sur ces recherches, le lecteur pourra consulter les synthèses historiques réalisées par Ackers (1958) et Carter *et al.* (1963).

### E.5.1 Notion de rugosité équivalente

La notion de rugosité équivalente trouve sa source dans les études de Nikuradse<sup>22</sup> sur des conduites dont la rugosité avait été créée artificiellement par des grains de sable de diamètre donné. Cette rugosité équivalente – notée  $k_s$  – comme l'indique Chow (1973, p.195) n'est pas seulement une mesure des dimensions des éléments constituant la rugosité :

*The roughness height is merely a measure of the linear dimension of the roughness elements but is not necessarily equal to the actual, or even an average, height. For example, two roughness elements may have different linear dimensions, but, owing to the difference in shape and orientation, they may produce identical roughness effect and, thus, their roughness will be designated by the same roughness height.*

Une étude des effets de la taille, de la forme et de l'espacement d'éléments artificiels a été réalisée par Schlichting (1979, p. 623-626)<sup>23</sup>, et le lecteur intéressé pourra trouver une synthèse de ces influences dans l'article de Rouse (1965). L'influence de la nonuniformité de la surface peut cependant être négligé devant les autres sources de résistance (Rouse, 1965, p. 14) :

*In a word, at least for the present, the change in surface resistance occasioned by nonuniformity of the flow section can be assessed only qualitatively. In many cases of boundary nonuniformity, however, surface effects play a role that is minor compared with those of shape and wave formation.*

Chow (1973, p. 196) a proposé un tableau de valeurs approximatives de cette rugosité équivalente pour différents matériaux. Pour le lit d'une rivière naturelle, il estime  $0,03 \text{ m} \leq k_s \leq 0,9 \text{ m}$ .

22. NIKURADSE, J. (1933), Strömungsgesetze in rauhen Röhren. *Verein Deutscher Ingenieure, Forschungsheft*, vol. 361.

23. La première édition date de 1936.



### E.5.2 Colebrook

Colebrook et White (1937) ont développé une formule de transition entre régime *turbulent lisse* et régime *turbulent rugueux* en conduites :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k_s}{3,7D} + \frac{2,51}{\mathcal{R}_p \sqrt{f}} \right) \quad (\text{E.20})$$

où  $D$  diamètre de la conduite et  $\mathcal{R}_p$  rayon hydraulique pour un écoulement en conduite. Cette équation peut être généralisée pour un écoulement à surface libre sous la forme (Carter *et al.*, 1963) :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -c_1 \log_{10} \left( \frac{k_s}{c_2 R} + \frac{c_3}{4R \sqrt{f}} \right) \quad (\text{E.21})$$

L'équation E.21 a été utilisée et soumise à des expériences par de nombreux pionniers de la mécanique des fluides. Les valeurs des coefficients  $c_1$ ,  $c_2$  et  $c_3$  dépendent notamment de la forme de la section. Le tableau E.6 reprend des valeurs compilées par Carter *et al.* (1963) pour des canaux à surface libre.

	$c_1$	$c_2$	$c_3$
Canal très large	2,03	11,09	3,41
Canal trapezoidal	2,03	12,27	3,09

TAB. E.6 – Valeurs des coefficients de la formule généralisée de Colebrook et White.

### E.5.3 Formule de Powell

Une autre formule implicite a été suggérée par Powell (1950), par analogie avec l'équation E.20 pour les canaux découverts<sup>24</sup>. Cette formule, reprise par Chow (1973, p. 95) et Carlier (1972, p. 328), exprime le coefficient  $C$  de Chézy en fonction d'une mesure de rugosité du canal  $\epsilon$  – dont le tableau E.7 présente quelques valeurs – différente du coefficient  $k_s$  de Nikuradse :

$$C = -23,19 \log_{10} \left( \frac{C}{4R} + \frac{\epsilon}{R} \right) \quad (\text{E.22})$$

Description du canal	$\epsilon$ (mm)
Canal en ciment lissé	0,06
Canal en bois non raboté	0,30
Canal en béton	1,22
Canal rectiligne et uniforme en terre	12,19
Canal dragué	30,48

TAB. E.7 – Valeurs du coefficient  $\epsilon$  de la formule de Powell (1950).

