

MÉTHODOLOGIE POUR LA CONCEPTION ET LA GESTION DES AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES À BUTS MULTIPLES PAR UNE ANALYSE SYSTÉMIQUE

THÈSE N° 3781 (2007)

PRÉSENTÉE LE 27 AVRIL 2007

À LA FACULTÉ DE L'ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT
Laboratoire de constructions hydrauliques
SECTION DE GÉNIE CIVIL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

PAR

Philippe HELLER

ingénieur civil diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Thal (SG)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. M. Hirt, président du jury
Prof. A. Schleiss, directeur de thèse
Dr F. Kienast, rapporteur
Prof. J. Königeter, rapporteur
Dr F. Maréchal, rapporteur



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Lausanne, EPFL
2007

Ce travail est dédié intégralement, pour son indéfectible soutien,

à ma très chère épouse Elisabeth

Résumé

Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples par une analyse systémique

Les échecs répétés ainsi que les difficultés liées à la mise en oeuvre de nouveaux ouvrages hydroélectriques dans les pays industrialisés montrent l'évolution du paradigme qui gère les rapports entre la société humaine et la nature. Les problèmes issus de ces ouvrages, souvent ignorés lors de la planification, ajoutés à la volonté populaire de restaurer un état naturel, nécessitent des analyses écologiques tant pour les nouvelles constructions que pour la restauration d'ouvrages ou encore la correction de cours d'eau. La prise en compte des aspects énergétiques et écologiques, joints aux aspects sécuritaires, financiers et socio-économiques, transforme la conception des ouvrages hydrauliques à buts multiples en un problème complexe. La conception, le dimensionnement et la gestion de tels aménagements nécessitent ainsi de nouvelles approches.

Le premier objectif de ce travail est la compréhension du système complexe formé par un aménagement hydroélectrique fluvial à buts multiples et la détermination de ses caractéristiques les plus importantes. Le second objectif vise à développer une méthodologie qui quantifie les impacts de l'aménagement sur les facteurs-clés du système. Le troisième objectif est une optimisation du système lui-même ainsi que la détermination d'une clé de répartition des coûts d'investissement du projet. La méthodologie comprend une première analyse qualitative du système permettant ensuite une modélisation quantitative. L'optimisation est effectuée sur la base de cette seconde modélisation. La clé de répartition des coûts est alors obtenue par comparaisons d'optimisations partielles du système.

L'analyse qualitative est effectuée à partir de la méthode développée par Gomez and Probst (1995). Celle-ci se base sur une représentation cognitive pour modéliser le comportement du système complexe et ses boucles de rétroaction entre les différents facteurs. L'analyse mathématique du réseau produit un classement de ces derniers ainsi que la mise en évidence des facteurs-clés. Dans le cas particulier de l'aménagement hydroélectrique fluvial à buts multiples, cette méthode permet de distinguer le niveau décisionnel du niveau fonctionnel. Elle souligne la variable pivot qui constitue le lien entre les deux niveaux, à savoir le débit aval. Cet aménagement a pour but de réduire le marnage, de produire de l'énergie, d'offrir un volume de rétention en cas de crue et de permettre une utilisation sociale pour les loisirs aquatiques.

La modélisation quantitative est effectuée par des modèles de simulation basés sur une gestion optimisée de l'aménagement qui détermine le débit aval. L'optimisation est effectuée par une résolution mathématique du système de contraintes à l'aide du logiciel *AMPL* de manière à réduire les variations du débit aval tout en maximisant la production énergétique. Elle conduit également à minimiser les variations du niveau d'eau dans le réservoir. Les modèles de simulation calculent ensuite les différents comportements de l'aménagement

(hydraulique, énergétique, thermique, écologique, social et financier). La gestion en situation de crue est traitée séparément, avec comme objectif de laminier la pointe de la crue par une vidange préventive de l'aménagement. Une comparaison financière de l'impact probable de différents aménagements sur les crues est effectuée par l'évaluation du gain financier lié à l'abaissement potentiel des digues aval. Une optimisation du dimensionnement des turbines, spécifiquement applicable dans le cas de niveaux d'eau amont et aval très variables, est également développée.

L'optimisation générale du système, effectuée avec l'outil d'optimisation *QMOO* (développé au Laboratoire d'énergétique industrielle - EPFL), porte sur les variables qui déterminent la taille de l'aménagement. Cette optimisation est effectuée en deux étapes. La première étape détermine, pour chaque but de l'aménagement (optimisation partielle), les conditions optimales de production du but visé. Cette étape permet de fixer une fonction de transfert entre la production optimale et l'investissement minimal. La seconde étape détermine par une optimisation complète, à l'aide des fonctions de transfert, l'ensemble des solutions optimales. Ces solutions optimales sont ensuite épurées par deux filtres successifs : le filtre synergique élimine les solutions dont la mise en commun des buts ne conduit pas à une réduction de l'investissement, alors que le filtre des acteurs élimine les solutions dont les quantités produites ou l'investissement demandé pour chaque objectif sortent des limites fixées.

La méthodologie complète, développée en 12 étapes depuis l'analyse qualitative jusqu'aux solutions finales, est appliquée à un cas d'étude sur le Rhône valaisan. Les solutions finales trouvées permettent de proposer un projet d'aménagement à buts multiples capable de satisfaire aux exigences des différents acteurs tout en générant une économie d'investissement supérieure à 10 %. Cette réduction, appelée gain synergique, est calculée par rapport à la somme des investissements optimaux des aménagements à but unique réalisés séparément. Les solutions trouvées nécessitent un investissement compris entre 150 et 180 Mio CHF. Elles permettent de produire 42 GWh/an d'électricité, de réduire le marnage actuel d'environ 30 % et offre une utilité sociale calculée à 55'000 visites annuelles. Le volume disponible pour la gestion des crues oscille entre 5 et 8 Mio m³.

Ce travail de recherche, mené au sein d'une équipe pluridisciplinaire composée d'écologues, d'architectes, d'ingénieurs civils et mécaniciens, de producteurs d'hydroélectricité et de services étatiques, a montré la pertinence de l'approche choisie qui a conduit à la faisabilité des solutions proposées. Par ailleurs, la modularité des méthodes développées (analyse qualitative, gestion du marnage, calcul probabiliste de l'impact de la rétention sur les crues, modèle de dimensionnement des turbines, optimisations partielles et complètes) offre de larges possibilités pour des utilisations partielles, pour des applications à d'autres ouvrages ou pour des développements ultérieurs.

Absorber plus de 50 % du marnage tout en ne perdant que 10 % de productivité énergétique, justifier l'impact financier de la rétention sur les crues, optimiser le dimensionnement des machines hydroélectriques dans le cas d'une double variabilité forte (débit et chute), concevoir et dimensionner de manière intégrée des solutions qui permettent, pour des aménagements à buts multiples, des économies pour chacun des objectifs sont les principaux résultats de ce travail de recherche.

Mots-clés : Aménagement hydraulique à buts multiples, Système complexe, Gestion du marnage, Gestion des crues, Simulation, Optimisation, Hydraulique, Energie, Social, Thermique, Finance, Ecologie, Aide à la décision, Clé de répartition des coûts.

Abstract

Methodology for planning and management of multipurpose hydraulic schemes with a system thinking approach

Repeated failures as well as difficulties related to the implementation of new hydroelectric powerplants in industrialized countries illustrate the paradigm evolution which manages relationship between human society and nature. Problems resulting from these plants, often ignored during planning phases, in addition to the current trend to restore a natural state, require ecological analyses for new constructions as well as for scheme restoration or river corrections. Taking into account energy and ecology, together with security, financial and socio-economical aspects, transforms the design of hydraulic schemes into complex problems. Designing, dimensioning and managing in an integrated way such multipurpose hydraulic schemes thus require new approaches.

The first objective of the present work is the comprehension of the complex system formed by a multipurpose hydraulic scheme and the determination of its most important characteristics. The second objective aims at developing a methodology to quantify the installation impacts on the key factors of the system. The third objective is an optimization of the system itself as well as the determination of the distribution of the cost between the various purposes. The developed methodology first includes a qualitative analysis of the system which then allows a quantitative modelling. Optimization is carried out on the basis of this second modelling. The cost distribution is finally obtained by comparison of partial optimizations of the system.

The qualitative analysis is carried out starting from the method developed by Gomez and Probst (1995) which is based on a cognitive representation in order to model the complex system behavior. This representation includes feedback loops between the various factors. The mathematical analysis of the network classifies these factors and highlights the most important ones (key factors). In the particular case of the multipurpose run-of-river hydroelectric scheme, this method distinguishes the decisional level from the functional level. It underlines the variable, namely the downstream flow, which constitutes the bond between the two levels. The purposes of this project are to reduce hydropeaking, to produce energy, to offer a retention volume for flood mitigation and to allow a social use for leisure activities.

Quantitative modelling is carried out by simulation models, considering an optimized operation of the reservoir which determines the downstream flow. This optimization is performed by a mathematical resolution using the software *AMPL*. It includes the constraints to reduce the downstream flow variations with the objective of maximizing energy production. It also results in minimal reservoir water level variations. The simulation models then calculate the scheme behaviors (hydraulic, energy, thermal, ecological, social and financial). The flood management is treated separately, with the objective of reducing the flood peak by preven-

tive draining of the reservoir. A financial comparison of the probable impact of retention on peak floods is carried out by evaluating the potential of lowering downstream dams. An optimization of the turbine dimensioning, specifically applicable in case of highly variable water levels (upstream and downstream) and flow discharge, is also developed.

The general optimization of the system, performed with the optimization tool *QMOO* (developed at the Industrial Energy Systems Laboratory - EPFL), is related to variables which determine the size of the scheme. This optimization is carried out in two stages. The first stage determines, for each goal of the system (partial optimization), the optimum production conditions of the set goal. This stage defines a transfer function between the optimal production and the minimal investment. The second stage determines, by a complete optimization using the transfer functions, the set of optimal solutions. These optimal solutions are then filtered by two successive filters : the synergistic filter eliminates solutions which do not reduce the investment, whereas the filter of the actors eliminates solutions which produce quantities below the limit or which require investment above the fixed limit.

The complete methodology, developed in 12 steps from the qualitative analysis to the final set of solutions, is applied to a study case on the Swiss Upper Rhone River. The solutions found are able to satisfy the requirements of the various actors while generating a saving on investment higher than 10 %. This reduction, called synergistic profit, is compared to the sum of the optimal investments of a single purpose scheme carried out separately. The solutions found require an investment in the range of 150 to 180 Mio CHF. They allow producing 42 GWh/yr of electricity, reducing the current hydropeaking by approximately 30 % and offering a social impact calculated at 55'000 visits per year. The available volume for flood management oscillates between 5 and 8 Mio m³.

This research work, carried out within a team of ecologists, architects, civil and mechanical engineers, producers of hydroelectricity and public authorities, showed the relevance of the selected approach which led to the feasibility of the suggested solutions. In addition, the modularity of the developed methods (qualitative analysis, hydropeaking management, probabilistic retention impact on flood peaks, optimisation of turbine dimensioning, partial and complete optimizations) allow a wide range of possibilities for partial use, for applications to other works or for future developments.

The principal results of this research can be defined as follows : 1) an operation method is developed in order to absorb more than 50 % of the current hydropeaking while losing less than 10 % of the energy potential, 2) the financial retention impact on flood peak is justified, 3) turbine dimensions are optimized in case of strong variability on both flow and head, 4) conception and dimension of multipurpose schemes are performed in an integrated way and lead to solutions which allow cost saving for each objective.

Key-words : Multipurpose hydraulic scheme, Complex system, Hydropeaking mitigation, Flood mitigation, Simulation, Optimization, Hydraulic, Energy, Social, Thermal, Finance, Ecology, Decision support system tool, Cost distribution.

Zusammenfassung

Methodik für die Planung und den Betrieb eines Mehrzweckprojektes an Flüssen durch eine Systemanalyse

Rückschläge und Schwierigkeiten im Zusammenhang mit dem Bau neuer Laufwasserkraftwerke in Industrieländern verdeutlichen die Entwicklung des Paradigmas, welches die Beziehungen zwischen der Gesellschaft und der Natur widerspiegelt. Probleme bei der Erneuerung und der Planung wasserbaulicher Anlagen dieser Art werden heutzutage häufig ignoriert und entgegen des Volkswillens, einen naturnahen und ökologisch wertvollen Zustand der Gewässer zu erhalten, durchgesetzt. Die Berücksichtigung energetischer, ökologischer und sicherheitstechnischer Aspekte sowie finanzielle und sozioökonomische Faktoren führen dazu, dass die Konzeption eines Mehrzweckprojektes zu einem hochgradig komplexen System führt. Die Planung und der Betrieb Projekte dieser Art erfordert daher neue und innovative Herangehensweisen.

Die erste Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, ein komplexes System wie es ein Mehrzweckprojekt an Flüssen darstellt, zu verstehen und die wichtigsten Systemeigenschaften zu identifizieren. Des Weiteren gilt es, einen Lösungsansatz zu entwickeln, der die Nutzung einer solchen Anlage sowohl als Hochwasserschutzelement als auch als Freizeitelement erlaubt. Die zweite Zielsetzung basiert darauf, eine Methodik zu entwickeln, welche die Auswirkungen des Projektes auf die Schlüsselfaktoren des Systems quantifiziert. Die dritte Zielsetzung dient der Optimierung des Systems selbst sowie der Bestimmung eines Schlüssels zur Verteilung der Investitionskosten eines Mehrzweckprojektes. Die Methodologie umfasst eine erste qualitative Analyse des Systems, welche im Anschluss daran eine quantitative Modellierung erlaubt. Die Optimierung wird auf Grund der quantitativen Modellierung durchgeführt. Der Kostenverteilungsschlüssel wird dann durch den Vergleich partieller Optimierungen des Systems erhalten.

Die qualitative Analyse erfolgt anhand einer Methode, welche von Gomez and Probst (1995) entwickelt wurde. Diese basiert sich auf einer Erkennungsmatrix, das komplexe Systemverhalten zu modellieren und Rückkopplungseffekte zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren zu erfassen. Die mathematische Analyse der Einflussparameter generiert eine Klassierung dieser Faktoren sowie die Hervorhebung von Schlüsselfaktoren. Im speziellen Fall von Mehrzweckprojekten an Flüssen erlaubt diese Methode, zwischen einer Entscheidungsebene und einer funktionellen Ebene zu unterscheiden. Die Variable, welche die Verbindung zwischen den zwei Ebenen darstellt, wird gesondert hervorgehoben. Sie beschreibt die abzugebende Wassermenge aus dem Mehrzweckspeicher. Die Hauptziele dieses Mehrzweckspeichers sind die Reduktion von Schwall und Sunk, Energieproduktion, potentielle Hochwasserschäden zu vermeiden und eine Freizeitnutzung zu ermöglichen.

Das quantitative Modell besteht aus Simulationsmodellen, welche untereinander verbunden sind und eine optimierte Abflussabgabe nach unterstrom zum Ziel haben. Die Optimie-

rung wird mittels einer mathematischen Lösung der Randbedingungen des Systems anhand der Software *AMPL* durchgeführt. Sie hat zum Ziel, die Variation der Abflusswassermenge hinsichtlich des Zuflusses zu reduzieren und gleichzeitig die Energieproduktion zu maximieren. Die Optimierung führt ebenfalls dazu, die Schwankungen des Wasserspiegels im Speicher zu minimieren. Die Simulationsmodelle berechnen danach die Reaktion der Anlage hinsichtlich Hydraulik, Energetik, Temperatur, Ökologie, Sozioökonomie und Kosten. Der Betrieb im Hochwasserfall wird getrennt behandelt. Die Zielsetzung ist hierbei, die Spitze des Hochwassers durch eine präventive Entleerung zu glätten. Der finanzielle Vergleich des möglichen Einflusses eines Mehrzweckspeichers hinsichtlich eines Hochwassers erfolgt mittels einer Bewertung des finanziellen Gewinns einer potentiellen Reduktion der Höhe der Hochwasserschutzdämme. Darüber hinaus ist ein Optimierungstool für eine effiziente Turbinenbemessung hinsichtlich stark variabler Wasserstände zwischen Ober- und Unterwasser entwickelt worden.

Die allgemeine Optimierung des Systems, welche mit dem Optimierungsalgorithmus *QMOO* (entwickelt an der LENI-EPFL), durchgeführt wird, bezieht sich auf die Variablen, die die Grösse der Anlage bestimmen. Diese Optimierung erfolgt in zwei Schritten. Im ersten Schritt werden für jedes Ziel der Anlage (partielle Optimierung) die optimalen Bedingungen hinsichtlich des anvisierten Zieles bestimmt. Dieser Schritt ermöglicht die Bestimmung einer Übertragungsfunktion zwischen den optimalen Bedingungen und den minimalen Investitionskosten. Im zweiten Schritt erfolgt die vollständige Optimierung mittels der Übertragungsfunktionen für die Gesamtheit der optimalen Lösungen der Anlage. Anhand zwei aufeinanderfolgende Filter erfolgt eine Selektion der optimalen Lösungen. Der synergetische Filter eliminiert die Lösungen, welche für die Gesamtheit der Ziele nicht zu einer Reduktion der Investitionskosten führen. Der zweite Filter eliminiert die Lösungen, für die die Produktionsmengen oder die erforderlichen Investitionen eine zuvor festgelegte Grenze überschreiten.

Die vollständige Methodologie, die in zwölf Etappen von der qualitativen Analyse bis hin zur endgültigen Lösung entwickelt wurde, wird abschliessend in einer Fallstudie für die Rhone im Wallis, Schweiz, angewendet. Die Resultate zeigen die Möglichkeit auf, ein Mehrzweckprojekt zu realisieren, welches den Forderungen verschiedener Interessenvertreter nachkommt und gleichzeitig 10% geringere Investitionskosten erfordert. Diese Reduktion, als synergetischer Gewinn bezeichnet, wird hinsichtlich der Summe der optimalen Investitionen von getrennt verwirklichten Anlagen mit dem gleichen Ziel berechnet. Die gefundene Lösung verlangt Investitionen zwischen 150 und 180 Mio CHF und ermöglicht, 42 GWh Elektrizität pro Jahr zu produzieren, die Schwall- und Sunkraten um etwa 30% zu reduzieren und ein Freizeitangebot für jährlich 55'000 Nutzer anzubieten. Das verfügbare Volumen für den Hochwasserschutz beläuft sich auf 5 bis 8 Million Kubikmeter.

Diese Forschungsarbeit, welche innerhalb eines interdisziplinären Teams von Biologen, Architekten, Bau- und Maschinenbauingenieuren, Elektrizitätserzeugern sowie kantonalen und staatlichen Stellen angefertigt wurde, zeigt die Relevanz des entwickelten Konzeptes auf, mit dem in der Praxis realisierbare Lösungen entwickelt werden können. Der modulare Charakter des entwickelten Modells (qualitative Analyse, Schwall und Sunk Reduktion, Wahrscheinlichkeitsberechnung der Auswirkung einer präventiven Vorabsenkung zum Hochwasserschutz, Modell zur Dimensionierung geeigneter Turbinen, partielle und vollständige Optimierung), stellt eine breite Anwendungsbasis dar und bietet zudem Möglichkeiten für partielle Benutzungen, Anwendungen auf andere Anlagen sowie für zukünftige Entwicklungen.

Abschliessend lassen sich die Ergebnisse der Forschungsarbeit wie folgt zusammenfassen : Schwall und Sunkerscheinungen können um mehr als 50% reduziert werden bei einer

nur um 10 % geringeren Energieproduktion; potentielle Hochwasserretention und erhöhte Abflusskapazität können monetär verglichen werden; die Auslegung der hydroelektrischen Maschinen ist für den Fall beträchtlicher Schwankungen (Abfluss, Fallhöhe) optimiert worden; die Optimierungen erlauben die Bestimmung von Einsparpotentialen bei der Planung und Bemessung von Mehrzweckprojekten.

Schlüsselworte : Hydraulisches Mehrzweckprojekt, komplexes System, Schwall und Sunk, Hochwasserschutz, Simulation, Optimierung, Hydraulik, Energie, Sozioökonomie, Temperatur, Finanzierung, Ökologie, Entscheidungsfindung, Kostenaufteilung.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	iii
Zusammenfassung	v
1 Introduction	1
1.1 Prologue	1
1.2 Buts possibles d'un aménagement hydraulique	2
1.3 Approche systémique	3
1.4 Contexte et limites du cas d'étude	4
1.4.1 Hydraulique	4
1.4.2 Ecologie	4
1.4.3 Paysage et loisirs	5
1.4.4 Energie	5
1.4.5 Bassin versant du Rhône	5
1.5 Buts et aménagement proposé	6
1.5.1 Buts généraux retenus	6
1.5.2 Concept de l'aménagement proposé	8
1.5.3 Définition de la <i>hauteur utile</i>	9
1.6 Projet Synergie et buts spécifiques de ce travail de recherche	11
1.6.1 Projet Synergie	11
1.6.2 Buts spécifiques de ce travail de recherche	12
1.6.3 Mesures techniques	12
1.6.4 Clé de répartition des coûts	13
1.6.5 Outil d'aide à la discussion	13
1.7 Organisation du document	13
2 Méthodes qualitatives d'aide à la décision : Etat des connaissances	15
2.1 Introduction	15
2.2 Méthodes participatives	16
2.3 Méthodes dites <i>d'experts</i>	17
2.4 Modélisation : dynamique des systèmes	18
2.5 Méthodes mixtes	21
2.5.1 Logique floue	21
2.5.2 Méthodes multicritères	22
2.6 Synthèse des méthodes abordées	23
2.7 Conclusions	24
3 Méthodes quantitatives d'aide à la décision : Etat des connaissances	25
3.1 Introduction	25
3.2 Modélisation quantitative	26

3.2.1	Modélisation	26
3.2.2	Simulation	28
3.2.3	Lien vers l'optimisation	29
3.3	Modèles d'optimisation	30
3.3.1	Méthodes mathématiques d'optimisation	31
3.3.2	Méthodes heuristiques d'optimisation	33
3.4	Commentaires	40
3.5	Conclusions	41
4	Analyse qualitative effectuée sur la base de la méthode de Gomez & Probst	43
4.1	Introduction	43
4.2	Méthode qualitative de Gomez & Probst	43
4.2.1	Rappel de la méthode	43
4.2.2	Développements apportés à la méthode de Gomez & Probst	47
4.2.3	Application de la méthode qualitative au Rhône valaisan	48
4.2.4	Analyse de sensibilité de la méthode de Gomez & Probst	51
4.2.5	Résultats de la méthode de Gomez & Probst	54
4.3	Logiciel <i>PACEVs</i>	59
4.3.1	Développements du logiciel <i>PACEVs</i>	59
4.3.2	Application à la Drance de Bagnes et résultats du logiciel <i>PACEVs</i>	60
4.4	Conclusions	64
5	Analyse quantitative : modèles de simulation	67
5.1	Introduction	67
5.2	Choix de l'année de référence pour la simulation : 1993	68
5.2.1	Analyse du volume annuel écoulé	68
5.2.2	Analyse horaire de la courbe des débits classés	69
5.2.3	Analyse horaire de la courbe des niveaux classés	69
5.2.4	Analyse de la température hydrique	69
5.2.5	Analyse de la température de l'air	70
5.2.6	Choix de l'année de référence	70
5.3	Choix du lieu de la station de jaugeage : Branson	71
5.4	Modèles de gestion : Optimisation de la gestion ordinaire	72
5.4.1	Objectifs de la gestion ordinaire	72
5.4.2	Modèles développés de gestion	72
5.4.3	Choix du modèle de gestion ordinaire	82
5.4.4	Application du modèle de gestion optimisée au cas d'étude	82
5.5	Modèles de gestion des crues	85
5.5.1	Etude CONSECRU 2, débits de crue	85
5.5.2	Etablissement de la courbe de tarage	87
5.5.3	Modèles développés de gestion des crues	89
5.5.4	Méthodes de calcul des gains liés à la rétention	92
5.5.5	Application de la méthode de gestion des crues au cas d'étude	95
5.6	Modèle de simulation hydraulique de l'aménagement	97
5.6.1	Modèle développé de simulation hydraulique du réservoir	97
5.6.2	Validation du modèle hydraulique	97
5.6.3	Variables internes d'entrée et sortie du modèle hydraulique	98
5.6.4	Application du modèle hydraulique au cas d'étude	98
5.7	Modèle de simulation thermodynamique de l'aménagement	100
5.7.1	Objectifs des modèles thermodynamiques	100