<sup>24</sup> Sablani *et al.* (2000) a utilisé des réseaux de neurones pour résoudre cette équation de manière non-iterative.

#### E.5.4 Formules simplifiées applicables aux cours d'eau naturels

Dans les cours d'eau naturels, on peut faire les deux hypothèses suivantes :

- les cours d'eau peuvent être considérés comme larges, et le rayon hydraulique  $R$  peut être approximé par la hauteur d'eau  $h$  ;
- l'écoulement peut être considéré comme totalement turbulent rugueux, ce qui correspond à (Henderson, 1969, p. 99) :

$$n^6 \sqrt{R S_f} \geq 1,06 \cdot 10^{-13} \quad (\text{E.23})$$

Pour des canaux rugueux, l'équation E.21 peut donc se réduire à :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -c_1 \log \left( \frac{c_2 R}{k_s} \right) \quad (\text{E.24})$$

Cette formule est utilisée – avec des valeurs de  $c_1$  et  $c_2$  correspondant à un canal trapézoïdal – dans le cadre du projet *Reducing Uncertainty in River Flood Conveyance*<sup>7</sup> et appliquée à des rivières naturelles de Grande-Bretagne.

#### E.5.5 Invariance par rapport au rayon hydraulique

À partir de l'équation E.24, on peut tirer une expression du coefficient  $n$  en régime turbulent rugueux :

$$n = \frac{R^{1/6}}{c_1 \sqrt{8g} \log \left( \frac{c_2 R}{k_s} \right)} \quad (\text{E.25})$$

On peut alors exprimer le rapport  $\frac{n}{k_s^{1/6}}$  comme suit (Chow, 1973, p. 205-206) :

$$\frac{n}{k_s^{1/6}} = \varphi \left( \frac{R}{k_s} \right) \quad \text{où} \quad \varphi \left( \frac{R}{k_s} \right) = \frac{\left( \frac{R}{k_s} \right)^{1/6}}{c_1 \sqrt{8g} \log \left( c_2 \frac{R}{k_s} \right)} \quad (\text{E.26})$$

La figure E.1 montre la quasi-invariance de la fonction  $\varphi$  pour des valeurs de  $\frac{R}{k_s}$  communes dans des rivières naturelles. L'invariance du coefficient  $n$  par rapport au rayon hydraulique n'est bien entendu valable que si la rugosité du lit est homogène. Or, les cours d'eau naturels ont des sections de rugosité éminemment composite, comme on l'a vu dans la section 2.1.2.

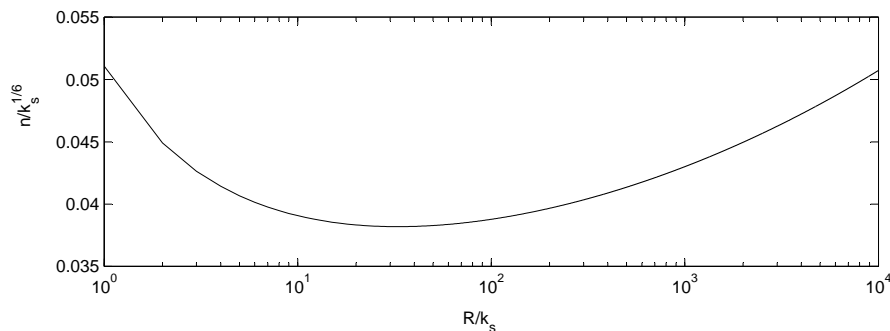


FIG. E.1 – Variation du coefficient  $n$  de Manning en fonction du rayon hydraulique.



## Annexe F

# Description des fichiers utilisés par le logiciel MAGE



## Annexe G

# Description des programmes de la chaîne de traitement du logiciel MAGE

Cette annexe présente de manière succincte notre modélisation du fonctionnement *externe* des différents exécutables de la chaîne de traitement du code MAGE.