5.7.2	Brève revue littéraire sur les modèles thermiques	100
5.7.3	Modèles thermodynamiques développés	101
5.7.4	Variables internes d'entrée et sortie des modèles thermodynamiques	107
5.7.5	Validation du modèle thermique : Systèmes lentiques et lotiques	107
5.7.6	Application du modèle thermique au cas d'étude	113
5.7.7	Analyse de sensibilité du modèle thermique	113
5.7.8	Application du modèle de condensation au cas d'étude	115
5.7.9	Analyse de sensibilité du modèle de condensation	116
5.8	Modèle de simulation énergétique : Dimensionnement et production	117
5.8.1	Objectifs du modèle de dimensionnement des machines	117
5.8.2	Modèle de dimensionnement des machines	117
5.8.3	Application du modèle de dimensionnement au cas d'étude	121
5.8.4	Analyse de sensibilité du modèle de dimensionnement	122
5.8.5	Variables internes d'entrée et sortie du modèle de dimensionnement	124
5.8.6	Rendement global et production des machines hydromécaniques	125
5.9	Modèles sociaux : attractivité et valeur des loisirs aquatiques	126
5.9.1	Objectifs des modèles sociaux	126
5.9.2	Brève revue littéraire sur l'évaluation socio-économique	126
5.9.3	Modèle développé pour le calcul de la valeur sociale	128
5.9.4	Modèle développé pour le calcul de fréquentation	129
5.9.5	Variables internes d'entrée et sortie des modèles sociaux	131
5.9.6	Application des modèles sociaux au cas d'étude	132
5.10	Modèles financiers : Estimation de l'investissement et des revenus	137
5.10.1	Objectifs des modèles financiers	137
5.10.2	Modèle développé d'estimation de l'investissement	137
5.10.3	Variables internes d'entrée et sortie du modèle d'investissement	143
5.10.4	Modèles de calcul des revenus	143
5.10.5	Variables internes d'entrée et sortie du modèle des revenus	143
5.10.6	Application des modèles financiers au cas d'étude	143
5.10.7	Première clé de répartition des coûts	145
5.11	Modèle écologique	147
5.11.1	Objectifs du modèle écologique	147
5.11.2	Variables internes d'entrée et sortie du modèle écologique	147
5.11.3	Corrélation avec les indicateurs de marnage	148
5.12	Conclusions	151
6	Méthodologie développée pour la sélection des solutions	153
6.1	Introduction	153
6.2	Organisation structurelle de l'optimisation	154
6.2.1	Variables d'optimisation	154
6.2.2	Calcul de la performance	156
6.2.3	Fonctions objectif	157
6.2.4	Outil d'optimisation	160
6.2.5	Organigramme complet de l'outil de calcul	161
6.3	Génération de solutions optimales	161
6.3.1	Concept de Pareto	161
6.3.2	Outil d'optimisation <i>QMOO</i>	163
6.4	Optimisations et clé de répartition des coûts	165
6.4.1	Difficultés liées au nombre d'objectifs	165
6.4.2	Combinaison d'optimisations	165

6.5	Filtre synergique et définition de la synergie	169
6.6	Clé de répartition des coûts	170
6.7	Filtres des acteurs	171
6.8	Synthèse de la méthodologie développée	171
6.9	Conclusions	172
7	Application de la méthodologie au cas d'étude sur le Rhône valaisan	175
7.1	Introduction	175
7.2	Etapas qualitatives de l'analyse du projet	175
7.3	Etapas quantitatives communes de l'analyse du projet	176
7.4	Etapas quantitatives propres à la variante théorique large	177
7.4.1	Objectifs de la variante large	177
7.4.2	Définition et contraintes de la variante large	177
7.4.3	Optimisation partielle, énergie, variante large	177
7.4.4	Optimisation partielle, crue, variante large	180
7.4.5	Optimisation partielle, marnage, variante large	183
7.4.6	Optimisation partielle, loisirs, variante large	185
7.4.7	Optimisation globale de la variante large	186
7.4.8	Filtre synergique de la variante large	188
7.4.9	Filtres des acteurs de la variante large	188
7.4.10	Résultats obtenus pour la variante large avec l'année 1993	191
7.4.11	Résultats obtenus pour la variante large avec l'année 1999	192
7.4.12	Agrégation des résultats obtenus pour la variante large	194
7.5	Etapas quantitatives propres à la variante théorique réduite	198
7.5.1	Objectif de la variante réduite	198
7.5.2	Définition et contraintes de la variante réduite	198
7.5.3	Optimisation partielle, énergie, variante réduite	199
7.5.4	Optimisation partielle, crue, variante réduite	199
7.5.5	Optimisation partielle, marnage, variante réduite	199
7.5.6	Optimisation partielle, loisirs, variante réduite	200
7.5.7	Optimisation globale de la variante réduite	200
7.5.8	Résultats obtenus pour la variante réduite	200
7.5.9	Agrégation des résultats obtenus pour la variante réduite	201
7.6	Modifications liées à la comparaison des années et des objectifs	204
7.7	Etapas quantitatives propres à la variante étudiée de Riddes	205
7.7.1	Objectifs de la variante Riddes	205
7.7.2	Définition et contraintes de la variante Riddes	205
7.7.3	Optimisation partielle, énergie, variante Riddes	207
7.7.4	Optimisation partielle, crue, variante Riddes	209
7.7.5	Optimisation partielle, marnage, variante Riddes	210
7.7.6	Optimisation partielle, loisirs, variante Riddes	210
7.7.7	Optimisation globale de la variante Riddes	211
7.7.8	Résultats obtenus pour la variante Riddes	211
7.7.9	Agrégation des résultats obtenus pour la variante Riddes	212
7.8	Solutions finales retenues	216
7.9	Conclusions	218
8	Conclusions et Perspectives	221
8.1	Préambule	221
8.2	Aspects qualitatifs	222

8.3	Aspects quantitatifs	223
8.4	Méthodologie développée	223
8.5	Application au cas d'étude de Riddes	225
8.6	Innovations de ce travail	225
8.7	Perspectives	226
8.8	Le mot de la fin	228
	Remerciements	229
	Liste des figures	231
	Liste des tableaux	235
	Notations	239
	Références	245
	Annexes	257
	<i>Curriculum Vitae</i>	281

1 Introduction

La vie n'est guère que de l'eau organisée

(Paul Valéry, 1957)

1.1 Prologue

Dès l'origine du monde, l'eau occupe une place centrale. Le récit biblique, avant même la vie, la répartit dans trois régions : au ciel, dans les mers et sur la terre. S'il lui fixe ainsi des frontières solidement établies, il lui laisse cependant sur terre toute liberté pour divaguer. Dès lors, comme l'histoire le montre, l'humanité n'a de cesse de rechercher sa juste place à son égard.

Sur le plan mythologique, l'Homme attribue à l'eau une place prépondérante. Avec Poseidon, l'un des douze dieux olympiens, il lui montre son respect. A travers un grand nombre de dieux secondaires, de demi-dieux et d'histoires épiques, il souligne la préoccupation qu'il en a. Les quinze Naiades sont, par exemple, spécifiquement chargées de veiller sur les eaux douces.

Sur le plan intellectuel aussi, la philosophie grecque, dès ses débuts avec Empédocle d'Agrigente, reconnaît à l'eau ses droits et lui accorde une place de choix. Comme la terre, le feu et l'air, elle possède le statut d'élément fondamental. L'eau occupe même généralement la première place. Dans d'autres systèmes de décomposition, l'eau est toujours présente. L'astrologie chinoise la juxtapose à l'or, le bois, le feu et la terre. La pensée japonaise lui associe la foudre, le vent, le feu et la terre. Dans le système bouddhiste, elle côtoie la terre, le feu et le vent.

La pensée scientifique doit attendre les expériences d'Antoine Laurent Courvoisier en 1774 pour remettre en cause ce mode d'explication de la matière. Il effectue un pas supplémentaire et décompose un élément fondamental en d'autres plus petits. Ses expériences lui permettent de comprendre la composition chimique de l'eau et ses propriétés. Pour la première fois, il met en évidence la notion d'atome.

De manière pragmatique, conscient de sa dépendance à l'eau douce, l'humanité en recherche la proximité. Paul Valéry (1957) résume encore cette constatation de manière lapidaire : *Où l'eau existe, l'homme se fixe*. L'impétuosité des réseaux hydriques forcent cependant le respect. L'histoire de l'Égypte et son rapport avec le Nil synthétisent simultanément cette crainte et ce besoin.

La civilisation apporte toutefois à l'humanité de nouveaux moyens. La coordination d'une main d'oeuvre abondante et organisée donne ainsi à la Chine antique la possibilité de gérer ses immenses fleuves et son alimentation en eau. Les progrès modernes de la technique ouvrent également de nouvelles opportunités et la possibilité accrue d'agir sur les réseaux hydriques. Ainsi, le rapport de subordination de l'Homme à la nature s'amenuise et le

contrôle des flots devient possible. Ce dernier voit un succès certain lorsqu'il entreprend de dompter les eaux pour produire de l'énergie, éviter des débordements ou irriguer ses cultures.

Ces succès restent cependant mitigés. Les grandes crues en Europe des vingt dernières années ont montré les limites des travaux d'endiguement effectués. L'appauvrissement écologique des rivières incite également à entrevoir des impacts négatifs jusqu'ici ignorés. Enfin, dans le monde occidental, la sensibilisation accrue au développement et à la gestion durable qui prévaut aujourd'hui montre les limites des travaux antérieurs.

Concevoir et gérer un aménagement fluvial dans le respect de la nature tout en maximisant les profits pour l'homme nécessitent de nouvelles solutions. Pour satisfaire à ces exigences, des méthodes novatrices doivent ainsi être développées. Intégrer un paradigme nouveau ou simplement apporter une évolution supplémentaire dans les rapports de l'Homme à l'eau est l'objectif du présent travail.

1.2 Buts possibles d'un aménagement hydraulique

Parallèlement à la sensibilité croissante aux problèmes écologiques, les changements climatiques supposés montrent des situations météorologiques extrêmes aggravées. Ces changements nécessitent, pour des raisons sécuritaires, d'importants travaux sur les cours d'eaux. Par ailleurs, l'espace laissé aux réseaux hydrologiques a fortement diminué durant le XX^{ème} siècle. Les populations ainsi que leurs infrastructures sont installées à proximité des rivières ce qui rend leurs débordements d'autant plus inacceptables.

Dans les pays développés, l'implantation d'aménagements hydroélectriques est devenue difficile. Les milieux écologiques, sociaux ou politiques dénoncent souvent des projets très intéressants, mais seulement analysés d'un point de vue technique et économique. Pour répondre à cette problématique, de nombreuses méthodes participatives ont été développées. Elles incluent, dès les premières phases du projet, l'ensemble des partenaires potentiels. Ces méthodes ont pour but d'aboutir à un compromis raisonnable entre les souhaits de chacun des partenaires. Pour ce faire, elles favorisent les projets à buts multiples.

Selon la spécificité du problème à résoudre, la littérature classe les buts possibles d'un aménagement hydraulique dans diverses catégories. Flug et al. (2000) distinguent les buts traditionnels (énergie et protection contre les crues), les buts environnementaux et les buts liés aux riverains. Netto et al. (1996) discernent, selon les acteurs concernés, les buts économiques (agriculture et production d'énergie), les buts liés aux riverains (production d'eau potable) et les buts écologiques (qualité et quantité d'eau résiduelle dans la rivière). Cai et al. (2004) différencient les impacts sociaux, économiques et environnementaux, les analyses hydrauliques et hydrologiques ainsi que les contraintes institutionnelles. Ailleurs, les mêmes auteurs (Cai et al., 2003), dans une vision plus large, distinguent les aspects techniques, économiques, environnementaux, sociaux et légaux. Cardwell et al. (1996) citent, sans classement, les objectifs de production énergétique, d'eau potable, d'irrigation, de contrôle des crues, de loisirs aquatiques (kayak, voile et pêche) ainsi que le maintien de l'intégrité écosystémique du cours d'eau.

Le classement des différents buts selon leur objectif principal permet ainsi de distinguer les buts socio-économiques (hydroélectricité, protection contre les crues, irrigation, navigation et pêche professionnelle), les buts purement sociaux (production d'eau potable, activités de

loisirs aquatique, intégration paysagère ou aménagement des rives) ainsi que les buts écologiques (restauration de régimes hydraulique, thermique et sédimentaire naturels, création de biotopes aquatiques de type lenticule ou lotique, qualité d'eau). Les relations qui existent entre les différents types de réservoir et les différents objectifs peuvent être schématisées par la figure 1.1.

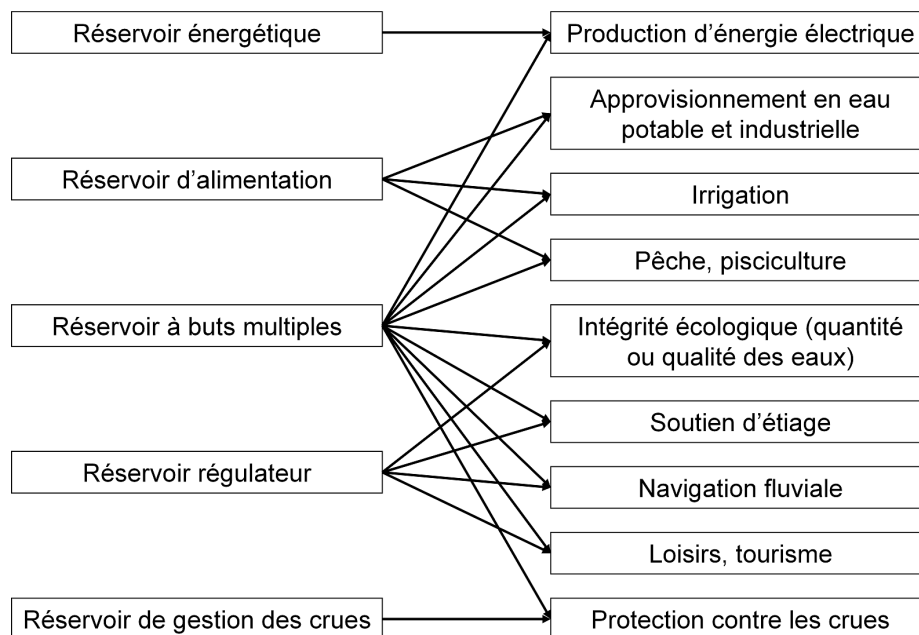


FIG. 1.1: Affectation des réservoirs selon leurs objectifs

1.3 Approche systémique

Dans la majorité des cas, les aménagements hydrauliques sont conçus comme des ouvrages à but unique. Les constructions montrent ainsi des aménagements à but énergétiques (barrage au fil de l'eau ou avec rétention), des aménagements pour laminer les crues ou, à l'inverse, pour soutenir un débit d'étiage (à des fins de loisirs aquatique ou de navigation). Des aménagements ont également été conçus pour stocker de l'eau à des fins de consommation ou d'irrigation.

Il arrive cependant qu'un ouvrage conçu spécifiquement pour un but puisse permettre, de manière opportuniste et conjointe, la réalisation d'un autre but. On parle alors déjà de buts multiples (UN, 1972). Il arrive également que la réalisation d'un projet conduise à des impacts négatifs négligés dans un premier temps. Les solutions à trouver ensuite pour minimiser ces impacts peuvent également conduire à des compromis qui transforment le projet initial en un ouvrage à buts multiples (Schlüter et al., 2005).

La prise en considération de différents buts au sein d'un même modèle nécessite une approche pluridisciplinaire. Cette démarche fait appel à des sciences très différentes tant par les objets qu'elle traite (hydraulique, hydrologie, écologie, énergie, sciences sociales,...) que par les buts qu'elle se propose (économie, finance, tourisme, sécurité...). Les liens étroits d'interdépendance qui existent entre les différentes parties forment alors un système complexe (Schleiss, 2001). La conception d'un ouvrage à buts multiples ne peut donc, a priori, plus s'effectuer de manière partielle et séquentielle (Gomez and Probst, 1995). Les

boucles de rétroaction, pour qu'elles puissent être considérées, nécessitent en effet une approche globale (Forrester, 2003). A plus forte raison, l'optimisation combinée de la conception et de la gestion d'un tel ouvrage requiert une approche identique.

1.4 Contexte et limites du cas d'étude

Afin de baser la réflexion dans une réalité constructive, il est nécessaire de choisir un contexte d'application. Fixer certains ordres de grandeur est également nécessaire pour incarner les différents concepts élaborés dans ce projet de recherche. Les bornes ainsi fixées réduisent l'espace des solutions (Irniger, 2000; Bollaert et al., 2000). Les modèles de simulations développés dans cette recherche sont donc limités à ce contexte. La réflexion globale qui traverse ce travail reste cependant générale et directement transposable à d'autres contextes. Le choix du cas d'étude est directement lié, par le financement même de ce travail de recherche, au Rhône valaisan.

Cette rivière présente actuellement un certain nombre de problèmes. La résolution de ces derniers constitue un potentiel certain de réhabilitation ou de développement.

1.4.1 Hydraulique

Comme la crue de l'automne 2000 l'a rappelé (Schleiss, 2004), le premier problème du Rhône est son déficit de capacité hydraulique. Deux types de mesures sont possibles. Le premier type de mesures cherche à augmenter la capacité du fleuve et se base sur le concept d'élargissement du lit. Le second type de mesures cherche à écrêter la crue et se base sur le concept de rétention.

Le second problème hydraulique du Rhône est le marnage artificiel, parfois appelé éclusée. Pour répondre à la demande d'énergie de pointe et ainsi maximiser leurs bénéfices, les centrales hydroélectriques génèrent de grandes variations de débit. En conséquence, le niveau du Rhône varie quotidiennement en hiver dans une tranche qui avoisine 1 mètre. Le seul moyen de laminier ce marnage, sans modifier l'exploitation des centrales, est de créer un volume de rétention à l'aval. Ce bassin doit stocker les pointes de débit et soutenir le débit d'étiage. Il peut être situé à la sortie des turbines ou sur le Rhône directement.

1.4.2 Ecologie

Le Rhône présente un déficit important au niveau écologique. Depuis sa première correction (fin du XIX^{ème} siècle), celui-ci est presque totalement endigué afin de majorer la capacité hydraulique. Pour des considérations hydrauliques et économiques, les digues du lit mineur sont rectilignes avec une pente constante. Le profil transversal des vitesses d'écoulement varie ainsi très peu. Le développement des différentes espèces nécessaires à la chaîne alimentaire s'en trouve perturbé. Le potentiel de vie aquatique est dès lors fortement diminué. Par ailleurs, la végétation riveraine du lit majeur n'existe pas. Elle est régulièrement élaguée pour des raisons de sécurité.

A cet effet négatif, le marnage ajoute une composante aggravante. La ligne d'eau varie trop brusquement pour permettre un développement harmonieux de la vie à l'écotone du fleuve.

Les basses températures du Rhône en été nuisent également à la vie aquatique ainsi qu'à la végétation riveraine (Meier, 2002; Meile et al., 2005). Cet abaissement thermique s'explique par le stockage de l'eau en haute altitude et par l'absence de réchauffement dans le réseau hydrographique (lorsqu'elle transite dans les conduites forcées). La transformation de l'énergie potentielle en énergie électrique n'est qu'une explication marginale.

1.4.3 Paysage et loisirs

Pour des raisons similaires à celles présentées ci-dessus, le paysage riverain du Rhône est fortement appauvri. Sa géométrie rectiligne uniforme renforce l'image d'un cours d'eau artificiel. L'absence de végétation naturelle, conjointement à des berges pentues, est certainement un critère prépondérant quant à l'absence d'activités sociales autour du fleuve.

Par ailleurs, pour des raisons de salubrité, le Rhône a toujours été perçu négativement, notamment avant sa première correction (Valais, 2005). De ce fait, les villes et les villages de la plaine ont eu tendance de se développer à son écart. La volonté d'intégrer le Rhône pour des activités de loisirs s'inscrit ainsi dans une tendance plutôt novatrice.

1.4.4 Energie

La consommation d'électricité ne cesse d'augmenter malgré la mise en place de programmes d'économie (+2%/an en Suisse). La construction de nouvelles centrales nucléaires est actuellement peu pensable dans le monde politique, bien que, en Suisse, les récents développements en la matière laissent entrevoir un changement de direction stratégique. Par ailleurs, la production d'énergie électrique par des centrales thermiques n'est pas souhaitable à long terme. Le potentiel hydroélectrique du Rhône demeure donc intéressant. Il s'agit d'une énergie renouvelable qui est facilement exploitable.

1.4.5 Bassin versant du Rhône

Le bassin versant de l'intégralité du Rhône suisse supérieur (à son entrée dans le lac Léman) totalise une surface de 5'530 km² répartie sur des altitudes comprises entre 370 m.s.m. et 4'600 m.s.m avec un cours d'eau principal de 160 km de long. Situé intégralement dans les alpes, ce bassin versant possède un régime hydrologique naturel de type glacio-nival. Ce régime tend actuellement plutôt vers un type nival de transition. La figure 1.2 situe le Rhône suisse supérieur et son bassin versant dans son contexte géographique.

Le cours d'eau principal, le Rhône, a été fortement canalisé à deux reprises, lors de sa première correction à la fin du XIX^{ème} siècle et de sa seconde correction au milieu du XX^{ème} siècle. Actuellement un projet est en cours pour une troisième correction (DTEE, 2000). Ce projet vise à résoudre, par un élargissement du lit, les problèmes liés à la capacité hydraulique ainsi que ceux liés à l'écologie du cours d'eau.

Depuis le début du XX^{ème} siècle, la force hydraulique des affluents du Rhône est exploitée de manière systématique par des aménagements de rétention à haute chute. Après un siècle de construction, le débit équipé cumulé atteint les 350 m³/s. Ce débit potentiel représente environ 190 % du débit annuel moyen du bassin versant. L'accident de la conduite de Bieudron survenu au printemps 2000 devrait bientôt être réparé et donc ramener le débit

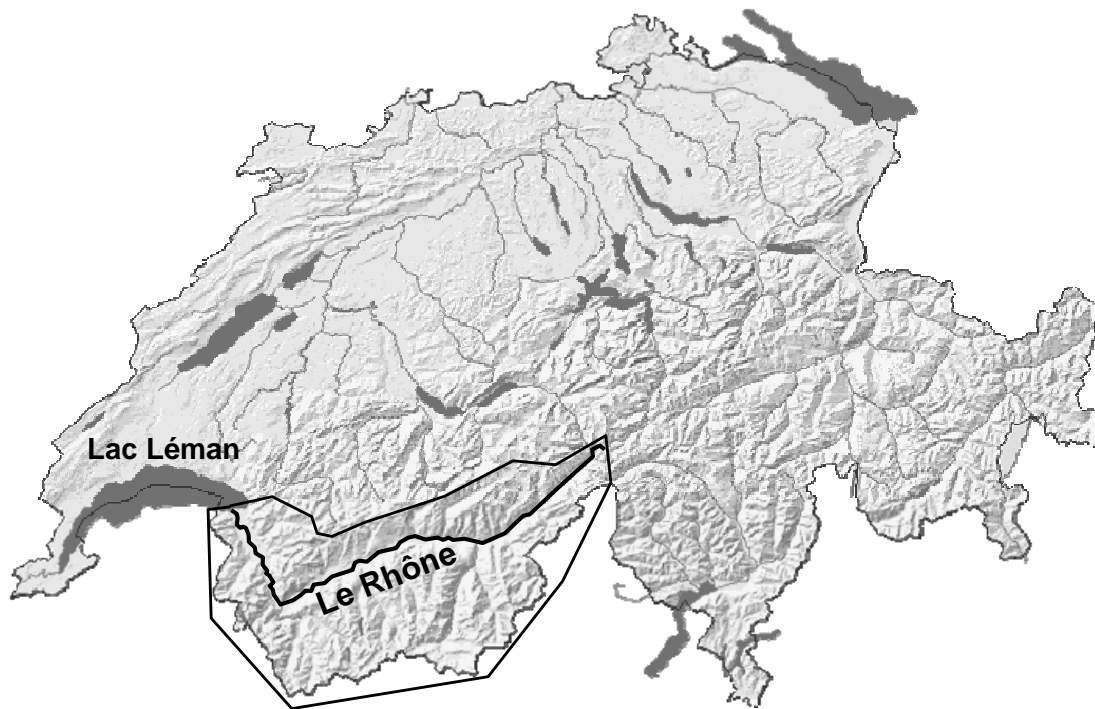


FIG. 1.2: La Suisse, le Rhône et son bassin versant

équipé cumulé à sa valeur maximale. La figure 1.3 illustre la croissance historique du débit équipé le long du Rhône.