### TALWEG

TALWEG est un interpolateur géométrique développé il y a vingt ans au CEMAGREF (CEMAGREF, 1984). Son fonctionnement est représenté sur la figure G.1.

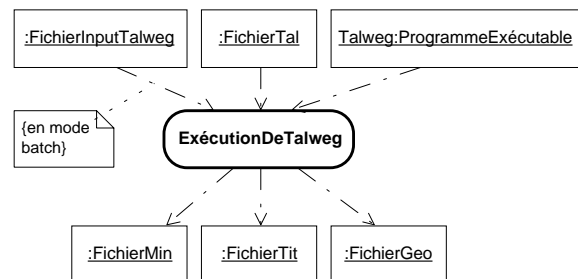


FIG. G.1 – Modélisation de l'exécution du programme TALWEG.

### MAGE5 et MAGE6

MAGE5 est le solveur numérique du modèle conceptuel décrit dans le chapitre 2, et son fonctionnement est schématisé sur la figure G.2. MAGE6 est une nouvelle version du solveur MAGE5 qui intègre notamment l'interpolateur géométrique TALWEG. Sa mise en œuvre revient – à quelques détails près – à exécuter séquentiellement les deux programmes précédents.

### MAGE\_EXTRAIRE

MAGE\_EXTRAIRE permet – comme son nom l'indique – d'extraire un résultat de calcul spécifique, au format Ascii à partir du fichier au format binaire produit par MAGE5.

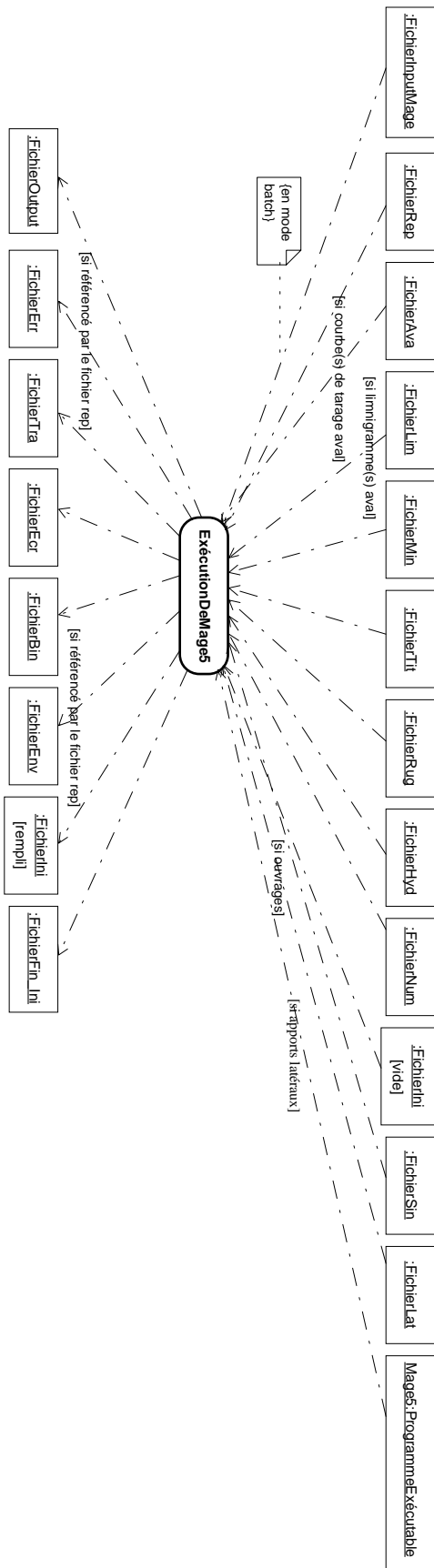


FIG. G.2 – Modélisation de l'exécution du programme MAGE5.

Son fonctionnement est représenté sur la figure G.3.

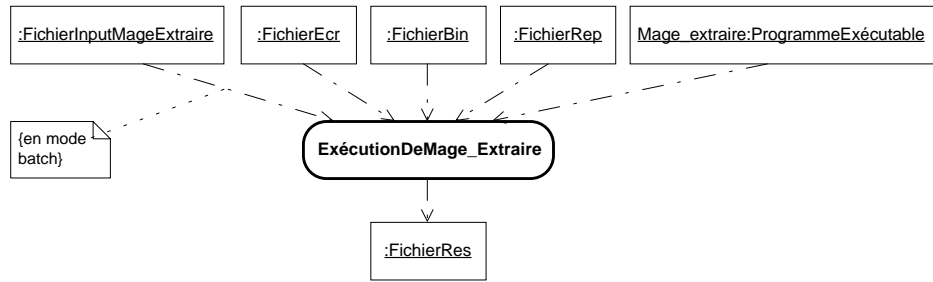


FIG. G.3 – Modélisation de l'exécution du programme MAGE\_EXTRAIRE.

### RESVIEW

RESVIEW est un programme de visualisation des données contenues dans les fichiers produits par MAGE\_EXTRAIRE. Il a été développé par Tardy (2003) dans le cadre de la réalisation d'un environnement de modélisation pour les codes MAGE et RUBARBE. Il offre deux modes de représentation des données : courbes continues et ensembles de points, ce qui permet de différencier aisément une courbe calculée de points mesurés. Son fonctionnement est présenté sur la figure G.4.

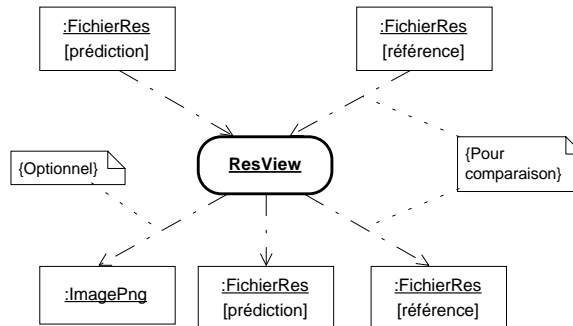


FIG. G.4 – Modélisation de l'exécution du programme RESVIEW.





## Annexe H

# Listing des sessions de calage avec le prototype CARMA-1

### H.1 Calage du modèle de la Lèze

Question	Propositions	Réponse
Requête?	1. Calage du modèle de la Lèze 2. Calage du modèle de l'Hogneau	1
Nombre de tronçons homogènes?	[1-10]	8
Abscisse de transition entre tronçons 1 et 2?	[1-100000]	14126
Abscisse de transition entre tronçon 2 et 3?	[1-100000]	16181
Abscisse de transition entre tronçon 3 et 4?	[1-100000]	21934
Abscisse de transition entre tronçon 4 et 5?	[1-100000]	23223
Abscisse de transition entre tronçon 5 et 6?	[1-100000]	28255
Abscisse de transition entre tronçon 6 et 7?	[1-100000]	29569
Abscisse de transition entre tronçon 7 et 8?	[1-100000]	35277
Méthode d'estimation de la résistance?	1. Typologie de cours d'eau 2. Composantes de la résistance	1
Type de cours d'eau?	1. Canal creusé ou dragué 2. Canal revêtu ou dragué 3. Rivière naturelle	3
Type de rivière?	1. Petite rivière 2. Rivière importante	1
Situation de la rivière?	1. Rivière de plaine 3. Rivière de montagne	1
Tronçon 1: Type de rivière de plaine?	1. Propre, rectiligne, à pleins bords, sans seuils ou mouilles marqués 2. Idem, mais avec plus de pierres et d'herbes 3. Propre, sinueuse, quelques seuils et mouilles 4. Idem, mais avec des herbes et des pierres 5. Idem, mais avec des hauteurs d'eau moins importantes et plus de zones d'eau morte 6. Idem que 4., mais avec plus de pierres	3