La figure 1.4 illustre cette même évolution par une vue cartographique. Elle situe géographiquement les principaux lacs d'accumulation ainsi que les rejets des centrales dans le Rhône. Le volume cumulé d'accumulation dans les barrages vaut $1'203 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Ce volume représente environ 21% du volume annuel moyen écoulé dans le Rhône. L'ensemble des aménagements draine une portion de territoire environ équivalente au tiers du bassin versant naturel.

1.5 Buts et aménagement proposé

Parmi les différents buts énumérés au paragraphe 1.2 et à cause du contexte spécifique dans lequel ce travail de recherche s'inscrit (c.f. paragraphe 1.4), il est possible de simplifier les buts pour se focaliser sur certains d'entre eux et de fixer quelques lignes directrices conceptuelles de l'aménagement (Schleiss, 2006).

1.5.1 Buts généraux retenus

Ainsi, parmi les buts économiques, l'irrigation, la navigation (transport et non loisirs) et la pêche professionnelle ne sont pas considérées. Ces activités économiques ne sont pas, ou très peu, présentes dans le contexte du Rhône valaisan. Pour les buts sociaux, l'eau potable ne constitue également pas un but du système. En effet, l'eau potable valaisanne est soit captée dans des sources d'altitude, soit puisée dans la nappe phréatique mais jamais issue directement du Rhône. Enfin, le fleuve ne souffre pas, a priori, d'un déficit de la qualité chimique de l'eau.

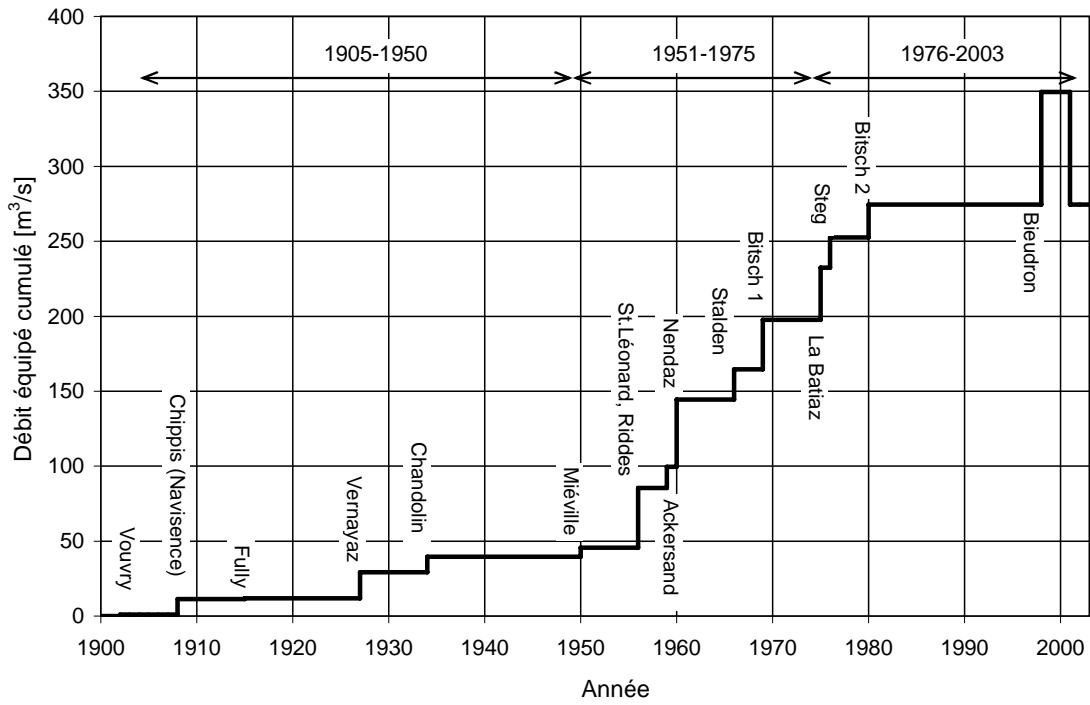


FIG. 1.3: Evolution du débit équipé cumulé du Rhône supérieur durant le xx^{ème} siècle (Meile et al., 2005)

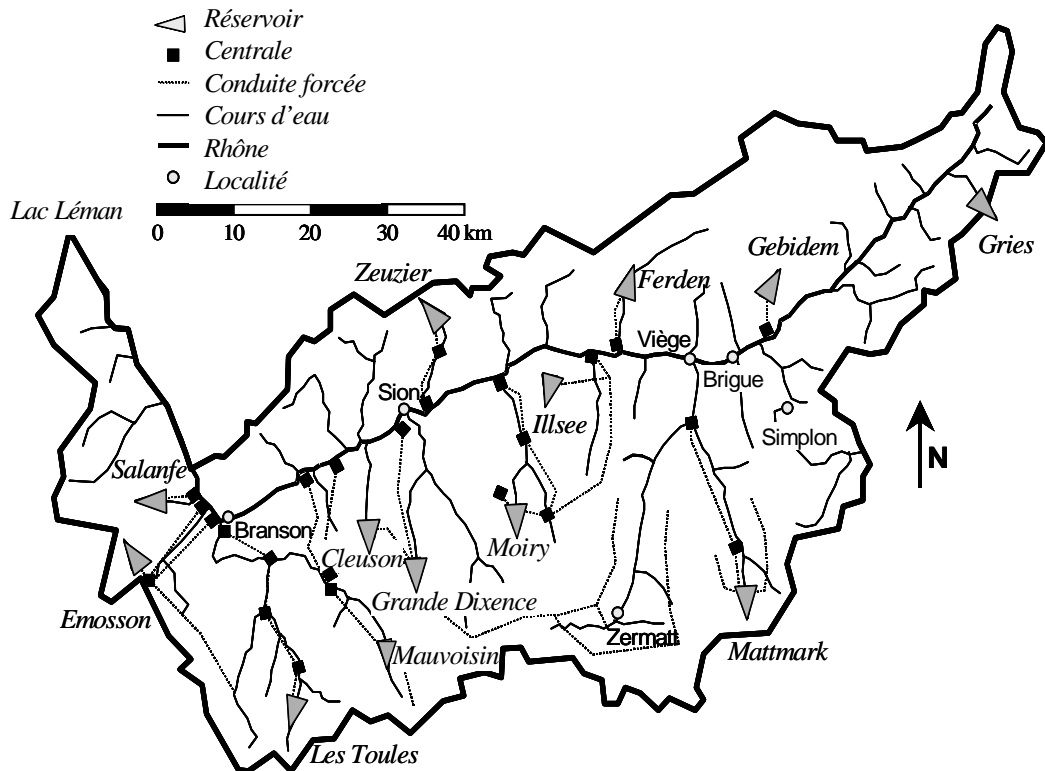


FIG. 1.4: Carte du bassin versant du Rhône supérieur avec ses ouvrages d'accumulation (Jordan, 2007)

Les buts généraux sont donc la production d'énergie et le laminage des crues, le développement d'activités de loisirs aquatiques et l'intégration paysagère, la restauration de régimes proche de l'état naturel (régimes hydraulique, thermique et sédimentaire) et la création de biotopes aquatiques. Historiquement le Rhône possédait de nombreux étangs ou marais parfois déconnectés du courant principal. Avec la canalisation du fleuve et l'urbanisation de la plaine, ces biotopes ont totalement disparus. C'est pourquoi l'accent de restauration est mis sur les biotopes de type lentique.

1.5.2 Concept de l'aménagement proposé

La régulation du régime hydraulique, rendu fortement artificiel par les rejets de centrales à accumulation, nécessite, pour le Rhône à l'aval de Riddes (station de mesure OFEV de Branson) un volume journalier de compensation d'environ $0.7 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Indépendamment de la surface requise, une variation du niveau d'eau est nécessaire pour créer ce volume de rétention. La construction d'un ouvrage de contrôle conjointement à un réservoir amont est la solution qui minimise la surface nécessaire. Ce volume correspond, pour une surface de retenue d'environ 1 km^2 , à une variation du niveau d'eau de 0.7 mètre. Ce volume est sensiblement plus grand pour la régulation du régime hydraulique pendant les week-end hivernaux.

L'écrêtement de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ d'une crue importante nécessite un volume de $5 \text{ à } 7 \cdot 10^6 \text{m}^3$ (référence crue estimée centennale de septembre 1993 majorée de 35 %). Ce volume peut être obtenu par un abaissement préventif de la retenue additionné à un volume d'épanchement.

Le Rhône charrie beaucoup de sédiments fins. Une accumulation placée directement sur le cours d'eau pose des problèmes de sédimentation. Le bassin de rétention doit ainsi être parallèle au cours d'eau. Une connexion avec le Rhône par une digue perméable, à l'amont du bassin, permet de générer un courant minimum dans ce dernier. L'essentiel des échanges hydrauliques entre le cours d'eau et le réservoir est néanmoins effectué par une connexion aval.

L'élévation du plan d'eau crée une courbe de remous sur le cours d'eau amont. Avec une hauteur utile du réservoir de 8.5 m et une pente amont du lit de la rivière de 0.1 %, la courbe de remous a une longueur maximale de 8.5 km. Toutefois, avec une hauteur d'eau habituelle dans la rivière de 2.5 m, la courbe de remous est réduite à une longueur de 6 km. Par des considérations géométriques, la vitesse reste supérieure à 50 % de la vitesse initiale sur un tronçon de 3 km et devant le barrage, la vitesse vaut encore environ un tiers de la vitesse initiale. Le tronçon de rivière amont influencé prend le nom de *rivière latérale*. Le tronçon de rivière amont non influencée prend le nom de *rivière amont*.

La différence de niveau des plans d'eau de part et d'autre du barrage permet une production d'énergie. Un débit équipé de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ et une chute réduite à 5 à 6 m pour ne pas influencer la nappe phréatique, la puissance installée s'élève à 8 ou 10 MW.

L'accroissement de la charge hydraulique sur le fond de la retenue modifie les interactions avec la nappe phréatique. Globalement, la quantité d'eau infiltrée augmente et provoque une élévation du niveau de la nappe. Pour contenir cette élévation, des contres-canaux (canaux de drainage) bordent les digues latérales de la retenue et de la rivière latérale. L'eau des canaux est filtrée par les digues et s'écoule avec une vitesse faible. En conséquence, elle peut se réchauffer et créer un milieu écologique de type palustre à forte valeur ajoutée.

L'infiltration est également réduite dans le temps par le colmatage très probable du fond de la retenue et de la rivière latérale. Le fond de la retenue peut également être étanché dès le début par une couche constructive adéquate. Un rideau d'étanchéité sur le périmètre de la retenue et de la rivière latérale est une autre mesure possible pour réduire le débit percolé.

Les conséquences issues de l'interruption du continuum écologique sont limitées par une véritable rivière de contournement du barrage. Le débit prévu pour cette rivière parallèle est de l'ordre de 5 m³/s.

Parallèlement aux aspects hydrauliques, les abords du projet sont conçus pour favoriser un développement social. Il est prévu d'intégrer une zone de loisirs et de sports sur les rives du plan d'eau. Une autre partie de la retenue et de ses rives est réservée pour le développement d'une zone écologique.

Ainsi conçu, un aménagement hydraulique fluvial à buts multiples est intégré dans un contexte géographique à la figure 1.5. Il est également représenté schématiquement à la figure 1.6. Les zones grisées représentent les objets hydrauliques. Les flèches symbolisent le mouvement de l'eau ou le rapport à l'eau. Ses principales grandeurs caractéristiques sont données au tableau 1.1. Cet aménagement prend le nom de *standard* dans la suite de ce document.

TAB. 1.1: Grandeurs caractéristiques de l'aménagement *standard*

Elément	Taille	Unité
Surface du réservoir	1	km ²
Hauteur utile	8.68	m
Débit installé de la centrale	200	m ³ /s
Débit de la rivière de contournement	5	m ³ /s
Débit à travers la digue perméable	5	m ³ /s
Surface d'épanchement	1	km ²
Hauteur d'épanchement	4	m

1.5.3 Définition de la *hauteur utile*

Traditionnellement, pour un aménagement énergétique au fil de l'eau, la *hauteur utile* est définie par la charge hydraulique brute de l'aménagement, soit la différence entre les niveaux d'eau amont et aval.

Dans le cas de l'aménagement à buts multiples, cette définition perd beaucoup de son intérêt à cause des variations importantes du niveau d'eau amont. La variation du niveau d'eau aval montre également de fortes variations possibles. D'une part, il est soumis aux variations de débit et, d'autre part, la courbe de tarage actuel est fortement susceptible d'être modifiée dans un avenir proche (projet en cours de Correction du Rhône valaisan). Dès lors, il n'apparaît pas judicieux de définir une grandeur caractéristique de l'aménagement à partir des niveaux d'eau.

Ainsi, la *hauteur utile* de l'aménagement est définie par le niveau du talweg actuel de la rivière à l'emplacement du barrage projeté et la hauteur d'exploitation maximale de ce dernier (niveau d'eau amont maximal ou tout simplement niveau de concession). La hauteur

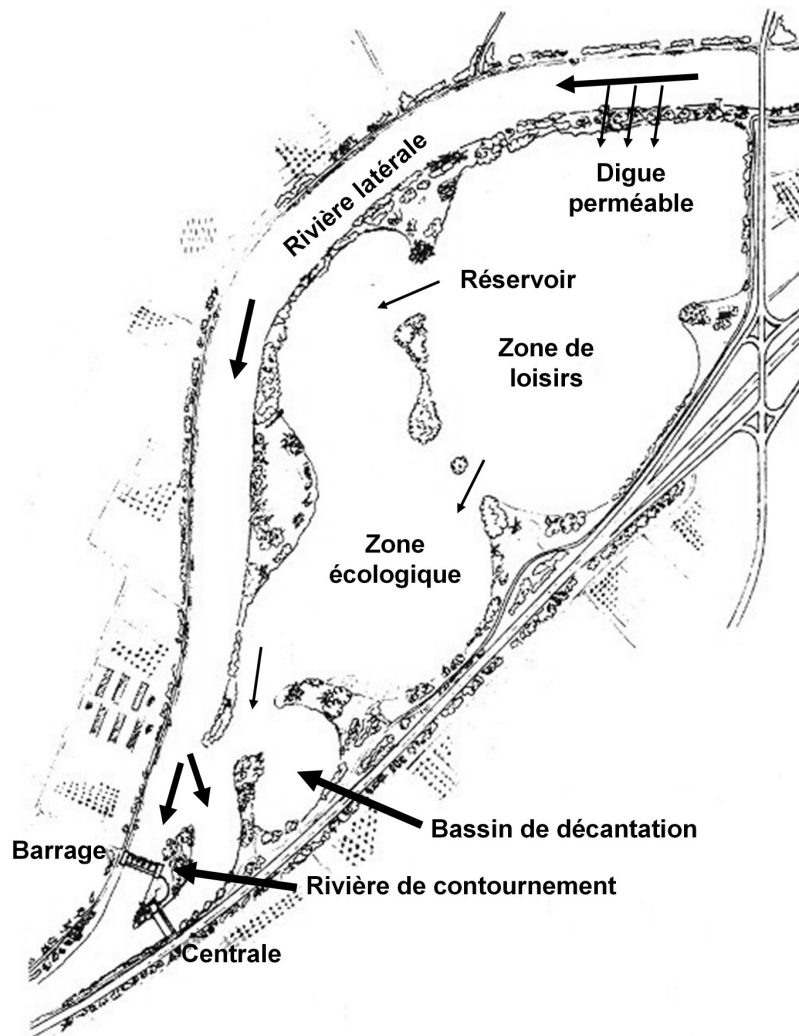


FIG. 1.5: Intégration *in situ* du projet à buts multiples (Irniger, 2000)

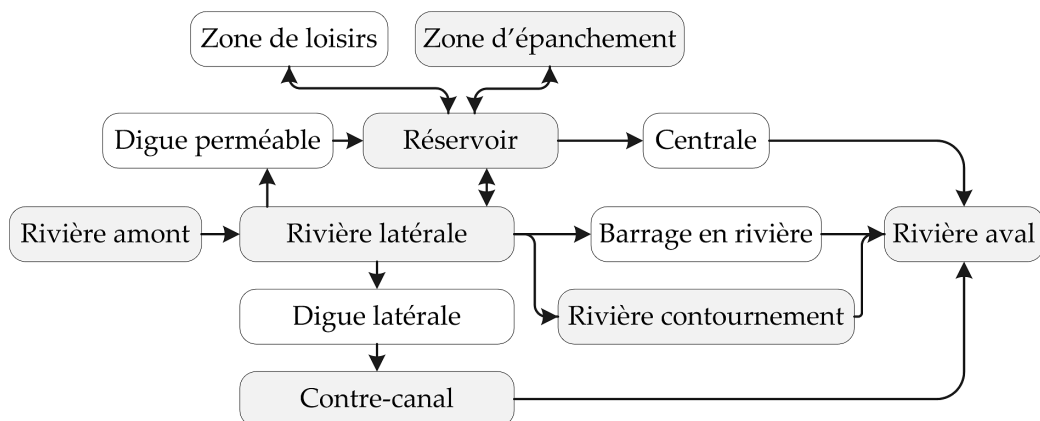


FIG. 1.6: Représentation conceptuelle du projet à buts multiples

utile correspond donc directement à la charge hydraulique maximale mesurée juste à l'amont de la vanne de l'aménagement.

A partir de cette définition, les autres grandeurs caractéristiques de l'aménagement peuvent être définies de manière univoque. Ainsi, par exemple, la charge énergétique brute est définie par la hauteur utile de l'aménagement moins le niveau d'eau aval tandis que la hauteur total de l'aménagement vaut l'addition de la hauteur utile, d'une revanche à son sommet ainsi que de ses fondations. La profondeur d'implantation des machines hydrauliques est également définie à partir du talweg de la rivière, de manière similaire aux fondations. La figure 1.7 illustre schématiquement les principales grandeurs géométriques relatives à la hauteur utile.

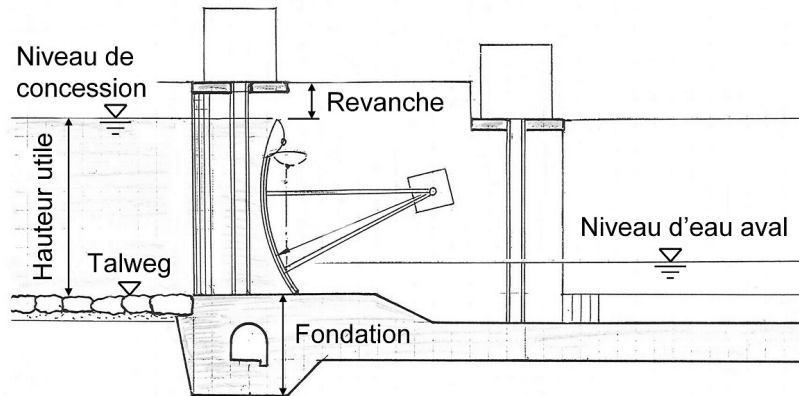


FIG. 1.7: Définition de la hauteur utile et principales grandeurs géométriques relatives

L'aménagement standard est défini sur la base de la hauteur actuelle des digues (8.68 m mesuré depuis le talweg jusqu'à la crête sommitale). Pour ne pas permettre une charge hydraulique sur le fond du Rhône ou du réservoir supérieure à la charge maximale actuelle, la hauteur utile de l'aménagement (selon la définition donnée ci-dessus) reprend la même valeur de 8.68 m.

1.6 Projet Synergie et buts spécifiques de ce travail de recherche

1.6.1 Projet Synergie

Le projet Synergie, financé en partie par des organismes privés et par la Commission fédérale de la Technologie et l'Innovation (projet CTI n° 6794.1 FHS-IW), comprend trois parties distinctes, à savoir :

1. Elaboration de bases conceptuelles pour des projets à buts multiples. Ce volet a pour but de développer des nouvelles conceptions pour des aménagements au fil de l'eau en tenant compte des aspects environnementaux au premier plan et en encourageant l'utilisation des nouvelles technologies comme des turbines hydroélectriques basées sur une conception modulaire. En particulier, les conceptions définies sont appliquées à des études de cas (prototypes) dans le cadre de la 3^{ème} correction du Rhône. Ce volet est réalisé par deux firmes indépendantes, à savoir le bureau d'ingénieurs STUCKY SA ainsi que le constructeurs de machines hydrauliques VATECH-ANDRITZ SA.

2. Bases scientifiques pour des projets à buts multiples. Dans ce volet, il s'agit de développer une méthodologie permettant d'évaluer les impacts sur l'environnement des décisions techniques dans le but de les optimiser, de définir une démarche pour l'identification de tous les paramètres qui influencent un projet complexe à buts multiples ainsi que de trouver un clé de répartition des coûts d'investissement et des bénéfices du projet. Ce volet, réalisé au Laboratoire de Constructions Hydrauliques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) sous forme de travail de doctorat, fait justement l'objet du travail de recherche présenté dans ce rapport.
3. Bases scientifiques concernant l'écologie et l'architecture du paysage. L'objectif principal de ce volet est d'explicitier les principes scientifiques de base et les méthodes d'analyse écologique disponibles permettant de réaliser une meilleure synergie entre les objectifs écologiques et d'autres objectifs, notamment la production d'énergie hydroélectrique. L'expérience montre qu'actuellement une meilleure intégration de la problématique écologique et environnementale sont des défis majeurs pour la réalisation des aménagements hydroélectriques. L'amélioration continue des connaissances scientifiques et leur prompt transfert vers les praticiens sont des conditions essentielles pour répondre à ces défis en permettant de promouvoir des solutions novatrices. Toutefois, actuellement les incertitudes scientifiques importantes rendent nécessaire une approche adaptative, notamment par la prise en compte explicite de modèles alternatifs concernant le comportement du système dans la phase d'élaboration du projet, d'adopter la flexibilité et la robustesse par rapport aux prédictions de ces modèles comme des critères de choix et de prévoir un monitoring des impacts du projet. Ce volet est réalisé conjointement par un travail de doctorat au Laboratoire des Systèmes Ecologiques de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) ainsi que par un architecte du Laboratoire de Paysage et Architecture de la même école.

1.6.2 Buts spécifiques de ce travail de recherche

Le but spécifique de ce travail de recherche réside spécifiquement dans le développement d'une méthodologie basée sur une approche globale capable de prendre en compte l'ensemble des intérêts des partenaires d'un aménagement hydroélectrique fluvial à buts multiples. Cette approche doit permettre de développer des synergies entre les différents buts assignés. Il s'agit donc de modéliser le comportement des différentes parties qui composent un tel aménagement ainsi que leurs interactions réciproques.