*Suite page suivante*

Question	Propositions	Réponse
	7. Eaux dormantes avec des mouilles profondes et herbeuses	
	8. Bief très herbeux, mouilles profondes ou lônes avec de nombreux arbres et broussailles	
Tronçon 1 : Végétation en lit majeur?	1. Pâturages sans buissons 2. Aires cultivées 3. Buissons 4. Arbres	3
Type de buissons?	1. Buissons épars et mauvaises herbes 2. Buissons légers et arbres, en hiver 3. Buissons légers et arbres, en été 4. Buissons assez épais à épais, en hiver 5. Buissons assez épais à épais, en été	4
Tronçon 2 : Type de rivière de plaine?	1. Propre, rectiligne, à pleins bords, sans seuils ou mouilles marqués 2. Idem, mais avec plus de pierres et d'herbes 3. Propre, sinueuse, quelques seuils et mouilles 4. Idem, mais avec des herbes et des pierres 5. Idem, mais avec des hauteurs d'eau moins importantes et plus de zones d'eau morte 6. Idem que 4., mais avec plus de pierres 7. Eaux dormantes avec des mouilles profondes et herbeuses 8. Bief très herbeux, mouilles profondes ou lônes avec de nombreux arbres et broussailles	1
Tronçon 2 : Végétation en lit majeur?	1. Pâturages sans buissons 2. Aires cultivées 3. Buissons 4. Arbres	4
Type d'arbres?	1. Saules nombreux, en été, droits 2. Bois clairs avec souches, sans arbustes 3. Idem mais avec de nombreux arbustes 4. Peuplement d'arbres important, quelques arbres tombés, sous-bois clairsemé, hautes eaux en-dessous des branches	2
	⋮	⋮
_____	<i>Les questions posées et les réponses données sont les mêmes pour le tronçon 3 que pour le tronçon 1.</i>	_____
	⋮	⋮
_____	<i>Les questions posées et les réponses données sont les mêmes pour le tronçon 4 que pour le tronçon 2.</i>	_____
	⋮	⋮
_____	<i>Les questions posées et les réponses données sont les mêmes pour le tronçon 5 que pour le tronçon 1.</i>	_____
	⋮	⋮
_____	<i>Les questions posées et les réponses données sont les mêmes pour le tronçon 6 que pour le tronçon 2.</i>	_____
	⋮	⋮
_____	<i>Les questions posées et les réponses données sont les mêmes pour le tronçon 7 que pour le tronçon 1.</i>	_____

Suite page suivante

Question	Propositions	Réponse
⋮	⋮	⋮
— Les questions posées et les réponses données sont les mêmes pour le tronçon 8 que pour le tronçon 2. —		
⋮	⋮	⋮
————— <i>Affichage des hydrogrammes calculé et enregistré à Labarthe</i> —————		
Décalage temporel?	1. Courbe en avance 2. Courbe légèrement en avance 3. Pas de décalage 3. Courbe légèrement en retard 4. Courbe en retard	4
————— <i>Affichage des hydrogrammes calculé et enregistré à Labarthe</i> —————		
Décalage temporel?	1. Courbe en avance 2. Courbe légèrement en avance 3. Pas de décalage 3. Courbe légèrement en retard 4. Courbe en retard	3
————— <i>Affichage des hydrogrammes calculé et enregistré à Labarthe</i> —————		
Qualité de la représentation de l'hydrogramme enregistré à Labarthe?	1. Très bonne 2. Bonne 3. Assez bonne 4. Passable 5. Médiocre	3
Modèle numérique : Lèze entre Lézat-sur-Lèze et Labarthe-sur-Lèze Données événementielles : crue de février 2000 Domaine d'application visé : prévision de crue Niveau de correspondance attendu : bonne reproduction de la dynamique de crue Valeur du modèle calé : assez bonne		