Les résultats attendus sont de trois types, soit :

- la quantification de l'impact des mesures techniques ;
- une clé de répartition des coûts ;
- un outil d'aide à la discussion.

Le cas d'étude constitue la toile de fond sur laquelle les développements sont effectués.

1.6.3 Mesures techniques

Le premier résultat attendu de ce travail est, par le biais de la modélisation du système complexe, la compréhension de son fonctionnement. En particulier, il est attendu de quantifier l'impact des décisions techniques sur l'ensemble des facteurs du système, et notamment les facteurs écologiques. Le but escompté est d'optimiser les mesures techniques

et obtenir ainsi un plus grand degré d'acceptation pour un projet d'aménagement à buts multiples. La notion de solutions de Pareto est ainsi attendue.

1.6.4 Clé de répartition des coûts

Dans un second temps, par la connaissance du comportement du système étudié, une clé de répartition des coûts est souhaitée. Il s'agit de ventiler l'ensemble des coûts de l'ouvrage sur l'ensemble des partenaires directement ou indirectement bénéficiaires. La notion de synergie doit ainsi être développée. Elle doit permettre de comparer des unités différentes et d'éliminer, parmi les solutions de Pareto, les solutions non synergiques. Il convient de rappeler que la considération des bénéficiaires fait cependant appel directement à un choix de société et introduit ainsi une marque partiellement subjective.

1.6.5 Outil d'aide à la discussion

Globalement, cet outil doit aboutir à une conception qui, d'une part, évite les impacts négatifs et qui, d'autre part, répond aux attentes des différents partenaires concernés par un projet à buts multiples. Par la considération des différentes sensibilités et avec les modules d'optimisation et de génération, cet outil doit s'approcher, si elle existe, d'une solution acceptable par tous. En tous les cas, il doit assurer que la solution proposée corresponde à la meilleure solution existante. Un tel outil s'adresse ainsi directement aux groupements d'études interdisciplinaires de projets à buts multiples.

Pratiquement, cet outil doit conduire à la minimisation des oppositions potentiels et maximiser, en même temps, les chances d'aboutir à des solutions consensuelles.

1.7 Organisation du document

Après ce chapitre d'introduction, les chapitres 2^{ème} et 3^{ème} sont une revue bibliographique des méthodes d'aide à la décision. Le premier de ces deux chapitres traite de méthodes qualitatives. Ces dernières permettent d'appréhender les problèmes d'une manière holistique et d'en comprendre le fonctionnement. Le second chapitre traite des méthodes quantitatives. En complément aux premières, elles permettent d'apporter des solutions chiffrées aux problèmes posés.

Le chapitre 4^{ème} est divisé en deux parties. Il développe tout d'abord quelques approfondissements de la méthode qualitative choisie et l'applique à la modélisation d'un aménagement à buts multiples. Dans un second temps, il traite du logiciel *PACEVs*, développé sur cette méthode et appliqué, pour leur restauration, à l'ensemble des rivières valaisannes.

Le chapitre 5^{ème} est focalisé sur les analyses quantitatives. Divisé selon les modèles de simulations spécifiques, il donne tout d'abord un aperçu bibliographique, puis développe le modèle lui-même et l'applique au cas d'étude. Une analyse de sensibilité termine chaque section.

Le chapitre 6^{ème} intègre l'ensemble des modèles de simulation au sein d'un seul modèle d'optimisation. Il expose tout d'abord le schéma de résolution, l'algorithme d'optimisation ainsi que le type de solutions obtenues (optimum de Pareto, solutions *synergiques* et critères de domaine).

Le chapitre 7^{ème} est une application, sur le Rhône valaisan, de la méthodologie définie au chapitre précédent. Cette application est basée sur les outils de simulation développés au chapitre 5^{ème} et sur le concept proposé d'aménagement à buts multiples du paragraphe 1.5.2 et étudié au chapitre 4^{ème}.

Enfin, le dernier chapitre, en guise de conclusions, rappelle tout d'abord les principaux développements effectués ainsi que les résultats du cas d'étude de Riddes. Il synthétise ensuite les idées nouvelles apportées par ce travail de recherche, à savoir l'approche choisie pour la résolution du mariage, l'application du concept de synergie ainsi que les filtres développés pour la réduction du nombre de solutions finales. En guise de perspectives, il relativise cependant la méthode et les résultats obtenus. Il montre finalement que le logiciel d'aide à la discussion serait amélioré s'il pouvait directement matérialiser les acteurs de la discussion.

L'articulation de ce document est illustrée par la figure 1.8.

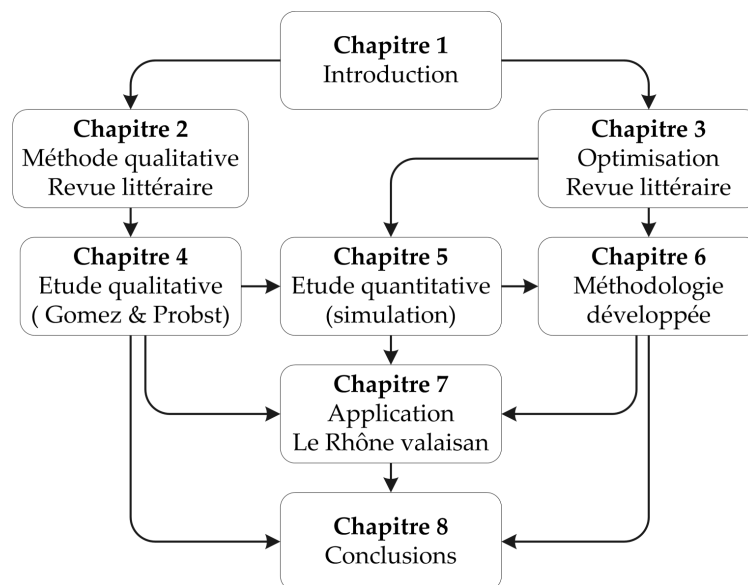


FIG. 1.8: Articulation des différents chapitres

2 Méthodes qualitatives d'aide à la décision : Etat des connaissances

Un problème bien posé est à moitié résolu

(dicton populaire)

2.1 Introduction

Les infrastructures, et particulièrement celles de génie civil, influencent de manière importante le territoire et l'environnement dans lequel elles se situent. Leur conception apporte une marque durable dans le paysage et, souvent, un échec à ce niveau pèse sur les développements postérieurs. Cependant, la complexité des problèmes liés aux infrastructures laisse difficilement appréhender, d'une part, la problématique et, d'autre part, la meilleure solution à y apporter. Par ailleurs, l'unicité des ouvrages rend impossible leur optimisation par essais successifs. Ainsi, un ouvrage de génie civil doit répondre tout d'abord à la bonne problématique, d'une manière optimale et ceci du premier coup.

Par ailleurs, la compétitivité accrue et la réduction des moyens nécessitent l'excellence. Les projets d'envergure doivent ainsi proposer des solutions innovantes. L'innovation peut être définie comme *la génération, le développement et l'implantation d'idées qui sont nouvelles et qui offrent des avantages pratiques ou commerciaux* (Park et al., 2004). Ces solutions s'inscrivent souvent dans une complexité accrue. La complexité d'un problème est définie par de fortes interactions dynamiques entre de nombreux facteurs au sein d'un même modèle (Gomez and Probst, 1995).

Si la réponse d'un ouvrage dont les buts sont fixés, dépend essentiellement de spécialistes, la problématique et les solutions à y apporter sont l'affaire de tous. Dans une démocratie, les choix sont pris dans le respect de la volonté populaire ; ce que l'on appelle à l'échelle un choix de société. Les méthodes qualitatives ont été développées dans cette optique pour tenir compte du plus grand nombre de paramètres et répondre ainsi à un maximum d'attentes. Elles abandonnent ainsi les aspects quantitatifs pour ne pas y être liées. Les méthodes qualitatives peuvent être définies, dans le contexte de cette étude, comme des moyens pour aborder et représenter une réalité de la manière la plus large possible en utilisant des outils essentiellement qualitatifs.

Les méthodes qualitatives d'aide à la décision sont nombreuses et souvent développées à partir de problèmes spécifiques. Elles répondent d'abord à des problèmes particuliers. Leurs développements les rendent souvent, par après, de plus en plus général. Elles restent néanmoins liées à leur typologie originelle. Il est donc difficile de trouver la bonne méthode directement applicable pour un problème particulier. La combinaison ou l'adaptation de méthodes existantes sont ainsi souvent requises.

Ce chapitre est un essai de classification des méthodes qualitatives. Il débute par les méthodes les plus participatives pour se diriger vers les méthodes d'experts. Il s'oriente logiquement vers la modélisation qualitative. Pour faire le lien avec le chapitre suivant, il termine par les méthodes appelées mixtes qui lient les aspects qualitatifs aux aspects quantitatifs.

2.2 Méthodes participatives

Développées au début du XX^{ème} siècle aux USA pour les premiers projets à buts multiples, les méthodes participatives ont une base légale avec le texte de l'Agenda 21 défini lors de la conférence de Rio de Janeiro (UN, 1992). La législation suisse considère déjà en partie ces nouvelles notions dans quelques lois (Loi sur l'aménagement du territoire, Loi sur la protection des eaux).

Les méthodes participatives pour la gestion des problèmes liés aux aménagements hydrauliques sont définies comme des *assemblées de partenaires qui se réunissent périodiquement pour discuter ou négocier la gestion des rivières, des fleuves ou des bassins versants* (Leach and Pelkey, 2001). Ces méthodes sont composées de trois éléments : les acteurs, le projet et le processus qui lie les acteurs au projet (Luyet, 2005).

La réussite de la méthode participative passe par une liste exhaustive des acteurs. Mason and Mitroff (1981) ont défini une méthode de sélection d'acteurs basée sur sept critères. Banville et al. (1998) assurent que cette méthode est la seule qui permette l'exhaustivité. Luyet (2005) propose un huitième critère pour atteindre plus facilement cette exhaustivité. Les huit critères proposés sont donnés au tableau 2.1. Les acteurs obtenus par plusieurs critères marquent leur importance.

TAB. 2.1: Méthode d'identification des acteurs selon Luyet (2005)

Critère	Caractéristique
Impératif	Décideurs élus ou choisis
Position	Acteurs concernés par leur position
Réputation	Acteurs désignés par leur réputation
Participation sociale	Acteurs ayant un lien direct avec le projet
Leader d'opinion	Acteurs, hors d'une structure formelle, représentatifs d'une autorité morale
Démographique	Acteurs représentés par leur âge, leur sexe
Organisation	Acteurs liés à la structure de gestion du projet
Conséquence	Acteurs subissant les conséquences du projet

Selon les méthodes, la population est considérée ou non comme un acteur à part entière. Luyet (2005) l'aborde différemment et propose, à la suite de Kapoor (2001), de la diviser en quatre groupes avec pour chacun un niveau différent de participation. Ces quatre niveaux sont présentés ci-dessous.

- L'information est le niveau le plus bas. Elle cherche seulement à tenir tous les acteurs dans un niveau identique de connaissance du projet.
- La consultation permet aux acteurs concernés de donner leur avis, sans engagement pour les décideurs.

- La concertation permet au décideur de demander l’avis à certains acteurs. Elle diffère de la consultation par sa cause (décideur qui demande un avis ou acteur qui le donne spontanément).
- La co-décision est le niveau le plus élevé. C’est le seul qui est contraignant pour les décideurs.

Plusieurs méthodes proposent la répartition des acteurs selon les niveaux de participation (Banville et al., 1998; Maystre et al., 1994; Knoepfel et al., 2001). Celle de Daniels et al. (1996) offre l’avantage d’être simple d’emploi. Par une série de questions relatives aux acteurs vis-à-vis du projet, elle fixe le niveau de participation. La méthode se représente facilement par un réseau arborescent. Les facteurs de réussite du processus, souvent relevés par la littérature, sont :

- des règles clairement fixées dès le début (Griffin, 1999)
- l’assurance des services d’un modérateur neutre pour les négociations (Leach and Pelkey, 2001; Duram and Brown, 1999)
- la préférence des contacts directs (Griffin, 1999; Duram and Brown, 1999)
- une participation à tous les niveaux de la procédure (Luyet, 2005)
- la prise en compte des aspects financiers (Griffin, 1999).

Buchecker et al. (2003) relèvent encore la difficulté d’intégrer les populations locales dans les processus participatifs. Ils proposent, pour une meilleure participation, de nouveaux outils de communication qui permettent d’échanger des idées sans risquer la mise à l’écart par la communauté.

2.3 Méthodes dites *d’experts*

Afin de pallier au manque d’objectivité possible des méthodes participatives, les méthodes dites d’experts ont été développées. Elles sont basées sur les mêmes principes que les méthodes participatives avec toutefois une population restreinte à des spécialistes. Ces méthodes admettent comme principe de base que *la probabilité de se tromper est plus faible lorsque le résultat émane de personnes expertes plutôt que de personnes non expertes* (Gordon, 1994).

Les décisions basées sur des personnes expertes sont originellement le résultat d’une discussion menée de manière informelle. Le but est de mettre en commun la connaissance de chacun des experts pour aboutir à un consensus sur le choix de la solution au problème posé (Gordon, 1994). Toutefois cette mise en commun peut induire des biais. La force de conviction de l’un des experts peut conduire à négliger les arguments d’un autre moins influent. Le mode de communication au sein du groupe peut également réduire l’efficacité de la méthode (Rowe and Wright, 1996). Ainsi toutes les interactions directes informelles au sein d’un groupe peuvent réduire la fiabilité du résultat obtenu. Le besoin d’une méthode formelle d’échange est rapidement apparu nécessaire.

Pour répondre à cette faiblesse, de nombreuses méthodes ont été développées parmi lesquelles les groupes structurés (Steiner, 1972), la technique du groupe nominal (Delbecq et al., 1975) ainsi que la méthode Delphi (Gordon, 1994). Des méthodes combinées ont également été développées (Duggan and Thachenkary, 2004).

Ces méthodes sont toutes basées sur une structure de communication anonyme ainsi qu’une procédure itérative. Les étapes initiales permettent de générer des idées, des points de vue ou de mettre en lumière des aspects du problème considéré. Elles sont effectuées de manière

individuelle (ou par groupes séparés). Les étapes finales mettent en commun la matière générée et conduisent à un consensus partagé. Un *groupe coordinateur* centralise tous les passages d'information entre les différents membres de l'étude et constitue ainsi un contrôle rétroactif.

Les méthodes d'experts ont été appliquées à de nombreux problèmes et très largement discutées. La seule méthode Delphi, sur la période de 1995 à 2004, a vu plus de 900 articles publiés dans la base de données *Science Direct*. Parmi eux, en relation avec les problèmes complexes de gestion hydraulique, l'article de Taylor and Ryder (2003) constitue un exemple récent.

Ces méthodes ne sont toutefois pas exemptes de faiblesses. Elles admettent notamment qu'un consensus issu d'experts est un chemin pour approcher la vérité (Landeta, 2006). De plus, il est difficile de tester la précision et la fiabilité des résultats obtenus (Martino, 1993). Enfin, le choix des experts qui participent à l'étude, les manipulations du *groupe coordinateur* ainsi que le couvert de l'anonymat sont autant de possibilités de biais des résultats.

2.4 Modélisation : dynamique des systèmes

En parallèle aux méthodes d'experts qui ont pour objectif principal de devancer un développement possible de la société en cherchant à le prédire, la dynamique des systèmes s'est développée depuis les années 1950 pour répondre à la complexité croissante de cette même société. Cette méthode a l'avantage de *fournir une solution analytique pour des systèmes complexes et non-linéaires* (Park et al., 2004). Elle se définit comme une *méthode d'analyse des systèmes complexes réunissant une analyse causale, suivie d'une transcription dynamique, puis d'une modélisation, enfin d'une simulation sur ordinateur* (EuroDicauTom, 1982). La dynamique des systèmes admet comme paradigme une vision holistique et interconnectée (Maani and Maharaj, 2004). Ce concept se traduit pratiquement par *penser globalement pour agir localement* (Serman, 2002).

A ses débuts, la dynamique des systèmes s'est intéressée aux aspects quantitatifs. Dès les années 1980, par opposition au développement informatique des modèles de simulation, elle s'est orientée vers les modèles qualitatifs (Coyle, 2000). Ceux-ci ont l'avantage d'englober des notions beaucoup plus larges. De plus, ils évitent de compromettre la solution lorsque les incertitudes numériques des variables augmentent. Ils s'affranchissent ainsi de la distinction entre variables dures, quantifiables avec certitude, et variables douces, peu quantifiables ou incertaines (Coyle, 2000). Les modèles qui renoncent à la modélisation mathématique ont pris le nom de *pensée systémique* (Luna-Reyes and Andersen, 2003).

La pensée systémique requiert des opérations mentales simultanées à sept niveaux différents (Richardson, 1996). Lors de la résolution d'un problème, le concepteur doit penser *dynamiquement, causalement, globalement, opérationnellement, rétrospectivement, quantitativement et scientifiquement*. La dynamique prend en compte les aspects temporels. La cause permet de déterminer les explications possibles des comportements observés. La vue globale oblige la considération de tous les aspects importants du problème. L'opérationnel identifie les causes et détermine l'impact d'un facteur sur un autre. La rétrospective permet d'identifier les boucles de rétroaction. Ordonnées différemment (vue globale, rétrospective, opérationnelle, causale et dynamique), ces opérations représentent les aspects les plus compréhensifs d'un problème (vue globale) vers les aspects les plus détaillés (pensée dynamique)

(Maani and Maharaj, 2004). Par leur degré d'abstraction, les aspects compréhensifs incluent implicitement les aspects détaillés.

La modélisation par la dynamique des systèmes se divise en quatre étapes principales (Luna-Reyes and Andersen, 2003). La *conceptualisation* comprend une description verbale du système, de ses limites et de ses effets rétroactifs. La *formulation* du modèle est une traduction du modèle conceptuel. Elle peut contenir des éléments qualitatifs exprimés dans une échelle de valeurs arbitraires. La phase de *test* permet de vérifier la solidité du modèle. Les tests proposés sont l'adéquation entre le modèle et les connaissances du système réel ainsi que l'avis de personnes autorisées. Les tests doivent porter sur le comportement du modèle et sur son évaluation. Finalement, l'*implantation* du modèle doit permettre le transfert des connaissances aux utilisateurs. Ces quatre étapes sont nécessairement reliées dans un processus itératif. Elles sont représentées schématiquement à la figure 2.1.

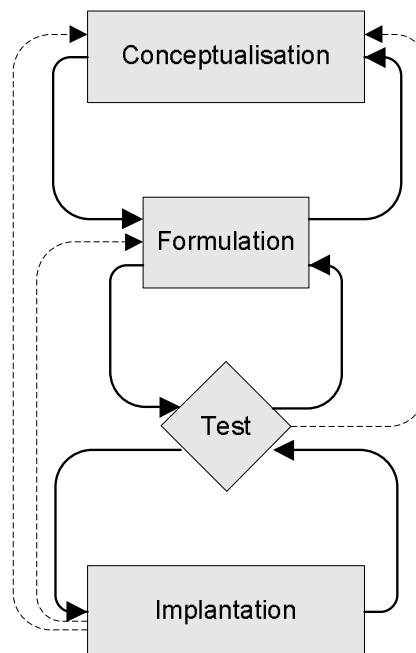


FIG. 2.1: Représentation schématique des 4 phases de la modélisation par la dynamique des systèmes

Les modèles qualitatifs sont souvent représentés à l'aide de diagramme d'influence. Les flèches indiquent le sens causal de la relation. Un signe positif ou négatif indique si l'accroissement de la cause implique un accroissement de l'influence ou une réduction. Certains auteurs considèrent également la notion temporelle (Park et al., 2004). La représentation en diagramme présente cinq avantages. Elle résume un problème très complexe sur une surface réduite de papier. Elle forme un rappel utile pour les discussions. Elle identifie les boucles de rétroaction. Elle permet d'inclure un environnement très large. Enfin, elle est une base pour un modèle quantitatif (Coyle, 2000). La méthode développée par Gomez and Probst (1995) constitue un exemple qui est appliqué à ce travail de recherche. Cette méthode est développée en détail au chapitre 4^{ème}.

La collecte des données qualitatives compte sept techniques (Luna-Reyes and Andersen, 2003). Les *interviews*, personnelles ou par téléphone, permettent une interaction entre le chercheur et les acteurs. Elles peuvent être dirigées, semi-dirigées ou libres. Les interviews sont normalement anonymes. Les *discussions bilatérales* sont des interviews enregistrées

qui font l'objet d'un échange de résumé. Ce dernier assure la bonne compréhension de l'information. Ces discussions sont rarement anonymes. Les *discussions de groupe* comprennent huit à douze personnes. Elles sont ensuite synthétisées sur une base de données. Les *groupes Delphi* sont une extension des discussions qui divise le groupe en deux parties. La première moitié génère une liste de facteurs à considérer et la seconde moitié fixe les priorités parmi ceux-ci. L'*observation* consiste à collecter des informations à l'insu des personnes observées. Cette technique non intrusive pose des problèmes de ressource (durée d'observation) et d'éthique. L'*observation ouverte* évite le problème éthique en découvrant l'observateur. Toutefois les résultats peuvent être sensiblement influencés. L'*approche expérimentale* offre de nombreuses formes. L'une d'elle consiste à demander un certain travail à des acteurs pour mesurer ensuite les modifications induites dans leur comportement ou leurs prises de décision.

Parallèlement à la collecte, l'analyse des données qualitatives comprend cinq techniques (Luna-Reyes and Andersen, 2003). L'*herméneutique*, dérivée de l'exégèse biblique, définit des règles de lecture pour différents degrés de compréhension. Elle analyse les textes récoltés au travers de ces grilles d'interprétation. L'*analyse du discours* considère les extraits de texte qui se focalisent sur le problème traité. Elle cherche à en extraire la compréhension et le fonctionnement du système exprimés par les acteurs. La *théorie de base* consiste à identifier les thèmes ou les concepts exprimés dans le texte. La difficulté réside dans le lien entre les concepts identifiés et la globalisation du problème traité. Les *modèles de décision ethnographique* cherchent à comprendre les motivations des décisions prises dans les circonstances données. Les résultats peuvent s'exprimer sous forme d'arbre de décision. Finalement, l'*analyse de contenu* est une technique puissante pour identifier les modes de références et l'estimation des paramètres. Cette méthode déductive requiert un code d'analyse à appliquer. Les résultats se résument dans une matrice.

Malgré des techniques bien établies, la dynamique des systèmes contient des limites pratiques et théoriques. Les limites pratiques sont essentiellement liées à la mise en oeuvre d'un tel modèle. La collecte des données, leurs analyses ainsi que les tests nécessitent un travail long et des ressources importantes. Les limites théoriques viennent de l'absence de bases solidement établies et du peu de résultats concluants (Maani and Maharaj, 2004). Par ailleurs, un nombre important de relations entre la pensée systémique et les processus cognitifs de base, comme la pensée, l'apprentissage et la prise de décision, font défaut (Doyle, 1997). Les *variables humaines* (par exemple satisfaction, motivation, comportement...) sont donc difficilement modélisables. Elles sont néanmoins centrales. Contrairement aux théories classiques de modélisation où le milieu est indépendant du choix des acteurs, la dynamique des systèmes admet que les choix des acteurs influencent le milieu (Atkinson, 2004). La modélisation du facteur humain prend ainsi toute son importance. La recherche s'oriente donc fortement vers les sciences humaines et sociales.

Indépendamment des limites mentionnées et des améliorations possibles, un modèle est toujours une restriction de la réalité. Il demeure néanmoins un outil de réflexion destiné à répondre à une problématique définie. Ainsi la *notion initiale de la définition de la question reste essentielle* (Coyle, 2000) ; ce que la sagesse populaire résume avec le dicton suivant : un problème bien posé est à moitié résolu.

2.5 Méthodes mixtes

Les méthodes qui associent les aspects qualitatifs aux aspects quantitatifs sont classées dans deux familles. La première famille regroupe les systèmes où les liens entre les variables sont peu connus ou peu quantifiables. C'est typiquement la logique floue. La seconde famille abandonne la modélisation du système et se concentre sur les objectifs multiples auxquels il faut répondre. Ce sont les méthodes multicritères.

2.5.1 Logique floue

La logique floue est développée par le professeur en informatique L.A. Zadeh en 1965 à l'université de Californie à Berkeley (Zadeh, 1965). Elle a pour but de chiffrer des grandeurs imprécises et de pouvoir ainsi transmettre en langage informatique des valeurs relatives au langage humain. La logique floue est basée sur deux notions : les règles d'inférence et les fonctions d'attribution. Les règles d'inférence permettent d'ordonner les notions floues entre elles et les fonctions d'attribution de chiffrer chaque état de chaque valeur floue. La technique de la logique floue permet ensuite d'agrèger les règles et les fonctions d'attribution et de quantifier la réponse du système.

Formellement, la logique floue est constituée de trois étapes :

- définition des fonctions d'appartenance ;
- définition des règles applicables ;
- définition de la *défuzzification* pour obtenir une valeur figée unique (crisp). Cette valeur est souvent calculée comme un centre de masse.

Depuis son invention en 1965, la logique floue est utilisée très couramment dans de nombreux domaines. Rangarajan et al. (1999), Ohkubo and Dissanayake (1999) et Sanchez et al. (2005) l'appliquent à des problèmes de planification en ingénierie lorsque les objectifs sont imprécis et les informations essentiellement qualitatives. Chen and Mynett (2004) l'emploient pour prédire la poussée phytoplanctonique et Sasikumar and Mujumdar (1998) pour contrôler le taux de polluants admissibles dans une rivière. Dans le domaine de la gestion des réservoirs, la logique floue est également souvent employée. Russell and Campbell (1996) l'utilisent pour planifier les opérations d'un réservoir hydroélectrique avec des apports probabilistes et un prix énergétique fluctuant, Shrestha et al. (1996) et Fontane et al. (1997) l'emploient pour définir les règles d'opération d'un réservoir à buts multiples et Yin et al. (1999) s'en sert pour gérer un système composé de cinq lacs en série avec différents objectifs. Enfin, cette technique a également été combinée avec les réseaux de neurones (Gabrys and Bargiela, 1999) et développée pour appréhender des grandeurs non-linéaires (Arakawa et al., 2003).

Dans son analyse des méthodes d'aide à la décision, Nikolopoulos (1997) classe la méthode floue dans la famille des systèmes experts qui possèdent une capacité à traiter des incertitudes. Face à la logique monotonique ou booléenne, il oppose l'approche statistique ou bayésienne. La logique floue est une dérivée de cette approche. Elle est notamment utile lorsque les informations numériques sont insuffisantes pour appliquer les théories statistiques ou lorsque les informations sont de type purement qualitatif. Vester (2001) utilise cette capacité pour élaborer son approche biocybernétique.

2.5.2 Méthodes multicritères

Les méthodes multicritères négligent l'aspect modélisation du système et se concentrent sur les objectifs pour aboutir à la solution optimale. Les méthodes les plus avancées conduisent à un choix de plusieurs solutions.

Ces méthodes sont toutes basées sur quatre étapes, potentiellement cycliques (Mena, 2000). Ces étapes sont :

- dresser la liste des actions ou solutions potentielles ;
- dresser la liste des critères à considérer ;
- établir le tableau des performances ;
- agréger les performances.

Les trois premières étapes n'offrent que de très faibles variations selon les méthodes choisies. Elles représentent le côté objectif de la méthode et sont ainsi peu sujettes à discussion. Le seul aspect subjectif réside dans le choix ou l'omission possible de critères.

L'essentiel des différences parmi les méthodes multicritères porte sur la quatrième étape. Cette étape comporte un aspect essentiellement subjectif. Schärli (1985) justifie la diversité des méthodes existantes par l'incapacité d'agréger les performances sans introduire un biais entre les performances. L'introduction de ce biais donne naissance à trois familles de fonction d'agrégation.

- Les méthodes d'agrégation complète cherchent à réduire l'ensemble des critères à un seul résultat. Pour ce faire, elles pondèrent chaque critère et effectuent ensuite une opération mathématique d'agrégation. La technique la plus connue est la moyenne pondérée de notes. L'intérêt de ces méthodes réside dans leur facilité de mise en oeuvre et dans leur utilisation universelle. Il leur est cependant reproché d'être trop réductrices, d'être sensibles à une pondération essentiellement subjective et de n'offrir qu'une seule solution finale (absence de choix final).
- Les méthodes d'agrégation partielle tentent de pallier à ces défauts à l'aide d'une approche basée sur le surclassement. Elles comparent toutes les actions deux à deux à l'aide de matrice de concordance et/ou de discordance et éliminent les moins bonnes solutions. Les méthodes les plus connues sont probablement *Electre* (Roy, 1968) et *Prométhée* (Brans and Vincke, 1985). De nombreuses variantes ont été développées à partir de ces deux méthodes (veto franc, veto progressif, pseudo-critère, seuil, indice).
- Les méthodes d'agrégation précédentes supposent cependant que le nombre de solutions comparées soit d'un ordre de grandeur raisonnable. Lorsque les paramètres sont des variables continues, ce nombre tend vers l'infini. Les matrices de comparaison deviennent alors impossible à gérer. Les méthodes d'agrégation locale permettent ainsi, à partir d'une solution initiale choisie, d'évoluer de manière itérative vers des solutions meilleures. Le tableau des performances dans le domaine des valeurs discrètes est remplacé par l'évaluation des fonctions continues. La manière d'agréger les résultats issus des fonctions continues pour générer les nouvelles solutions sont très nombreuses (Steuer, 1986). Elles sont cependant toutes basées sur la notion de distance entre les solutions optimales des différents critères.

Dans le domaine hydraulique, les méthodes multicritères sont abondamment utilisées, soit pour la gestion de réservoirs (Lund and Ferreira, 1996; Flug et al., 2000), soit pour la planification d'un réservoir (Netto et al., 1996), ou encore pour la gestion d'un réseau d'eau potable (Abrishamchi et al., 2005). Mahmoud and Garcia (2000) comparent diverses

méthodes pour choisir la meilleure alternative à la migration piscicole sur la rivière Sacramento (barrage *Red Bluff, Californie, USA*).

Les méthodes multicritères sont également utilisées avec d'autres techniques. Liu et al. (1998) et Cai et al. (2004) l'intègrent à la logique floue, Hyde et al. (2004) utilisent la méthode de *Monte Carlo* pour générer les poids, Hill et al. (2005) l'associent à un système d'information géographique pour les problèmes d'optimisation spatiale et Schlüter et al. (2005) la complètent par un modèle de programmation linéaire pour l'allocation des ressources hydriques en vue d'une amélioration écologique.

2.6 Synthèse des méthodes abordées

Le tableau 2.2 résume avec sept critères les quatre méthodes qualitatives abordées. L'échelle qualitative de comparaison comprend trois degrés (-, o, +). Bien qu'aucune méthode ne se distingue clairement des autres, la modélisation qualitative totalise le meilleur score. A l'opposé, les méthodes participatives semblent le moins appropriées pour répondre à la problématique d'un aménagement à buts multiples.

TAB. 2.2: Tableau synoptique des méthodes qualitatives d'aide à la décision

Critère / Méthode	Participatives	Experts	Modélisation	Mixtes
Perception de la problématique	o	+	o	o
Globalité du système	-	o	+	-
Objectivité de la solution	-	o	+	o
Subjectivité de la solution	+	-	o	+
Degré d'acceptation	+	o	-	o
Quantification de la solution	-	o	-	+
Stabilité de la méthode	-	o	+	-
Total	-2	0	+1	0

Pour un problème donné, lorsque la solution projetée implique des conséquences sur une population, quelque soit la taille du problème, de la solution ou de la population, une dimension sociale apparaît nécessairement. Cette dimension est par définition subjective. Elle dépend, pour la population concernée, des moeurs, des habitudes locales et de la sensibilité du moment à certains critères. Cette dimension du problème à résoudre ne doit cependant pas en faire oublier l'objectivité. De ce point de vue, les méthodes participatives élaborées pour aboutir à des solutions acceptées par chacun donnent un tel poids à l'opinion personnelle que la solution retenue risque de ne plus correspondre au mieux au problème posé. De plus, ces méthodes sont sensibles à la manière dont les acteurs sont identifiés et classés. Enfin, elles sont également peu efficaces pour quantifier et comparer des solutions.

A l'opposé, les méthodes basées sur des experts peuvent aboutir à des solutions qui correspondent à des optima locaux sans toutefois tenir compte des désirs de la population concernée ou en perdant de vue la globalité du problème traité. Ainsi, selon les spécialistes consultés, il y a un risque d'aboutir à des solutions différentes.

Pour pallier à ces deux défauts, les méthodes basées sur la modélisation qualitative cherchent à aborder un problème de manière holistique. Elles permettent l'intégration d'experts et, dans une moindre mesure, celle d'un public plus large. Elles peuvent cependant facilement

se tromper d'objectif pour traiter des aspects secondaires du problème concerné. D'autre part, le risque est grand d'aboutir à un modèle difficilement communicable et ainsi peu susceptible d'être accepté par un public large. Enfin, elles peinent à fournir des réponses quantifiées.

Les méthodes mixtes essaient de réunir les avantages des méthodes purement qualitatives (modélisation pour la logique floue et participatives pour les méthodes multicritères) en les liant à des aspects quantitatifs (quantification d'aspects qualitatifs pour la logique floue et matrice d'évaluation pour les méthodes multicritères). Cependant, l'absence de réflexion globale ne permet pas d'assurer la primauté de la réponse obtenue. Par ailleurs, la stabilité de ces méthodes constitue également un point délicat.

2.7 Conclusions

Si les méthodes qualitatives sont une étape nécessaire à la compréhension d'un problème, elles restent insuffisantes pour répondre à l'ensemble des questions posées. Chacune aborde un aspect particulier et présente une ou des solutions basées sur une analyse partielle. Selon la sensibilité de l'aspect choisi, les réponses peuvent être ainsi différentes.

Par ailleurs, ces méthodes ignorent la notion d'optimisation. Elles sont limitées à des comparaisons de variantes. De ce fait, elles tendent plus vers des solutions de compromis (chaque acteur abandonne une partie de ses revendications) que vers des solutions de consensus (chaque acteur essaie de valoriser ses revendications en trouvant des solutions combinées). La génération de solutions optimales qui est une partie importante du travail scientifique n'est pas considérée par ces méthodes.

Enfin, les aspects quantitatifs sont, par définition pour des méthodes qualitatives, peu pris en compte. Ils constituent cependant une partie non négligeable des réponses à fournir pour le problème posé par un aménagement à buts multiples.

Pour ces raisons, il est indispensable d'aborder les méthodes quantitatives d'aide à la décision, qui sont traitées au chapitre 3^{ème}.

3 Méthodes quantitatives d'aide à la décision : Etat des connaissances

Optimiser : déterminer les meilleures décisions à prendre en vue d'améliorer les performances du système

(Favrat and Maréchal, 2002)

3.1 Introduction

Après la définition du problème et de ses composants, voire de son fonctionnement interne, la quantification des réponses du système intervient comme une suite logique et nécessaire à la modélisation qualitative du chapitre précédent. A cause de l'impossibilité, liée à la taille de l'ouvrage étudié, de procéder à des essais en grandeur nature ni même sur un modèle réduit, la modélisation mathématique demeure la seule solution pour étudier le comportement du système en question.

Toute modélisation, même quantitative, est une restriction de la réalité. Elle permet cependant, à l'intérieur du domaine de validité et pour l'objectif établi, de reproduire le comportement réel du système et de quantifier ses réponses à des sollicitations extérieures. Après la phase d'élaboration du modèle, la phase de calage permet d'en ajuster les paramètres. La dernière phase consiste à valider le comportement du modèle par comparaison avec la réalité observée.

Si la modélisation permet de remplacer la réalité par un système simplifié malléable à loisir, elle ne permet pas, de manière explicite, de choisir la solution (la plus) adaptée à un problème. C'est l'objectif de l'optimisation. Cette dernière a pour but de proposer les meilleures valeurs du set de variables de décision du modèle. La définition de *meilleur* nécessite de pouvoir évaluer et comparer les différentes réponses. Cette comparaison est effectuée par une fonction objectif. Enfin, à cause de sa dépendance à la modélisation, l'optimisation est limitée au domaine de validité de celle-ci. Cette limitation prend le nom de contrainte. Formellement, l'optimisation d'un problème nécessite :

- une modélisation de la réalité ;
- un vecteur de contraintes qui restreint l'optimisation au domaine de validité de la modélisation ;
- une fonction objectif qui évalue et compare les performances du modèle ;
- un vecteur de variables à optimiser. Ce vecteur constitue le lien entre l'outil d'optimisation et celui de simulation.

Ce chapitre aborde dans une première partie les bases essentielles de la modélisation et plus particulièrement celles de la simulation. Cette partie distingue également les différentes manières de relier la simulation à un outil d'optimisation. La seconde partie traite des modèles d'optimisation. Après une classification des différentes techniques habituelles,

certains modèles adaptés au problème de ce travail de recherche sont expliqués plus en détail. Ce chapitre conclut par la nécessité de développer, dans un premier temps des outils de simulation adaptés au problème traité puis, dans un second temps une structure qui englobe la simulation et en permette l'optimisation générale.

3.2 Modélisation quantitative

3.2.1 Modélisation

Depuis longtemps l'esprit humain cherche à réduire la réalité dans un modèle pour en comprendre son fonctionnement ou tout simplement pour en avoir une vue globale. En ce sens, les cartes géographiques sont certainement parmi les premiers modèles couramment utilisés. Avec l'évolution des mathématiques d'une part et de la physique d'autre part, les modèles sont devenus plus conceptuels et plus fonctionnels. Ainsi Newton put-il en 1687 énoncer les célèbres lois du mouvement (Newton, 1687) qui sont, de fait, un modèle de comportement de la masse dans un champ de gravité. La complexité des modèles conduit à des formulations de plus en plus compliquées. Les systèmes d'équations sont alors subdivisés en modèle partiel dont les interconnexions nécessitent un certain nombre de définitions.

La modélisation d'un système est couramment symbolisée par une représentation en arcs et en noeuds. Ces objets représentent selon le formalisme de modélisation soit les variables, soit les fonctions de transformation. L'approche cognitive attribue généralement les noeuds aux variables et les arcs aux fonctions. L'approche classique retenue ici fait l'inverse.

Formellement, un modèle quantitatif a pour objectif de *représenter à l'aide d'outils de mathématique le comportement d'un système afin de pouvoir en déduire ses performances et analyser l'impact des différents paramètres pouvant l'influencer* (Favrat and Maréchal, 2002). Matériellement, le comportement du système réalise le lien physique entre les variables d'entrée et les variables de sortie du système. Schématiquement, un modèle peut être représenté par la figure 3.1. Les paramètres de calage peuvent être perçus comme extérieurs au modèle ou comme partie prenante de ce dernier. Ils sont distingués des variables d'entrée dans le sens où ils sont habituellement établis de manière définitive dans la phase de calage du modèle.

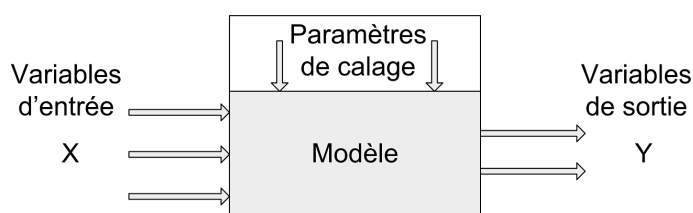


FIG. 3.1: Représentation schématique d'un modèle

Ainsi dans la seconde loi de Newton, $F = m \cdot g$, le modèle est constitué par la loi elle-même, la valeur de la gravité g constitue l'unique paramètre de calage, la masse m la variable d'entrée et la force résultante F la variable de sortie. Un modèle similaire, mais formellement distinct, permet d'inverser les variables d'entrée et sortie pour en déduire, à partir d'une force, la masse en action.

Mathématiquement, le modèle schématisé à la figure 3.1 est formalisé par l'équation 3.1 où F représente le vecteur des équations qui constituent le modèle.

$$Y_{sortie} = F(X_{entrée}, P_{calage}) \quad (3.1)$$

Parmi les variables d'entrée et de sortie, il convient de distinguer celles qui sont des résultats physiques de celles qui sont des résultats logiques. Ainsi les premières modélisent le phénomène étudié tandis que les secondes relèvent de la logique décisionnelle qui entoure le phénomène.

La forme explicite donnée par l'équation 3.1 n'est souvent pas possible lorsque le modèle devient complexe. Le modèle prend alors la forme implicite donnée par l'équation 3.2.

$$F(X_{entrée}, P_{calage}, X_{état}) = 0 \quad (3.2)$$

où $X_{état}$ sont les variables qui caractérisent l'état du système. Les variables de sortie ne sont qu'un sous-ensemble de ces dernières (Favrat and Maréchal, 2002).

La connexion des différents modèles partiels conduit à définir les variables qui sont partagées par plusieurs d'entre eux. Une variable de sortie d'un modèle devient ainsi une variable d'entrée du suivant. Ces connexions, sous forme d'équations, caractérisent le système complet. La différence entre le nombre d'équations et les variables qui les constituent définit le degré de liberté du système. Lorsque ce degré est positif, le système est sous-déterminé et il nécessite des équations supplémentaires pour être complet.

Favrat and Maréchal (2002) répartissent ces équations supplémentaires en deux groupes. Le premier groupe prend le nom d'équations de spécification. Ces équations représentent les contraintes extérieures au système qui influencent ce dernier ou ses conditions de fonctionnement. Formellement, elles sont illustrées par le vecteur de l'équation 3.3. Ce vecteur contient autant de positions que de contraintes.

$$S(X_{état}) = 0 \quad (3.3)$$

Le second groupe prend le nom d'équations de consigne. Elles portent sur les variables de décision par lesquelles le décideur influence l'ensemble du système. Formellement, elles sont illustrées par le vecteur de l'équation 3.4. Ce vecteur contient autant de positions que de variables de décision.

$$C(X_{état}) = 0 \quad (3.4)$$

Finalement, pour que le système complet soit déterminé, il faut que le degré de liberté corresponde au nombre d'équations de spécification et de consigne, c'est-à-dire au nombre de contraintes et de variables de décision. De plus, il est nécessaire que les équations de ces trois groupes F , S et C soient mathématiquement indépendantes pour que le système puisse être résolu.

Le système d'équations formé peut être résolu de deux manières. La première manière, appelée résolution simultanée, consiste à établir un système d'équations partielles à partir

des équations du modèle et de spécification (F et S) et à les résoudre de manière explicite. Le système sous-déterminé trouvé donne la liberté mathématique pour y adjoindre les valeurs des variables de décision. On parle également dans ce cas-ci de résolution analytique.

La seconde manière, appelée résolution séquentielle, consiste à associer à chaque variable l'équation qui permettra de la résoudre et à déterminer l'ordre de résolution. Lorsque la séquence de résolution n'est plus possible (système en boucle), une méthode itérative permet, moyennant un critère de convergence, d'aboutir à un résultat suffisant. Ce calcul peut cependant s'avérer coûteux en temps de résolution. C'est la résolution numérique.

3.2.2 Simulation

Lorsque la modélisation introduit l'évolution temporelle pour la résolution du modèle, elle prend le nom de simulation. Formellement, le terme simulation signifie *un modèle formulé par des relations arithmétiques et algébriques en relation avec des processus logiques* (UN, 1972). La simulation est une technique expérimentale de résolution de problèmes pour des systèmes complexes qui ne peuvent pas être analysés par une méthode analytique directe. La simulation laisse toute liberté quant à la taille du modèle ou le type de contraintes.

La simulation, selon le type d'équation qu'elle traite, est continue ou discrète. Lorsqu'elle est continue, elle nécessite un schéma de résolution dont les plus classiques sont celui de Euler ou de Runge-Kutta. La précision du résultat peut être atteinte de deux manières : soit en utilisant un schéma plus précis, soit, plus simplement, en réduisant la taille du pas de temps. La réduction de la maille temporelle peut cependant conduire à une résolution plus lente.

Lorsque la simulation est basée sur des équations discrètes, elle peut être résolue de deux manières :

- synchrone : résolution *événement après événement*. Cette méthode est rapide mais peut devenir complexe à programmer.
- asynchrone : résolution par *pas de temps*. Cette méthode, plus simple que la précédente, peut nécessiter de longs temps de calcul si le modèle est grand ou si le pas de temps nécessaire est petit.

Une troisième forme de simulation, plus récente, qui s'inscrit dans la suite logique de la programmation par objet, est la simulation par agent. De nature asynchrone, elle mime le comportement réel d'un groupe en simulant les interactions des parties qui le composent. Cette technique est surtout utilisée par les sciences sociales ou naturelles. Elle permet de reproduire, à partir du fonctionnement basique d'un individu, le comportement d'une population de bactéries, de poissons et parfois même d'humains (Ferber, 1997).

Les modèles de simulation appliqués spécifiquement aux problèmes hydrauliques existent depuis de nombreuses années. Ils en traitent aujourd'hui tous les aspects, et notamment : les réseaux en pression maillés ou arborescents, les systèmes hydrauliques en nappe libre, les modélisations thermiques, les modélisations polluatives, les modélisations de la nappe phréatique dans des sols saturés ou semi-saturés, les modélisations des sédiments et des courants de turbidité. Ces modèles ont atteint un degré de maturation qui leur permet de produire, une fois calé, des résultats fiables. Matthies et al. (2003) ont développé un modèle de simulation sur l'ensemble de la rivière *Elbe* (Allemagne) couplé à un système géoréférencé. Ce modèle permet la simulation en continu de la rivière tant pour ses aspects hydrauliques que pour la qualité chimique. La gestion de la rivière, sans optimisation possible, peut être

effectuée par la simulation de mesures concrètes, la détermination de scénarios. Lanini et al. (2004) ont développé pour la rivière *Hérault* (France) un modèle équivalent qui comporte en plus des aspects liés aux activités de loisirs aquatiques. Ce modèle est développé sur une plate-forme *MatLab*. Schlaeger et al. (2003) proposent une gestion de la qualité de l'eau de la rivière *Spree* (Allemagne) par une approche intégrée de l'ensemble du bassin versant.

Pour les aspects écologiques, la littérature est abondante en ce qui concerne les méthodes d'analyse et d'évaluation de la qualité des milieux. Rohde et al. (2005) démontrent par une analyse méthodique sur des sites existants les avantages écologiques liés à l'élargissement du lit de la rivière. La littérature est cependant plus réservée en ce qui concerne les modèles de simulation à but prédictif. A cause de la complexité du vivant, il est plus difficile de trouver des applications universelles reconnues de modèles qui pourtant peuvent l'être (croissance dynamique d'une population ou modèle prédateur-proie par exemple). La majorité des applications sont développées sur une espèce, ou un groupe d'espèces, dans des conditions locales précises. Elles sont donc difficilement transposables soit à d'autres espèces, soit à d'autres milieux. Par ailleurs, les experts ne sont pas unanimes quant à la valeur réelle des résultats de modélisation ou de prédiction. Reichert et al. (2007) ont développé un modèle écologique applicable pour les rivières alpines. Ce modèle de simulation est cependant dans un état encore statique et ne permet pas de prendre en compte l'évolution temporelle des conditions hydrauliques (Schweizer et al., 2007).