## H.2 Calage du modèle de l'Hogneau

Question	Propositions	Réponse
Requête?	1. Calage du modèle de la Lèze 2. Calage du modèle de l'Hogneau	2
Nombre de tronçons homogènes?	[1-10]	4
Abscisse de transition entre tronçons 1 et 2?	[1-100000]	32000
Abscisse de transition entre tronçon 2 et 3?	[1-100000]	34100
Abscisse de transition entre tronçon 3 et 4?	[1-100000]	35600
Méthode d'estimation de la résistance?	1. Typologie de cours d'eau 2. Composantes de la résistance	2
Lit mineur tronçon 1: matériau du lit?	1. Béton 2. Terre 3. Sable 4. Gravier 5. Galets 6. Blocs rocheux	4
Lit mineur tronçon 1: irrégularités de la section?	1. Parois lisses 2. Irrégularités légères 3. Irrégularités modérées 4. Irrégularités importantes	2
Lit mineur tronçon 1: variation de la section?	1. Progressive 2. Alternant occasionnellement 3. Alternant fréquemment	1
Lit mineur tronçon 1: effet des obstructions?	1. Négligeable 2. Faible 3. Sensible 4. Très marqué	1
Lit mineur tronçon 1: quantité de végétation?	1. Négligeable 2. Faible 3. Moyenne 4. Importante 5. Très importante	1
Lit mineur tronçon 1: méandrement?	1. Modéré 1. Appréciable 1. Important	1
Lit majeur tronçon 1: matériau du lit?	1. Béton 2. Terre 3. Sable 4. Gravier 5. Galets 6. Blocs rocheux	1
Lit majeur tronçon 1: irrégularités de la section?	1. Section lisse 2. Irrégularités légères 3. Irrégularités modérées 4. Irrégularités importantes	2

*Suite page suivante*

Question	Propositions	Réponse
Lit majeur tronçon 1 : effet des obstructions?	1. Négligeable 2. Faible 3. Appréciable	1
Lit majeur tronçon 1 : quantité de végétation?	1. Faible 2. Moyenne 3. Importante 4. Très importante 5. Extrême	5
Lit mineur tronçon 2 : matériau du lit?	1. Béton 2. Terre 3. Sable 4. Gravier 5. Galets 6. Blocs rocheux	4
Lit mineur tronçon 2 : irrégularités de la section?	1. Parois lisses 2. Irrégularités légères 3. Irrégularités modérées 4. Irrégularités importantes	2
Lit mineur tronçon 2 : variation de la section?	1. Progressive 2. Alternant occasionnellement 3. Alternant fréquemment	1
Lit mineur tronçon 2 : effet des obstructions?	1. Négligeable 2. Faible 3. Sensible 4. Très marqué	1
Lit mineur tronçon 2 : quantité de végétation?	1. Négligeable 2. Faible 3. Moyenne 4. Importante 5. Très importante	1
Lit mineur tronçon 2 : méandrement?	1. Modéré 1. Appréciable	1
Lit majeur tronçon 2 : matériau du lit?	1. Important 1. Béton 2. Terre 3. Sable 4. Gravier 5. Galets 6. Blocs rocheux	1
Lit majeur tronçon 2 : irrégularités de la section?	1. Section lisse 2. Irrégularités légères 3. Irrégularités modérées 4. Irrégularités importantes	2
Lit majeur tronçon 2 : effet des obstructions?	1. Négligeable 2. Faible 3. Appréciable	1

*Suite page suivante*

Question	Propositions	Réponse
Lit majeur tronçon 2: quantité de végétation?	1. Faible 2. Moyenne 3. Importante 4. Très importante 5. Extrême	3
Lit mineur tronçon 3: matériau du lit?	1. Béton 2. Terre 3. Sable 4. Graviers 5. Galets 6. Blocs rocheux	4
Lit mineur tronçon 3: irrégularités de la section?	1. Parois lisses 2. Irrégularités légères 3. Irrégularités modérées 4. Irrégularités importantes	1
Lit mineur tronçon 3: variation de la section?	1. Progressive 2. Alternant occasionnellement 3. Alternant fréquemment	1
Lit mineur tronçon 3: effet des obstructions?	1. Négligeable 2. Faible 3. Sensible 4. Très marqué	1
Lit mineur tronçon 3: quantité de végétation?	1. Négligeable 2. Faible 3. Moyenne 4. Importante 5. Très importante	1
Lit mineur tronçon 3: méandrement?	1. Modéré 1. Appréciable 1. Important	1
Lit majeur tronçon 3: matériau du lit?	1. Béton 2. Terre 3. Sable 4. Graviers 5. Galets 6. Blocs rocheux	1
Lit majeur tronçon 3: irrégularités de la section?	1. Section lisse 2. Irrégularités légères 3. Irrégularités modérées 4. Irrégularités importantes	1
Lit majeur tronçon 3: effet des obstructions?	1. Négligeable 2. Faible 3. Appréciable	1
Lit majeur tronçon 3: quantité de végétation?	1. Faible 2. Moyenne 3. Importante 4. Très importante 5. Extrême	2