3.2.3 Lien vers l'optimisation

Le lien entre la simulation et l'optimisation peut être réalisé de deux manières, soit par la méthode *Black-box*, soit par l'approche simultanée. Une troisième méthode, hybride, reprend les avantages des deux précédentes.

La méthode *Black-box* distingue clairement la partie simulation de la partie optimisation. La première entité a pour but de calculer la fonction objectif à partir des variables de décision. La seconde entité a pour finalité de faire évoluer les variables de décision pour optimiser la fonction objectif. Schématiquement, cette méthode est représentée à la figure 3.2. Cette méthode possède l'avantage de la simplicité et de la flexibilité. Elle nécessite cependant un modèle unimodale (Favrat and Maréchal, 2002). Par ailleurs, la qualité de l'optimisation dépend directement de la qualité de la simulation. Enfin, elle peut devenir coûteuse en temps de calcul notamment pour des modèles de simulation itératifs.

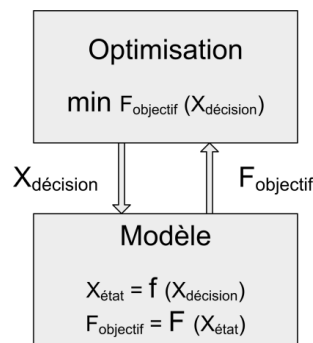


FIG. 3.2: Représentation schématique de la méthode *Black-box*

L'approche simultanée résout en même temps le problème d'optimisation et le problème de simulation. Le module de simulation calcule en fonction des résultats optimisés, la valeur de

la fonction objectif. Cette méthode possède l'avantage de la rapidité de calcul notamment pour des problèmes séquentiels ainsi qu'une grande souplesse au niveau de la définition du problème. Elle nécessite cependant un logiciel de résolution basé sur un algorithme non linéaire contraint comme par exemple le logiciel *AMPL* (Fourer et al., 2003). Par ailleurs, la solution globale n'intervient qu'à la fin du calcul, si celui-ci aboutit. Enfin, cette méthode ne convient pas de manière aisée à la simulation conditionnelle. La figure 3.3 illustre les relations entre la simulation et l'optimisation pour l'approche simultanée.

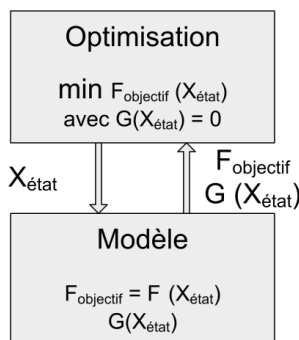


FIG. 3.3: Représentation schématique de la méthode simultanée

3.3 Modèles d'optimisation

L'optimisation d'un problème, selon ses caractéristiques mathématiques, requiert des méthodes de résolution différentes. Le classement des problèmes peut s'effectuer sur deux axes : la linéarité et la continuité. Le premier axe est relatif à la fonction objectif et à ses contraintes. Cette fonction peut être linéaire ou non-linéaire. Le second axe est relatif aux variables du problème simulé. Ces variables peuvent être continues ou entières. Ainsi définis, les problèmes d'optimisation peuvent être classés selon la figure 3.4.

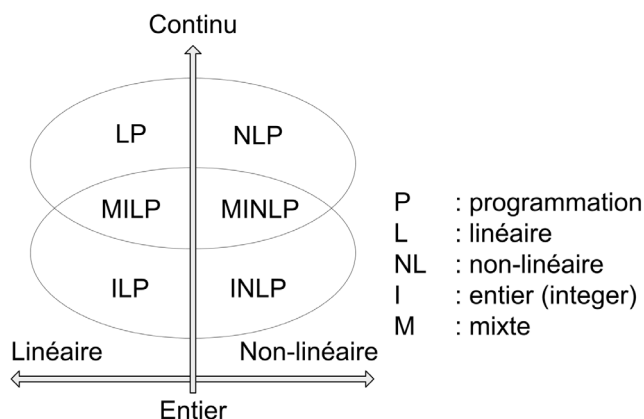


FIG. 3.4: Caractéristiques et méthodes de résolution d'un problème d'optimisation (Favrat and Maréchal, 2002)

Les techniques d'optimisation se regroupent en deux familles : les algorithmes mathématiques et les algorithmes heuristiques. A la rigueur des premiers s'opposent la flexibilité des seconds. Ceux-ci exploitent un vide laissé par les méthodes mathématiques, à savoir l'utilisation de modèles qui ne respectent pas les strictes conditions d'optimalité. Leur base

théorique repose sur l'absence de la preuve formelle d'existence d'un algorithme de résolution d'ordre polynomial plutôt qu'exponentiel pour les problèmes d'une classe donnée. Les modèles heuristiques sont nombreux et généralement issus de l'expérience. Parmi les principaux, on recense l'algorithme de Monte Carlo, les algorithmes évolutifs, les réseaux de neurones, les systèmes experts basés sur des cas ou sur des règles et la logique floue.

A l'interface entre les méthodes mathématiques et les méthodes heuristiques, de nombreuses méthodes hybrides ont été développées. Ces algorithmes appliquent soit plusieurs méthodes consécutivement au même problème, soit des méthodes différentes à des sous-parties du problème.

3.3.1 Méthodes mathématiques d'optimisation

Les méthodes mathématiques sont divisées en deux groupes : les méthodes directes et les méthodes indirectes. Les premières sont normalement applicables pour les problèmes linéaires tandis que les secondes s'adressent aux problèmes non-linéaires. Avec la distinction supplémentaire des problèmes contraints (variables continues contraintes ou continues non-contraintes) et la réunion des variables mixtes avec les variables entières, le tableau 3.1 illustre les méthodes mathématiques applicables pour les différents types de problèmes.

TAB. 3.1: Méthodes mathématiques de résolution

	Variables continues, non-contraintes	Variables continues, contraintes	Variables mixtes ou entières
Programmation linéaire	Simplex	Conversion des contraintes par des variables de relaxation	Branch and Bound
Programmation non-linéaire	Gradient Newton	PLS PQS GRG	--

Diagramme de liens :
 - Une double flèche horizontale relie "Simplex" et "Conversion des contraintes par des variables de relaxation".
 - Une double flèche horizontale relie "Branch and Bound" et "Conversion des contraintes par des variables de relaxation".
 - Une double flèche horizontale relie "Gradient Newton" et "Conversion lagrangienne".
 - Une double flèche horizontale relie "PLS", "PQS", "GRG" et "Conversion lagrangienne".
 - Une double flèche diagonale relie "Simplex" et "Gradient Newton".

L'algorithme du Simplex a été découvert par George Dantzig en 1947 (Dantzig, 2002). Il permet de résoudre très rapidement tous les problèmes linéaires non-contraints et assure d'en trouver la valeur optimale. Moyennant la conversion, pour les problèmes linéaires contraints, des contraintes d'inégalité en variables de relaxation, ce même algorithme permet de résoudre également ce type de problème. Toutefois, les limites inhérentes à la programmation linéaire ne permettent pas de traiter les variables entières ni les fonctions non-linéaires. Les premières sont habituellement utilisées comme variables de décision. Les secondes permettent de mieux représenter la réalité simulée.

Qian et al. (2005) et Devi et al. (2005) appliquent la programmation linéaire pour l'allocation des ressources hydriques avec une fonction mono-objective pondérée (multi-objectifs réduits). Lund and Ferreira (1996) appliquent cette même réduction pour définir les règles d'opération de réservoirs sur la rivière Missouri. Le problème non-linéaire à la base est rendu linéaire par partie. Schlüter et al. (2005) traitent, de la même manière, de l'allocation des ressources pour une gestion écologique. Enfin, Marino and Simonovic (1981) divisent le problème de conception et gestion d'un réservoir à buts multiples en deux parties et résolvent chacune par de la programmation linéaire.

La prise en compte des variables entières nécessite une étape supplémentaire dans la résolution du problème. L'algorithme *Branch and Bound* (Land and Doig, 1960) est le plus connu pour ce type d'optimisation. Il consiste à diviser l'espace des solutions et à trouver la solution optimale de chaque sous-ensemble. Par comparaison des solutions optimales partielles, certains sous-ensembles peuvent être éliminés. Les sous-ensembles restants sont divisés à nouveau. La méthode est itérative. Les sous-ensembles sont formés de manière à créer des systèmes linéaires partiels à variables continues. Ces sous-ensembles sont alors résolus par des algorithmes plus simples (simplex par exemple). Cette méthode, si le nombre de variables entières est grand, peut devenir lente dans la résolution. Pour éviter une partie de cette lenteur, des règles heuristiques sont ajoutées mais la garantie de trouver la solution optimale n'est alors plus assurée.

Andreu et al. (1996) utilisent les propriétés du *Branch and Bound* pour développer *AquaTool* un logiciel de planification et de gestion des ressources en eau. Crossman et al. (2007) développent un logiciel similaire, *Credos*, pour la planification des réserves écologiques aquatiques. Ce logiciel, couplé à un modèle numérique de terrain, est basé sur une technique d'optimisation linéaire en nombre entier. Le but est d'atteindre la plus-value écologique recherchée avec un nombre minimal de sites. Cette technique permet de trouver l'optimum global. Le logiciel *CalSim* développé par Draper et al. (2004) pour la conception et la gestion d'un réservoir utilise les nombres entiers pour représenter la non-linéarité liée aux décisions. Les aspects multi-objectifs sont réduits à une fonction mono-objective par pondération.

Lorsque le système, formé de variables continues et contraintes, possède une forme non-linéaire, il ne peut être résolu directement. Trois méthodes de résolution sont présentées ci-après.

1. Par la formulation de Lagrange, le système contraint est transformé en un système non-contraint de dimension supérieure. La méthode du gradient réduit généralisé (GRG) permet de résoudre le nouveau problème. Elle nécessite cependant une première solution réalisable à partir de laquelle, par itérations successives, elle progresse vers la solution optimale. Toutes les solutions intermédiaires constituent des solutions réalisables sub-optimales qui peuvent être conservées notamment si le système n'aboutit pas à la solution optimale.
2. La programmation linéaire séquentielle (PLS) construit et résout un système linéaire partiel dans un domaine limité qui correspond au point de base. Si la nouvelle solution trouvée est meilleure que celle existante, elle devient alors le point de base de l'itération suivante. Sinon, le domaine de linéarisation est réduit.
3. La programmation quadratique séquentielle (PQS) est une évolution de la programmation linéaire séquentielle. Elle remplace la fonction non-linéaire par une fonction quadratique mais nécessite de garder un système de contraintes linéaires. Le nouveau système est alors résolu par une technique classique de programmation non-linéaire d'un système non-contraint (méthode de Newton par exemple).

Sinha et al. (1999) utilisent la technique du gradient pour résoudre le problème non-linéaire posé par la gestion de sept réservoirs (en parallèle et en série) sur les rivières *Par*, *Auranga*, *Ambica* et *Purna* (Inde). Watkins and McKinney (1997) proposent une *optimisation robuste* basée sur une fonction objectif non-linéaire et des contraintes linéaires pour intégrer l'incertitude dans la gestion des réservoirs. Demny et al. (2003) utilisent avec succès la programmation quadratique séquentielle pour optimiser la forme de la prise d'eau et la forme du diffuseur d'une centrale hydroélectrique à basse chute.

Lorsque le problème est non-linéaire, contraint et possède des variables entières, il n'existe pas, à ce jour, de méthode universelle de résolution. Différents algorithmes pour des cas particuliers ont été développés. La méthode *Branch and bound* est encore souvent appliquée malgré sa lourdeur.

Cette brève revue des modèles mathématiques permet de conclure sur les propositions suivantes :

- les modèles linéaires ne posent pas de problèmes à la résolution mathématique. La solution optimale est toujours trouvée rapidement ;
- les modèles non-linéaires à variables continues peuvent être appréhendés par les méthodes mathématiques. Toutefois, il existe des limites sur la validité des résultats obtenus ainsi que sur la formulation du problème ;
- les modèles non-linéaires à variables discrètes sont difficilement traités par les méthodes mathématiques.

3.3.2 Méthodes heuristiques d'optimisation

Les méthodes heuristiques, parfois aussi appelées intelligence artificielle ou systèmes experts, possèdent un développement parallèle à celui de l'informatique qu'elles utilisent pleinement. Ces méthodes sont essentiellement basées sur du savoir-faire (système expert au sens strict) ou du mimétisme naturel (algorithme évolutif ou réseau de neurones par exemple).

Reliées au problème de modélisation par une méthode de type *Black-box*, elles proposent une solution (un vecteur des variables de décision) qui est testée par la simulation. Elles permettent une grande liberté quant à la nature du problème ou sa formulation. Quelques uns des principaux algorithmes sont présentés ci-après.

3.3.2.1 Méthode de Monte-Carlo

La méthode de Monte-Carlo, développée aux USA par von Neumann en 1937, tient son nom du célèbre casino de la Principauté de Monaco. Comme son origine étymologique le laisse supposer, il s'agit d'une méthode aléatoire simple basée sur une loi de probabilité.

La méthode consiste à explorer aléatoirement l'espace des solutions et à n'en retenir que les meilleures. Le processus s'arrête lorsque le résultat atteint est satisfaisant.

Gourmande en capacité de calcul et peu performante, cette méthode est limitée aux problèmes simples.

3.3.2.2 Algorithmes évolutifs

Parmi les méthodes aléatoires, les algorithmes évolutifs sont certainement les plus célèbres et, parmi ceux-ci, les algorithmes génétiques les plus utilisés. Développés initialement par Holland (1975), les algorithmes évolutifs sont repris en hydraulique par Goldberg and Kuo (1987) pour l'optimisation de la construction d'un réseau d'eau potable. Sharif and Wardlaw (2000) les utilisent pour l'optimisation de la conception d'un système multi-réservoirs, Filion et al. (2005) pour l'optimisation multi-objective de la gestion d'un réseau d'eau potable et Cui (2005) en particulier pour le réseau de Sydney. Les algorithmes évolutifs sont couramment appliqués aux problèmes d'hydraulique pour la gestion comme pour la

conception. Pour les problèmes de gestion des réservoirs, ils sont souvent utilisés pour définir des règles d'exploitation (Oliveira and Loucks, 1997). Couramment appliqués pour des systèmes avec deux objectifs, les algorithmes génétiques permettent des systèmes plus complexes. Baran et al. (2005) l'utilisent pour établir le planning d'une station de pompage avec quatre objectifs distincts. Ce nombre d'objectifs correspond au maximum trouvé dans la littérature. S'il est dépassé, des techniques d'agrégation sont alors utilisées. Umayal and Kamaraj (2005) réduisent leur système de cinq objectifs initiaux à un seul objectif pondéré.

Tirant profit des connaissances développées dans les sciences du vivant, les algorithmes génétiques miment le comportement adopté par les gènes lors de la transmission de l'information. A partir d'une population constituée aléatoirement, ces méthodes évoluent vers un ou plusieurs optimaux. De nombreuses évolutions ont été proposées depuis la méthode initiale. Les principales étapes de ces méthodes sont exposées ci-dessous.

La première étape consiste à créer une population initiale. Cette dernière est générée aléatoirement sur l'espace des solutions. Il est possible de définir des règles de génération pour tenir compte des individus précédents.

La seconde étape consiste à évaluer les performances de chaque individu. Dans le schéma *Black-box*, un individu est constitué d'un vecteur de décision et de sa performance. Cette dernière est calculée par le modèle de simulation avec la fonction objectif à partir de ses variables d'état.

Lorsque la performance de l'intégralité de la population est calculée, une nouvelle population est générée par combinaison des individus les plus prometteurs de la génération précédente. Les opérations de croisement (cross over operator) et de mutation (mutation operator) permettent de sortir, le cas échéant, d'un optimum local pour explorer de nouveaux horizons de l'espace des solutions.

La nouvelle population créée est alors évaluée à son tour. Le schéma est cyclique. L'itération est arrêtée après un certain nombre de simulations (typiquement 10^4 ou 10^5 selon la taille du problème) ou selon un critère d'estimation des solutions trouvées. La figure 3.5 illustre le schéma de résolution.

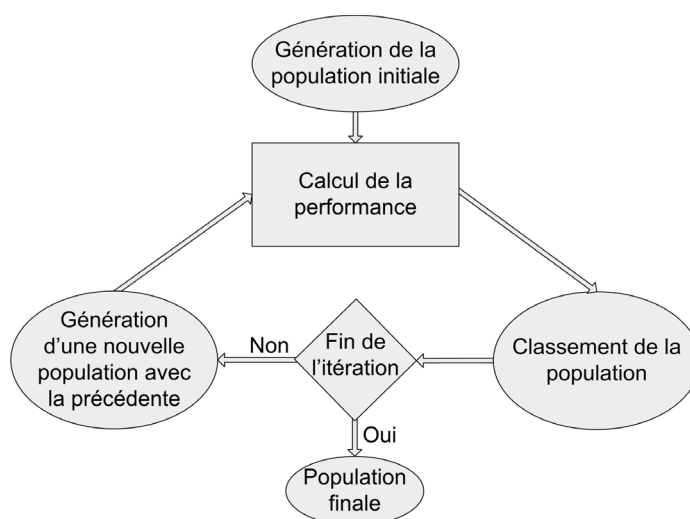


FIG. 3.5: Schéma de résolution de l'algorithme évolutif

Ces méthodes ont montré leur performance pour des problèmes très pratiques de l'ingénierie ainsi que leur capacité à trouver d'excellentes solutions sans recourir à une solution initiale (Murphy and Simpson, 1992). Elle appréhende sans difficulté des problèmes à variables discrètes ou continues, des fonctions objectif non-linéaires, non-convexes et même non-continues (Sharif and Wardlaw, 2000). Les contraintes d'inégalité sont difficilement assimilables directement. Habituellement elles sont transformées en une fonction de pénalité. Prasad and Park (2004) propose une méthode de solutions dominantes pour éviter les fonctions de pénalité.

D'un point de vue mathématique, la convergence vers les solutions optimales n'est pas garantie. Par ailleurs, selon la complexité du calcul de la performance, ces méthodes peuvent s'avérer lentes à aboutir. Les techniques informatiques de parallélisation (plusieurs unités de calcul en parallèle) s'appliquent aisément à ces problèmes et permettent, en partie, de pallier à cette lenteur.

3.3.2.3 Réseaux de neurones

Après le mimétisme des procédés de transmission d'information des algorithmes évolutifs, les réseaux de neurones miment l'architecture et le fonctionnement présumé du cerveau. A partir d'une entité élémentaire similaire au monde du vivant (le neurone), ces réseaux recomposent la complexité par interaction.

Un neurone formel est composé de variables d'entrée, de poids associés à ces variables, d'une fonction d'agrégation des données d'entrée pondérées, d'une fonction d'activation qui génère la variable de sortie. La valeur d'activation peut être continue ou discrète. Elle est généralement comprise entre -1 et $+1$. Elle nécessite un seuil d'activation. La figure 3.6 illustre schématiquement un neurone.

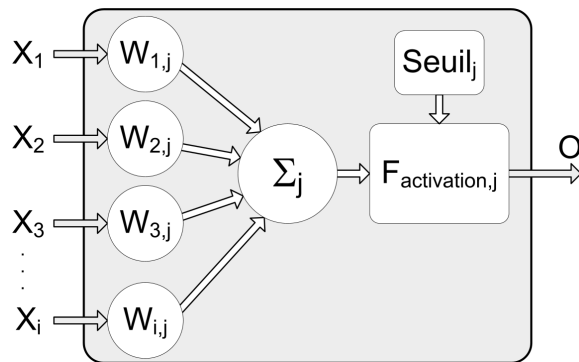


FIG. 3.6: Schéma d'un neurone formel

A partir de ces éléments constitutifs, les réseaux de neurones sont construits avec une ou plusieurs couches. Les couches intermédiaires sont appelées cachées. Un réseau de neurones comporte au maximum trois couches cachées. Cette complexité permet en effet de représenter n'importe quelle surface dans l'espace des solutions (Nikolopoulos, 1997). Rumelhart et al. (1986) ont montré qu'un système à une couche cachée suffit pour n'importe quel problème non-linéaire. Un tel système est représenté à la figure 3.7. Le vecteur X constitue les variables explicatives et y la variable de sortie.

Les réseaux de neurones, avant d'être utiles, nécessitent une phase d'apprentissage et une phase de validation. Une fois l'architecture choisie (nombre de neurones par couche cachée

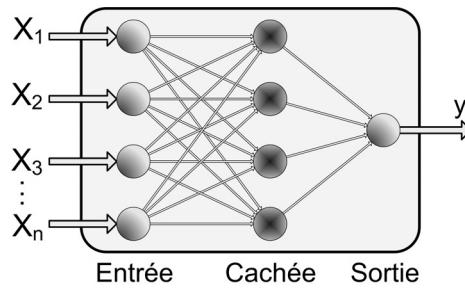


FIG. 3.7: Réseau de neurones à une couche cachée

et nombre de couches cachées), le réseau doit être entraîné avec des valeurs mesurées pour caler ses poids $W_{i,j}$ et ses seuils d'activation. Dans une seconde phase, la modèle doit être validé à l'aide d'une autre série de valeurs mesurées.

Des algorithmes de rétro-propagation permettent à ces réseaux d'optimiser la valeur des poids et du seuil d'activation de chaque neurone. Le but est de minimiser l'erreur entre les valeurs résultantes du modèle et celles mesurées. Le principe est d'augmenter la valeur du poids d'un lien en fonction du nombre de fois qu'il est activé.

Les réseaux de neurones constituent une manière élégante de reproduire le comportement d'un système sans en comprendre le fonctionnement réel. Ces modèles ne sont pas directement utilisés pour de l'optimisation. Ils permettent cependant de remplacer un système de simulation lent à calculer par un autre extrêmement rapide. Dölling and Varas (2005) utilisent cette capacité d'encapsulation des réseaux de neurones liée à une optimisation linéaire pour la gestion d'un système de trois réservoirs à buts multiples. Johnson and Rogers (2000) comparent la précision, pour la protection d'une nappe phréatique, des résultats optimaux produits par un algorithme de recuit-simulé (c.f. paragraphe 3.3.2.6) basé, pour la simulation, sur un réseau de neurones ou un modèle linéaire simplifié. Ils montrent la fiabilité supérieure des réseaux de neurones. Raman and Chandramouli (1996) utilisent les réseaux de neurones, non dans un but direct, mais pour en dériver les règles d'opération d'un réservoir. Gabrys and Bargiela (1999) les couplent à de la logique floue pour déterminer, avec des données incertaines, les dysfonctionnements d'un réseau d'eau potable. Coulibaly et al. (2005) les comparent pour de la prévision de débits en temps réel à des modèles physiques et des méthodes pondérées. Ils agrègent ensuite les trois résultats et montrent l'amélioration qui en résulte.

Calibrés à partir d'un grand nombre de valeurs, les réseaux de neurones sont performants pour modéliser les situations ordinaires. Ils sont cependant plus faibles en ce qui concerne les situations extraordinaires. Pour cette même raison, il est difficile d'extrapoler un résultat issu d'un réseau de neurones à une situation pour laquelle il n'a pas été entraîné.

3.3.2.4 Systèmes experts

Les systèmes experts, nom aussi parfois donné de manière générique à tous les systèmes heuristiques, pris au sens strict se divisent en deux classes : ceux basés sur des règles (rule based) et ceux basés sur des cas (case based). Développés dès les années 1950, ils avaient pour ambition d'aboutir à un véritable système global et unique. Devant un échec évident, ils se sont alors focalisés sur des systèmes partiels.

Les systèmes experts sont basés sur une approche symbolique qui leur permet de représenter la connaissance. Ils utilisent la logique classique (formelle, monotone, booléenne, prédicale) pour les représentations déterministes. Lorsqu'ils traitent de systèmes probabilistes, ils utilisent la logique bayésienne ou floue.

Formellement, un système expert possède quatre composants principaux qui sont une base de connaissance, un moteur d'inférence, un module explicatif et un interface utilisateur. De manière optionnelle, il peut également posséder un module d'acquisition de données qui peut être automatique ou semi-automatique. Ces modules sont représentés schématiquement selon Nikolopoulos (1997) à la figure 3.8.

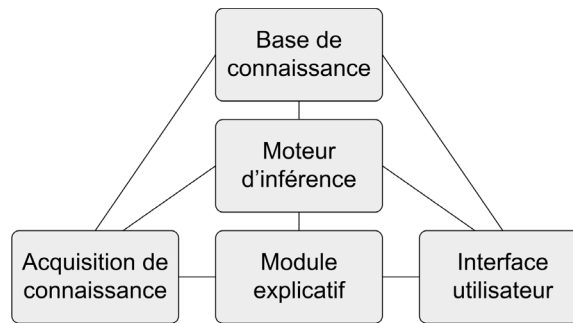


FIG. 3.8: Système expert d'après Nikolopoulos (1997)

La base de connaissance nécessite une représentation de la connaissance sous forme de règles établies ou de cas documentés. Le mode de représentation influence grandement le type de connaissance possible et la vitesse de résolution du système. Les principaux modes de connaissance sont les réseaux sémantiques, les graphes conceptuels, les réseaux de Petri et les modes orientés objet. Pour des représentations plus complexes, des modes hybrides sont développés. Ils posent cependant le problème de l'unicité de l'information ainsi que celui de la traduction entre modes. Pour les systèmes basés sur des règles, dans le cas où la logique utilisée est d'ordre 0 (logique formelle) ou d'ordre 1 (logique prédicale), il existe des moteurs d'inférence de règles. Le système est alors capable d'apprendre de nouvelles règles par lui-même.

Le moteur d'inférence permet par un jeu de règles de combiner la connaissance du module précédent. Les règles de ce module doivent être complètes, si possible uniques et former un ensemble consistant.

Les systèmes experts ont connu un développement important jusque dans les années 1990. La complexité pour maintenir le système de règles dans un état cohérent ainsi que les difficultés liées à la représentation de la connaissance leur ont fait perdre peu à peu de leur intérêt. Ils gardent toutefois à leur actif le projet MYCIN développé sur un système *rule based* dont le but médical était de découvrir les infections sanguines. Belkhouche et al. (1999) développent un système *case-based* similaire pour quantifier l'état et la qualité du Mississippi à partir d'une base de données opérationnelles.

3.3.2.5 Logique floue

La logique floue s'apparente autant aux méthodes quantitatives par sa ressemblance aux systèmes experts qu'aux méthodes qualitatives. Elle constitue une méthode frontière entre ces deux groupes. Elle est présentée au chapitre 2^{ème} avec les méthodes qualitatives.

Cette méthode transforme habilement des informations qualitatives en valeur quantitative. Elle permet ainsi d'intégrer, outre des informations qualitatives, des informations quantitatives de mauvaise qualité. Elle nécessite cependant un entraînement et une validation des résultats. Le développement de ces modèles est compliqué, peu généralisable et fait habituellement appel à des experts. Cependant lorsqu'il est fonctionnel, le calcul de solutions par un tel modèle est très rapide.

Ohkubo and Dissanayake (1999) développent un schéma de logique floue, applicable à la conception des ouvrages en général, pour une optimisation bi-objective qui comporte un objectif quantitatif mais potentiellement incertain (coût global de l'ouvrage) et un objectif qualitatif (esthétique de l'ouvrage). Owen et al. (1997) appliquent la logique floue pour définir une nouvelle gestion du *Flaming Gorge Dam* (Green River, Colorado, USA) destiné à sa conception pour la production d'énergie, la rétention des crues et la production d'eau potable auxquelles se rajoutent les aspects environnementaux et de loisirs aquatiques. Roy and Oduguwa (2003) développent un algorithme qui couple la logique floue avec un algorithme génétique pour lier des connaissances qualitatives et des aspects quantitatifs. L'optimisation à trois objectifs distincts est ensuite effectuée sur cette base. Leur algorithme est applicable de manière générale à tout problème d'ingénierie.

3.3.2.6 Algorithme du recuit-simulé

Développé par Kirkpatrick et al. (1983) au début des années 1980, l'algorithme du recuit-simulé (simulated annealing) est basé sur une analogie avec le fonctionnement thermodynamique de refroidissement et de recuit des métaux. Le but, comme en métallurgie, est d'aboutir, pour une température donnée, à un état qui minimise l'énergie interne.

Cet algorithme est basé sur les travaux de Metropolis (Metropolis et al., 1953) qui permettent de décrire statistiquement l'évolution d'un système thermodynamique. L'algorithme choisit aléatoirement une première solution, en calcule l'énergie et lui attribue une température arbitraire (plutôt élevée). Une légère modification génère une seconde solution dont on calcule l'énergie. A ce niveau, deux possibilités apparaissent :

- Si l'énergie est moindre, la nouvelle solution est acceptée. L'algorithme tend alors vers un optimum qui se situe dans cette région de l'espace des solutions.
- Si l'énergie est plus élevée, cette nouvelle solution, moins bonne, est acceptée avec une probabilité de la forme de $e^{-\frac{\Delta E}{kt}}$. Si elle n'est pas acceptée, l'algorithme repart de la solution précédente.

L'algorithme réitère jusqu'à ce que la condition d'arrêt soit respectée (itération maximale ou performance de la solution atteinte). Il calcule alors la nouvelle température et recommence. Le processus s'arrête lorsque la seconde condition d'arrêt est remplie.

Par la forme mathématique de la probabilité relative au choix d'une solution *a priori* mauvaise, cet algorithme évite, au début du processus, de se focaliser sur un optimum local. Il peut ainsi se déplacer sur l'ensemble de l'espace des solutions.

Cet algorithme nécessite un générateur de nombres aléatoires pour générer des solutions, une fonction de voisinage pour choisir une solution voisine, une fonction de refroidissement ainsi que des conditions d'arrêt. Ces valeurs sont souvent choisies de manière empirique.

Cet algorithme, depuis son élaboration, est appliqué à une multitude de problèmes et connaît de nombreuses variantes.

3.3.2.7 Programmation dynamique

Développée par Bellman (1957) la programmation dynamique s'applique à tous les problèmes d'optimisation dont la fonction objectif est une somme de fonctions monotones non décroissantes. Ces deux conditions sont souvent réunies par des problèmes qui touchent aux aspects financiers (additivité) et aux aspects de production (loi des rendements décroissants).

La programmation dynamique s'appuie sur le principe fondamental qui veut que *toute portion de trajectoire optimale est en elle-même une trajectoire optimale* (Bellman and Dreyfus, 1962). Ce principe implique que le problème puisse être divisé en portions et optimisé de manière successive ce qui n'est pas forcément le cas pour des problèmes complexes.

La division en sous-systèmes simplifie radicalement l'optimisation générale. La programmation dynamique consiste en trois étapes récursives :

- diviser le problème en sous-problèmes ;
- résoudre chaque sous-problème en utilisant si nécessaire ces trois étapes de manière récursive ;
- construire la solution optimale complète à partir des solutions optimales des sous-problèmes.

Pour éviter de recalculer, dans deux branches récursives différentes, des solutions identiques, des techniques de *memoization* ont été développées. Elles consistent à mémoriser les problèmes basiques et leurs solutions pour éviter des calculs inutiles. Une autre approche, qui porte le même nom, consiste à calculer par avance les étapes basiques et appliquer les résultats obtenus pour reconstruire la solution initiale recherchée.

Pour la gestion de la rivière *Syr Darya* (Kazakhstan, bassin de 200'000 km²), Cai et al. (2003) relèvent l'impossibilité d'utiliser la programmation non-linéaire à cause du trop grand nombre de variables. Ils utilisent ainsi la programmation dynamique pour décomposer le problème en sous-modèles. Yeh and Labadie (1997) couplent la programmation dynamique à un algorithme génétique pour trouver les meilleurs emplacements de bassins de rétention des crues sur la rivière *Pazam* (Taiwan).

3.3.2.8 Programmation par objectif (*Goal programming*)

La programmation par objectif, habituellement nommée en anglais *goal programming*, est développée par Charnes et al. (1955) dans les années 1950 pour les problèmes multi-objectifs. Il s'agit d'une méthode dérivée de la programmation linéaire qui :

- d'une part, transforme les objectifs en contraintes avec autant de nouvelles variables ;
- d'autre part, remplace les fonctions objectifs par une seule fonction composée de nouvelles variables.

Très simple d'emploi et basée sur une technique linéaire de résolution, cette méthode est très largement appliquée aux problèmes multi-objectifs. Elle n'oppose aucune limitation sur le nombre de variables, d'objectifs ou de contraintes. Les résultats sont cependant dépendants de la pondération mise sur chaque nouvelle variable dans la fonction objectif. Par ailleurs, cette méthode atteint, selon sa configuration, des solutions qui ne correspondent pas forcément à des optimaux de Pareto (c.f. paragraphe 6.3.1).

Le développement suivant, connu sous le nom de *preemptive goal programming* (PGP), divise l'optimisation en plusieurs étapes. Pour chaque étape, il ne considère qu'un seul

objectif principal et le résout de manière optimale. Cet objectif est alors transformé en contrainte du système et l'algorithme passe à l'étape suivante. Cette procédure évite de devoir choisir une pondération entre les objectifs mais établit une hiérarchie stricte entre les objectifs. Elle admet implicitement qu'il existe plusieurs solutions optimales pour les objectifs prioritaires. Par ailleurs, la ségrégation des objectifs tend à supprimer les solutions optimales des objectifs secondaires. Toutefois, si le problème est par nature hiérarchique, cette méthode permet de réduire de manière importante le nombre d'itérations nécessaires. Eschenbach et al. (2001) appliquent cette méthode avec succès pour la gestion d'un réservoir à buts multiples. Das and Datta (1999) utilisent une technique similaire (*constraint programming* avec résolution non-linéaire) pour définir la gestion optimale d'une nappe phréatique côtière. Westphal et al. (2003) développent un logiciel pour la gestion d'un réservoir multi-objectif constitué de 4 objectifs à choix. L'utilisateur peut soit en choisir un et le résoudre par une technique de *Branch and Bound*, y compris avec une fonction non-linéaire, soit choisir une résolution multi-objective. Dans ce cas, la technique du PGP est appliquée.

De nombreuses méthodes dérivées sont également développées pour appréhender des problèmes non-linéaires, pour déterminer les poids entre les objectifs ou pour définir des techniques adéquates de normalisation entre les bornes des objectifs (Tamiz et al., 1995).

3.4 Commentaires

Labadie (2004) présente encore plusieurs autres méthodes pour la gestion optimale de réservoirs : l'optimisation stochastique implicite ou explicite, la programmation dynamique discrète, la programmation dynamique différentielle. Ces méthodes sont toutes mono-objectives. Pour les méthodes multi-objectives, il ajoute en plus la méthode des contraintes et la méthode de la pondération. Lund (2005), dans une discussion sur cet article, souligne l'importance des méthodes mathématiques pour l'optimisation des systèmes multi-réservoirs. Enfin, il reste de surcroît toutes les combinaisons possibles entre les différentes méthodes. Certaines de ces combinaisons ont été citées dans les paragraphes précédents.

La littérature explorée présente différentes méthodes pour différentes optimisations possibles. Les systèmes étudiés sont soit mono, soit multi-réservoirs. Les réservoirs sont soit mono, soit multi-objectifs. Pour un réservoir unique, l'optimisation est menée, soit pour les opérations, soit pour le dimensionnement, éventuellement pour les deux. Enfin, ces différentes méthodes traitent soit de données déterministes, soit de données stochastiques.

L'objet de ce travail de recherche est un système mono-réservoir multi-objectif dont il faut optimiser la conception, le dimensionnement et le mode opératoire. La complexité du système liée aux différents objectifs ne permet pas une description globale purement analytique. Pour cette raison, il est nécessaire d'utiliser une méthode heuristique basée sur un outil de simulation.

Yeh and Becker (1982) proposent une double optimisation pour la réalisation complète d'un réservoir. La première, pour le dimensionnement, doit être stochastique tandis que la seconde, pour la gestion en temps réel, peut être déterministe. Les auteurs relèvent cependant la nécessité, pour la gestion déterministe, de fréquentes mises à jour des prévisions de débit.

Dans ce même article, pour un système multi-objectif, les auteurs proposent le concept de Pareto comme résultat final. Ils y voient l'avantage, lorsque les décideurs sont nombreux ou

lorsque les préférences sont susceptibles de changer à la fin du processus, de ne pas devoir recommencer l'optimisation. Pour aboutir à ces solutions non-dominées, ils proposent la méthodes de contraintes ou la méthodes des poids avec une analyse de sensibilité.

Gabriel et al. (2006) développent une étape supplémentaire et proposent, une fois la courbe de Pareto obtenue, une fonction d'utilité pour choisir, parmi les solutions non-dominées, celles qui correspondent le mieux aux attentes des décideurs.

Il faut cependant être attentif, lors de l'optimisation, à la définition des fonctions objectifs. Walski (2001) relève l'absence effective d'optimisation dans le domaine du dimensionnement des réseaux d'eau potable. Il attribue cet échec à un mauvais paradigme, c'est-à-dire à une optimisation basée sur la minimisation des coûts. Or il faudrait plutôt à son avis rechercher la maximisation du bénéfice net. Ce changement induit deux difficultés supplémentaires : la première consiste à calculer précisément ce bénéfice et la seconde à choisir une solution parmi plusieurs qui peuvent posséder le même bénéfice.

3.5 Conclusions

Pour rappel, les objectifs de ce travail de recherche énumérés en introduction au paragraphe 1.6 sont triples. Il s'agit de quantifier l'impact des mesures techniques sur l'ensemble du système pour les optimiser, de proposer une clé de répartition des coûts de l'aménagement entre les différents bénéficiaires et, finalement, de développer un outil d'aide à la discussion pour des aménagements à buts multiples.

Pour répondre au premier objectif (quantifier l'impact des mesures techniques) et compte tenu des développements présentés ci-dessus, il apparaît que l'établissement d'un modèle de simulation est une base nécessaire et suffisante. Ce modèle constitue un outil adéquat pour mesurer les impacts des décisions techniques sur l'ensemble des objectifs de l'aménagement à buts multiples.

Dans un second temps, ce même modèle de simulation peut être repris et intégré dans un modèle global d'optimisation. Les résultats de l'optimisation répondent ainsi directement à la seconde partie du premier objectif (optimisation des mesures techniques). Les mêmes résultats d'optimisation, définis comme des solutions de Pareto, peuvent également servir de base de discussion entre les différents acteurs et répondre ainsi au deuxième et au troisième objectifs.

A cause du double objectif poursuivi (optimisation du dimensionnement et optimisation de la gestion), l'optimisation doit être divisée en deux étapes, l'une étant imbriquée dans l'autre. L'optimisation de la gestion peut être intégrée directement au niveau de la simulation (méthode simultanée) et celle du dimensionnement intervient comme une superstructure (méthode *Black-box*). L'optimisation de la gestion peut donc être basée sur une méthode mathématique (linéaire ou non-linéaire selon la fonction objectif choisie) tandis que l'optimisation du dimensionnement utilise une méthode heuristique. Compte tenu de la taille du problème et des ses aspects multi-objectifs, un algorithme de type évolutif est approprié.

4 Analyse qualitative effectuée sur la base de la méthode de Gomez & Probst

Vernetzt denken

(Gomez and Probst, 1995)

4.1 Introduction

Sur le conseil de Coyle (2000) qui propose une *approche prudente* pour des *modèles difficiles*, cette étude débute par une analyse qualitative du problème décrit en introduction au chapitre 1^{er}.

Les trois étapes préconisées par Coyle (2000) sont :

- décrire le système étudié à l'aide d'un diagramme d'influence ;
- vérifier l'adéquation entre le modèle développé et le problème traité ;
- si nécessaire, établir un modèle quantitatif.

La première partie de ce chapitre traite spécifiquement des deux premières étapes. Elle donne un rappel de la méthode qualitative utilisée et des développements supplémentaires effectués. Puis, elle applique au Rhône valaisan la méthode complétée et en donne les principaux résultats. Elle se base sur une modélisation simplifiée du système à l'aide 40 facteurs. Une modélisation complète avec plus de 150 facteurs a également été effectuée et présentée dans Heller et al. (2004).

La seconde partie de ce chapitre traite des développements méthodologiques et informatiques effectués à partir de la méthode initiale pour aboutir à un logiciel d'estimation du Potentiel d'Amélioration des Cours d'Eau Valaisans (acronyme *PACEVs*). Une application à la Drance de Bagnes permet d'illustrer les résultats obtenus par le logiciel. Ces développements ont fait l'objet d'un rapport complet qui comprend une introduction à la problématique, les développements spécifiques, le manuel d'utilisation du logiciel, une application et les conclusions (Heller, 2006).

4.2 Méthode qualitative de Gomez & Probst

4.2.1 Rappel de la méthode

Cette méthode s'adresse initialement aux problèmes économiques. Elle donne une vision globale de l'environnement contextuel pour permettre les décisions les plus judicieuses. Indépendamment, cette méthode peut cependant être appliquée à tous les problèmes complexes. Elle tire son nom de deux professeurs de socio-économie, les professeurs Peter Gomez de l'université de Saint-Gall et Gilbert Probst de l'université de Genève qui l'ont développée

(Gomez and Probst, 1995). Le professeur Anton Schleiss de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne l'a appliquée aux problèmes hydrauliques (Schleiss, 2001).

Pratiquement, cette méthode systématise toutes les relations internes et externes du projet. Elle met en évidence les interactions directes et indirectes, positives ou négatives. Les deux maître mots sont *approche intégrée* et *réflexion en réseau*. La méthode distingue cinq étapes résumées à la Figure 4.1.

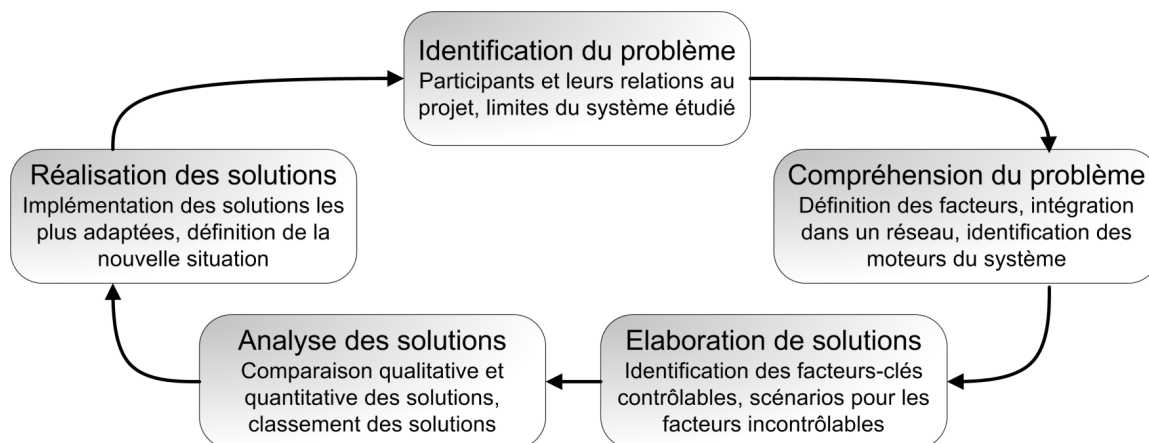


FIG. 4.1: Les cinq étapes de la méthode de Gomez and Probst (1995)

Il s'agit d'identifier le problème en le regardant sous différents angles, pour pouvoir comprendre les relations qui existent entre les différents partenaires ou agents du problème. Cette analyse doit permettre, par la mise en évidence des facteurs-clés, d'élaborer des solutions qu'il faut analyser par le biais d'indicateurs afin de pouvoir prendre les mesures nécessaires pour réaliser la solution la plus prometteuse. La réalisation génère une nouvelle situation qui engendre de nouveaux problèmes. Le schéma est cyclique.

4.2.1.1 Première étape : définition du contexte

La première étape consiste à donner au problème ses frontières ainsi que ses différents points de vue. Elle pose le contexte général en trois étapes.

1. Etablissement de la liste des acteurs. Les acteurs sont toutes les personnes, morales ou physiques, en relation avec le projet. Cette liste est dressée hiérarchiquement (catégories, classes puis acteurs précis). Comme exemple, la catégorie *politique* conduit à la classe *politique fédérale* et atteint finalement les différents départements et offices fédéraux concernés. Cette énumération se fait parallèlement par proximité géographique.
2. Définition de la perspective de chaque acteur. Elle montre comment l'acteur perçoit le projet. Elle est donnée par la réponse à des questions telles que *le projet est un système visant à* ou encore *pour tel acteur, cet aménagement doit favoriser cet aspect, ne pas nuire à cet autre*. Le bon sens suffit souvent. Au besoin, des experts sont interrogés.
3. Etablissement de la liste des facteurs. La compréhension du système au travers des acteurs, permet d'établir la liste des facteurs. Un facteur est un élément qui agit sur le système. Il peut être externe ou interne au système.

4.2.1.2 Seconde étape : définition du réseau d'influence

La seconde étape de la méthode est le point central du travail. Elle définit le fonctionnement du système étudié. Elle comprend deux parties.

Dans un premier temps, la construction du réseau relie tous les facteurs définis à la première étape. Elle met en évidence les relations réciproques. De nombreux facteurs s'ajoutent lors de cette construction. La figure 4.2 illustre, par un exemple simple, un tel réseau.

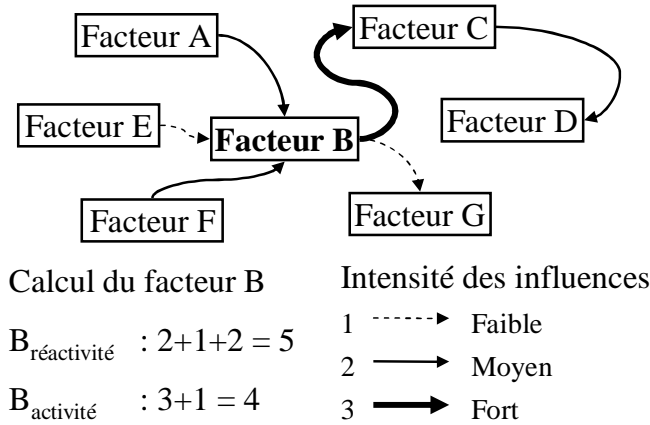


FIG. 4.2: Exemple fictif d'un réseau d'influence et de son calcul

Les relations sont caractérisées qualitativement par trois aspects :

- selon que l'effet est renforçant ou atténuant (+ / -)
- selon une intensité d'influence (faible, moyenne et forte, respectivement 1, 2 et 3)
- selon une perspective temporelle (court, moyen, long terme).

Le réseau complet constitue le graphe d'influences réciproques des facteurs. Une relation représente la dérivée partielle f de la fonction F qui relie un facteur à un autre. Si le facteur B dépend des facteurs A, E et F (c.f. figure 4.2), alors la relation f de A vers B peut s'exprimer comme

$$f(A \rightarrow B) = \frac{\partial F(A, E, F)}{\partial A} \quad (4.1)$$

Souvent la fonction F n'est pas connue explicitement. Une approximation qualitative de ses dérivées partielles permet de l'approcher. D'un modèle explicite basé sur des relations quantitatives, on passe à un modèle qualitatif d'influences relatives.