*Suite page suivante*

Question	Propositions	Réponse
Lit mineur tronçon 4 : matériau du lit?	1. Béton 2. Terre 3. Sable 4. Graviers 5. Galets 6. Blocs rocheux	4
Lit mineur tronçon 4 : irrégularités de la section?	1. Parois lisses 2. Irrégularités légères 3. Irrégularités modérées 4. Irrégularités importantes	2
Lit mineur tronçon 4 : variation de la section?	1. Progressive 2. Alternant occasionnellement 3. Alternant fréquemment	1
Lit mineur tronçon 4 : effet des obstructions?	1. Négligeable 2. Faible 3. Sensible 4. Très marqué	1
Lit mineur tronçon 4 : quantité de végétation?	1. Négligeable 2. Faible 3. Moyenne 4. Importante 5. Très importante	2
Lit mineur tronçon 4 : méandrement?	1. Modéré 1. Appréciable	1
Lit majeur tronçon 4 : matériau du lit?	1. Important 1. Béton 2. Terre 3. Sable 4. Graviers 5. Galets 6. Blocs rocheux	2
Lit majeur tronçon 4 : irrégularités de la section?	1. Section lisse 2. Irrégularités légères 3. Irrégularités modérées 4. Irrégularités importantes	2
Lit majeur tronçon 4 : effet des obstructions?	1. Négligeable 2. Faible 3. Appréciable	1
Lit majeur tronçon 4 : quantité de végétation?	1. Faible 2. Moyenne 3. Importante 4. Très importante 5. Extrême	5

*Suite page suivante*



Question	Propositions	Réponse
<i>Affichage des hydrogrammes calculé et enregistré à Thivencelle</i>		
Décalage temporel?	1. Courbe en avance 2. Courbe légèrement en avance 3. Pas de décalage 4. Courbe légèrement en retard 5. Courbe en retard	5
<i>Affichage des hydrogrammes calculé et enregistré à Thivencelle</i>		
Décalage temporel?	1. Courbe en avance 2. Courbe légèrement en avance 3. Pas de décalage 3. Courbe légèrement en retard 4. Courbe en retard	4
<i>Affichage des hydrogrammes calculé et enregistré à Thivencelle</i>		
Décalage temporel?	1. Courbe en avance 2. Courbe légèrement en avance 3. Pas de décalage 4. Courbe légèrement en retard 5. Courbe en retard	3
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Écart systématique sur le bief?	1. Oui 2. Non	2
Écart sur le tronçon 4 : position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	1
Écart sur le tronçon 4 : distance relative?	1. Courbe loin des points 2. Courbe assez loin des points 3. Courbe près des points	1
Écart sur le tronçon 4 : écart près de l'ouvrage?	1. Oui 2. Non	1
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Écart sur le tronçon 4 : position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	3
Écart sur le tronçon 4 : distance relative?	1. Courbe loin des points 2. Courbe assez loin des points 3. Courbe près des points	1
Écart sur le tronçon 4 : écart près de l'ouvrage?	1. Oui 2. Non	2
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Écart sur le tronçon 4 : position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	2
Écart sur le tronçon 3 : position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	3
Écart sur le tronçon 3 : distance relative?	1. Courbe loin des points 2. Courbe assez loin des points 3. Courbe près des points	1

*Suite page suivante*

Question	Propositions	Réponse
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Écart sur le tronçon 3: position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	3
Écart sur le tronçon 3: distance relative?	1. Courbe loin des points 2. Courbe assez loin des points 3. Courbe près des points	1
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Écart sur le tronçon 3: position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	3
Écart sur le tronçon 3: distance relative?	1. Courbe loin des points 2. Courbe assez loin des points 3. Courbe près des points	1
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Écart sur le tronçon 3: position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	3
Écart sur le tronçon 3: distance relative?	1. Courbe loin des points 2. Courbe assez loin des points 3. Courbe près des points	1
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Écart sur le tronçon 3: position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	2
Écart sur le tronçon 2: position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	1
Écart sur le tronçon 2: distance relative?	1. Courbe loin des points 2. Courbe assez loin des points 3. Courbe près des points	1
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Écart sur le tronçon 2: position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	2
Écart sur le tronçon 1: position relative?	1. Courbe au-dessus des points 2. Courbe au milieu des points 3. Courbe en-dessous des points	2
<i>Affichage de la ligne d'eau enveloppe et des niveaux d'eau maximums mesurés</i>		
Qualité de la représentation des niveaux d'eau maximums?	1. Très bonne 2. Bonne 3. Assez bonne 4. Passable 5. Médiocre	2

Suite page suivante

Question	Propositions	Réponse
<i>Affichage de la ligne d'eau et des niveaux d'eau mesurés le 14/02/02 à 14h</i>		
Qualité de la représentation des niveaux d'eau mesurés le 14/02/02 à 14h?	1. Très bonne 2. Bonne 3. Assez bonne 4. Passable 5. Médiocre	4
<i>Affichage de la ligne d'eau et du niveau d'eau mesuré le 13/02/02 à 18h</i>		
Qualité de la représentation du niveau d'eau mesuré le 13/02/02 à 18h?	1. Très bonne 2. Bonne 3. Assez bonne 4. Passable 5. Médiocre	3
<i>Affichage de d'hydrogramme calculé et du débit jaugé à Thivencelle le 13/02/02 à 18h</i>		
Qualité de la représentation du débit jaugé le 13/02/02 à 18h?	1. Très bonne 2. Bonne 3. Assez bonne 4. Passable 5. Médiocre	4
Modèle numérique : Hogneau entre le moulin de Crespin et le canal de Condé-Pommeroeul Données événementielles : crue de février 2002 Domaine d'application visé : détermination de zones inondables Niveau de correspondance attendu : bonne reproduction des niveaux d'eau maximums Valeur du modèle calé : assez bonne		







---

## Résumé

Le calage d'un modèle numérique vise à reproduire des événements de référence par l'ajustement de paramètres à base physique. Cette thèse propose une approche à l'aide de Systèmes à Base de Connaissances. Après une définition des concepts clés, sont présentés un état de l'art et une analyse des différents objets, procédures et raisonnements mis en oeuvre pour mener à bien cette tâche. Ces éléments sont formalisés puis intégrés au sein d'un système d'assistance au calage, selon trois niveaux de connaissances : génériques, propres à l'hydraulique fluviale 1-D, et spécifiques au code de calcul utilisé. Deux cas réels d'application sont traités, en fonction des données disponibles et de l'objectif projeté du modèle. La thèse a permis la capitalisation d'un savoir-faire qui a conduit à un prototype opérationnel d'assistance au calage de modèles hydrauliques et au développement d'outils d'intelligence artificielle dédiés au calage et indépendants de la discipline considérée.

## Mots-clés

Calage – modèle numérique – hydraulique fluviale – système à base de connaissances

## Abstract

Model calibration aims at simulating reference events thanks to an adjustment of physically-based parameters. This thesis proposes a knowledge-based system approach to this task. After a definition of key concepts, a state of the art and an analysis of the different objects, procedures and reasonings applied to achieve this task are presented. These elements are formalized and integrated within a computer-aided calibration support system. The knowledge is structured into three levels : generic knowledge, knowledge specific to 1D river hydraulics, and knowledge about the advanced use of the simulation code employed. Two real-life case studies are then handled on the basis of available data and intended model application. This thesis allowed the capitalization of know-how, which led to build an operational hydraulic model calibration support prototype, and to develop artificial intelligence tools both dedicated to calibration and independent from the selected scientific domain.

## Keywords

Calibration – numerical model – river hydraulics – knowledge-based system