L'effet renforçant ou atténuant est symbolisé par un signe positif ou négatif (+ ou -). Il indique l'effet de la cause sur la conséquence. Mathématiquement, il s'agit du signe de la dérivée partielle. Ainsi, dans l'exemple de la figure 4.3, la croissance ou la décroissance de la population ne change pas le signe des relations. L'augmentation des naissances implique une augmentation de la population qui, à son tour mais avec un décalage temporel, conduit à une augmentation des naissances. Ce même cycle peut également expliquer la décroissance de la population (baisse de la population induit baisse des naissances qui induit baisse de la population). Les relations entre ces deux facteurs gardent cependant toujours le même signe. L'effet renforçant ou atténuant ne permet cependant pas de distinguer l'opérateur mathématique qui intervient dans la dérivée. Il modélise des fonctions linéaires uniquement.

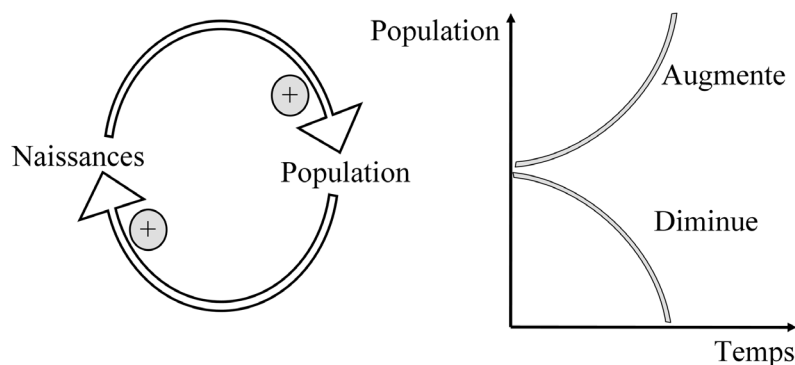


FIG. 4.3: Relations démographiques, illustration du signe de la relation entre les facteurs

L'intensité de la relation caractérise le degré d'influence d'un facteur sur un autre. Elle quantifie mathématiquement la valeur de la dérivée. Selon les auteurs de la méthode, trois degrés d'influence sont suffisants. Ils ne permettent que la représentation de fonctions simples. Les changements de pente, les paliers, les influences réversibles ou les sauts ne peuvent pas être considérés.

L'effet temporel donne une indication sur le temps nécessaire à une variation pour se propager sur les facteurs suivants. Elle est un retard pour la propagation des effets.

Dans un second temps, le réseau est résumé sur une matrice d'influence. Cette matrice peut être représentée sous forme de graphe d'influence. Celui-ci sépare les facteurs actifs des facteurs réactifs. L'activité d'un facteur est schématisée sur le réseau par une relation sortante, la réactivité par une relation entrante. L'intensité de la relation est prise en compte comme pondération de l'action. Le calcul de l'influence est illustré à la figure 4.2. La somme active et réactive de chaque facteur génère la matrice d'influence.

Le graphe d'influence est une représentation de la matrice d'influence (figure 4.4). Ce graphe distingue quatre zones. Les facteurs inertes, activité et réactivité faibles, représentent les éléments secondaires sans fortes interactions avec le projet. Les facteurs réactifs, activité faible et réactivité forte, représentent les conséquences des décisions prises au sein du projet. Ce sont d'excellents indicateurs. Les facteurs actifs, activité forte et réactivité faible, sont les leviers du projet. Une variation à leur niveau permet de changer le projet. Ils jouent le rôle de directeur du projet. Enfin, les facteurs critiques, activité et réactivité fortes, doivent être traités avec prudence. Ils peuvent servir de levier mais sont susceptibles de provoquer des réactions en chaîne.

Pour faciliter la lecture, le graphe est normé horizontalement sur l'élément le plus actif et verticalement sur l'élément le plus réactif. La frontière des différentes zones se situe à la valeur de 50%. Le caractère partiellement subjectif de cette séparation nécessite une certaine souplesse. Une bande de largeur indéterminée fait office de zone incertaine.

4.2.1.3 Troisième étape : élaboration de solutions

La troisième étape consiste à élaborer des solutions. Il faut repérer les éléments non dirigeables. Dans la mesure où ils influencent d'autres facteurs, il convient de ne pas les négliger. L'établissement des scénarios vraisemblables à leur égard permet d'étudier l'impact de leurs variations sur les facteurs réactifs. Ces facteurs non dirigeables représentent les contraintes du problème à résoudre.

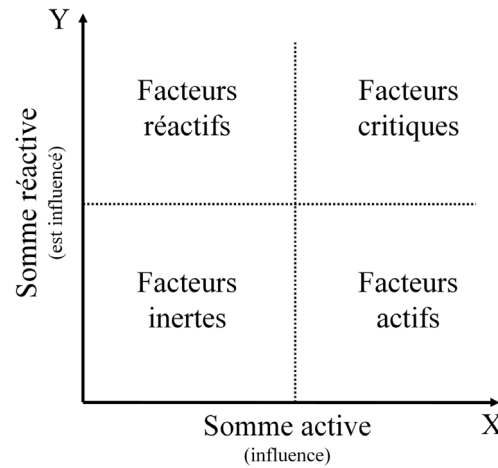


FIG. 4.4: Définition des zones du graphe d'influence

Les facteurs qui servent d'indicateurs forment une base objective pour l'analyse des différentes solutions générées. Ils sont choisis parmi les facteurs réactifs.

Enfin, il faut distinguer les solutions qui s'inscrivent dans un processus stabilisant de celles qui sont déstabilisantes. Pour des raisons de stabilité du système, on ne retient que les solutions stabilisantes.

4.2.2 Développements apportés à la méthode de Gomez & Probst

Une relation entre deux éléments possède toujours deux directions. Elle est causale dans un sens et finale dans l'autre. L'influence physique d'un élément correspond à l'influence logique de l'autre. A titre d'exemple, la hauteur du barrage génère physiquement le volume d'accumulation. Mais c'est le besoin d'un volume d'accumulation qui justifie la hauteur du barrage. Face à la pluralité des logiques possibles, l'approche physique est unique. C'est pourquoi elle est choisie.

Pour respecter les transformations physiques, les modèles basés sur cette approche induisent un grand nombre de facteurs. Il en résulte que les facteurs-clés sont séparés les uns des autres par des facteurs d'intérêt secondaire. Dès lors, la considération des influences directes seules devient insuffisante. La prise en compte des influences indirectes nécessite un nouveau mode de calcul. Basé sur l'exemple de la figure 4.2, l'activité du facteur A sur les facteurs B, C et D est calculée selon l'équation 4.2.

$$Activité_{AD} = \alpha_{GP} * I_{AB} + \beta_{GP} * I_{AB} * I_{BC} + \gamma_{GP} * I_{AB} * I_{BC} * I_{CD} \quad (4.2)$$

où I_{AB} représente l'intensité entre les facteurs A et B, I_{BC} l'intensité entre les facteur B et C et I_{CD} l'intensité entre C et D. Les influences indirectes sont calculées comme le produit des intensités (I_{AB} , I_{BC} , I_{CD}). L'agrégation est effectuée par sommation des influences directes et indirectes pondérées par un coefficient (α_{GP} , β_{GP} , γ_{GP}) La valeur de ces coefficients est donnée au tableau 4.1.

Ces valeurs sont générées à partir de deux idées. Le numérateur donne une importance décroissante à l'intensité selon la distance qui sépare les facteurs (valeur de 4, 2 et 1). Le dénominateur cherche à rendre la somme adimensionnelle. Il divise ainsi le numérateur par

TAB. 4.1: Coefficient d'agrégation des influences

Influence	Directe	Indirecte 1 ^{er} ordre	Indirecte 2 ^{ème} ordre
Représentation	A → B	A → B → C	A → B → C → D
Coefficient	α_{GP}	β_{GP}	γ_{GP}
Calcul primaire	4/1	-	-
Calcul secondaire	4/1	2/3	-
Calcul tertiaire	4/1	2/3	1/9

le produit maximal des intensités indirectes. Comme l'intensité maximale a un poids de 3, il divise les intensité indirectes par 3 ou par 9 (intensités indirectes de premier et de second ordre respectivement).

Le modèle primaire de calcul est basé sur les influences directes seulement. Le modèle secondaire ajoute les influences indirectes du premier ordre. Le modèle tertiaire considère, en plus, les influences indirectes du second ordre.

4.2.3 Application de la méthode qualitative pour un aménagement à buts multiples sur le Rhône valaisan

Les acteurs du système sont divisés en quatre groupes principaux. Le premier groupe considère les partenaires politiques. Les niveaux politiques fédéral et cantonal sont regroupés dans les mêmes acteurs. Le second groupe énumère les partenaires économiques. Selon la classification habituelle des secteurs d'activité, (secteurs primaire, secondaire et tertiaire) les acteurs économiques sont l'agriculture, la construction, les producteurs d'électricité, la finance, le tourisme et les promoteurs du projet à but multiple. Le troisième groupe considère les partenaires environnementaux. Deux acteurs regroupent, d'une part, les associations qui oeuvrent au niveau national (GreenPeace, WWF, ProNatura,...) et, d'autre part, les associations ou partenaires locaux (ProNatura section valaisanne, association valaisanne de pêche, de chasse, ...). Le dernier groupe représente la population concernée. Il s'agit, d'une part, des autorités locales (autorités communales) et, d'autre part, des riverains directs concernés par le projet. Pour chaque acteur, le tableau 4.2 résume les principaux intérêts en interaction avec le projet à buts multiples.

L'analyse des 15 acteurs et de leurs intérêts relatifs conduit aux facteurs du système. Le comportement physique de l'aménagement à buts multiples mène à une distribution des facteurs selon six thèmes principaux : hydraulique, énergie, finance, socio-économie, nappe phréatique et écologie. Le système simplifié regroupe 40 facteurs. Le tableau 4.3 répartit les facteurs selon les six thèmes choisis.

Le réseau simplifié est construit à partir de cette liste. Il est présenté à la figure 4.5. La pondération entre les différents facteurs est le résultat d'un travail de groupe mené dans le cadre du projet Synergie. Ce projet, qui englobe le présent travail de recherche, est constitué d'experts dans les domaines cités ci-dessus. Il s'agit en particulier de spécialistes dans les domaines de la gestion des rivières, des machines hydrauliques, de la construction hydraulique, de la gestion de la nappe phréatique, de l'écologie aquatique ainsi que des aspects sociaux relatifs aux réseaux hydriques. La figure 4.5 distingue les six thèmes principaux par une trame différente des facteurs pour chacun des groupes. La pondération entre les facteurs reprend la typologie de la figure 4.2.

TAB. 4.2: Acteurs du système avec leurs principaux intérêts

Catégorie	Participant	Intérêt
Politique	Energie	Production d'énergie indigène, énergie à bas-prix, sécurité du réseau
	Aménagement territoire	Intégration des ouvrages de génie civil, respect du paysage et de l'environnement
	Ecologie	Préservation de la faune et de la flore, développement durable
	Agriculture	Sécurité d'approvisionnement, production indigène, infrastructures de vente
	Economie	Création d'emplois, perception de taxes, développement du tourisme
Economie	Agriculture	Qualité/quantité des terrains, création de marché, liberté de transaction des terres arables
	Tourisme	Promotion locale, infrastructure de loisirs et de détente
	Producteurs énergie	Infrastructure de production, liberté de gestion, bénéfice lié à l'exploitation
	Construction	Développement et réalisation de projets
	Finance	Capacité d'investissement, profitabilité, réputation de l'établissement
	Promoteurs du projet	Profitabilité, acceptation sociale du projet, support politique
Ecologie	ONG écologiques	Préservation de la faune et de la flore, développement durable, soutien social
	Organisations locales	Préservation de la faune et de la flore, préservation des particularités locales
Local	Autorités communales	Développement local, croissance de la population, perception de taxes
	Riverains	Infrastructures de loisirs et de détente, développement social, sécurité, emploi

TAB. 4.3: Facteurs du système répartis dans les six thèmes

Hydraulique	Energie	Finance
Rivière de contournement	Bénéfice énergétique	Impacts financiers
Elévation du barrage	Prix de l'énergie	Investissement publics
Réduction du marnage	Production d'énergie	Coût de protection crues
Contre-canaux	Flexibilité de production	Impôts
Débit d'étiage	Puissance installée	
Réduction débit crues	Coûts d'opération	
Débit digue perméable	Taux participation à investissement	
Battements réservoir		
Surface réservoir		
Volume réservoir		
Socio-économie	Nappe phréatique	Ecologie
Production agricole	Perméabilité digues	Algues
Promotion agricole	Topographie riveraine	Diversité écotonale
Emplois	Type occupation riveraine	Etat écologique rivière
Intégration paysagère	Perméabilité de la nappe	Macro-invertébrés
Support politique	Problème lié à la nappe	Charge en suspension
Infrastructure loisirs		Température eau
Risques résiduels		
Développement tourisme		

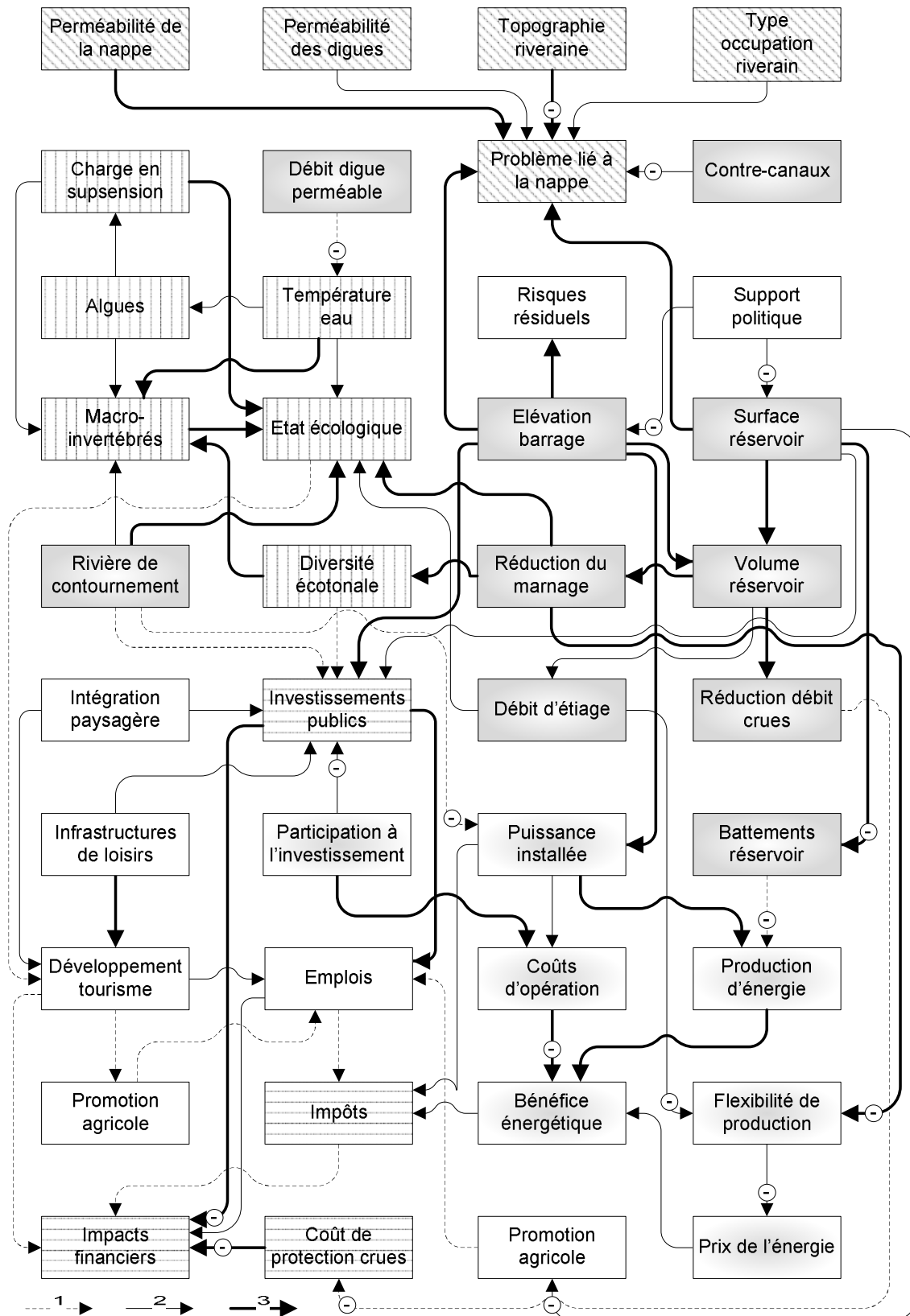


FIG. 4.5: Réseau simplifié pondéré du système (40 facteurs)

4.2.4 Analyse de sensibilité de la méthode de Gomez & Probst

Sur la base du réseau simplifié, constitué de 40 facteurs, deux analyses de sensibilité sont effectuées. La première analyse étudie l'influence des modifications de l'intensité des relations entre les facteurs. La seconde analyse étudie l'influence du choix du modèle (modèle primaire, secondaire ou tertiaire). La figure 4.6 illustre les résultats.

Les résultats comparent, pour l'ensemble des 40 facteurs, les déplacements moyens et extrêmes selon les deux axes indépendamment (activité axe X ou réactivité axe Y). Ces déplacements sont exprimés en pourcentage de variation (ΔX par rapport à 100%_x et ΔY par rapport à 100%_y). Les résultats considèrent également les permutations moyennes et extrêmes des facteurs entre eux (les facteurs A et C de la figure 4.6 permutent leur rang sur l'axe de la réactivité : C est le moins réactif alors que c'est α qui le devient). Finalement, cette étude analyse la capacité des facteurs à rester dans la même zone (le facteur B passe la zone réactive à la critique alors que A et C restent chacun dans leur zone d'origine), indépendamment du modèle et des intensités choisis.

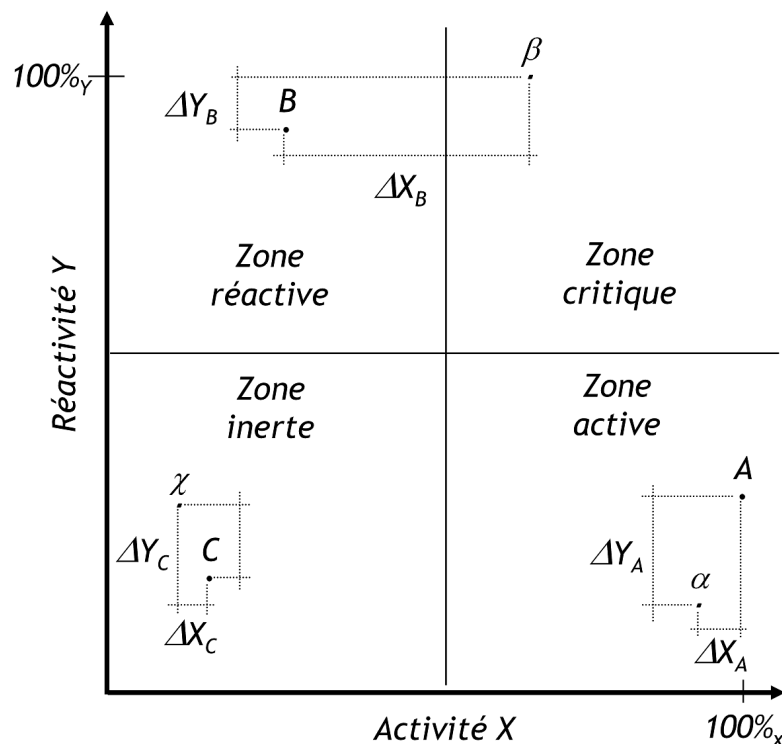


FIG. 4.6: Illustration de la variation des facteurs entre deux calculs (lettres latines et grecques)

4.2.4.1 Analyse de sensibilité sur l'intensité des relations

La première analyse compare, avec les coefficients suggérés (c.f. tableau 4.1), les résultats produits par des intensités constantes pour chaque relation (poids de 2 pour chaque relation) avec les résultats produits par les intensités définies selon les experts du système (c.f. figure 4.5). Chaque modèle est comparé avec lui-même (primaire, secondaire et tertiaire). La comparaison des résultats obtenus est donnée au tableau 4.4.

La variation moyenne maximale des déplacements est égale à 10% de la valeur maximale d'activité ou de réactivité. Ce résultat est similaire indépendamment du modèle choisi ou

TAB. 4.4: Analyse de sensibilité sur l'intensité des relations (pondération "experts" ou pondération constante)

	Primaire		Secondaire		Tertiaire	
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
Moyen	Variation du taux (activité ou réactivité)					
	9 %	4 %	9 %	4 %	10 %	5 %
	Permutation (activité ou réactivité)					
	1.7	0.8	3.4	1.2	3.4	1.7
Max	Variation du taux (activité ou réactivité)					
	33 %	28 %	37 %	18 %	40 %	31 %
	Permutation (activité ou réactivité)					
	7	3	12	10	13	10

de l'axe considéré. En terme de classement, la permutation moyenne maximale est de 3.4 positions (tableau 4.4 deuxième ligne, troisième ou cinquième colonnes) ce qui correspond, relativement au 40 facteurs, à 9%. Ce résultat, en pourcentage, est comparable à la variation du taux.

La variation de déplacement maximale observée vaut 40% (tableau 4.4 troisième ligne, cinquième colonne, facteur : rivière de contournement). Elle coïncide avec une permutation de 3 positions. La permutation maximale observée est de 13 positions (tableau 4.4 quatrième ligne, cinquième colonne, facteur : promotion agricole). Elle correspond à une variation du déplacement de 14%. Ce grand nombre de permutations pour une variation relativement petite s'explique par la présence de ce facteur dans la zone inerte qui en contient beaucoup d'autres. Ce résultat souligne la présence de nombreux facteurs d'intérêt secondaire liés à l'approche physique de la modélisation.

Une analyse similaire, basée sur les facteurs principaux (facteurs qui ont une activité ou une réactivité supérieure à 50%), donne des variations moyennes de déplacement légèrement supérieures et des variations maximales équivalentes. Les permutations (moyennes et maximales) sont cependant réduites de manière significative. Le tableau 4.5 illustre ces résultats.

TAB. 4.5: Analyse de sensibilité sur l'intensité des relations, facteurs dont l'activité ou la réactivité dépasse 50%

	Primaire		Secondaire		Tertiaire	
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
Moyen	Variation du taux (activité ou réactivité)					
	13 %	9 %	13 %	11 %	15 %	14 %
	Permutation (activité ou réactivité)					
	0.7	0.5	0.6	1.5	0.7	2.2
Max	Variation du taux (activité ou réactivité)					
	33 %	28 %	37 %	18 %	40 %	31 %
	Permutation (activité ou réactivité)					
	3	1	2	2	3	3

4.2.4.2 Analyse de sensibilité selon le modèle choisi

La seconde analyse compare les trois différents modèles (primaire secondaire et tertiaire). Basés sur les intensités des relations données par les experts, les modèles secondaires et tertiaire sont comparés au modèle primaire. Les résultats sont illustrés dans le tableau 4.6.

TAB. 4.6: Analyse de sensibilité sur le choix du modèle de calcul (primaire, secondaire ou tertiaire)

	Primaire		Secondaire		Tertiaire	
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
Moyen	Variation du taux (activité ou réactivité)					
	0%	0%	5%	4%	6%	6%
Max	Permutation (activité ou réactivité)					
	0	0	1.1	1.1	1.3	1.3
Moyen	Variation du taux (activité ou réactivité)					
	0%	0%	26%	27%	35%	35%
Max	Permutation (activité ou réactivité)					
	0	0	8	3	9	4

Les deux premières colonnes ne contiennent que des zéros. Il s'agit de la comparaison du modèle primaire avec lui-même. Logiquement, la différence observée est nulle.

La variation moyenne maximale des déplacements vaut 6% de la valeur maximale d'activité (tableau 4.6, première ligne, cinq ou sixième colonnes). En terme de rang, la permutation moyenne maximale s'élève à 1.3 positions, ce qui, entre terme de pourcentage, est légèrement inférieur à la variation correspondante des déplacements (environ 3% sur les 40 facteurs de la modélisation). Les variations maximales de déplacement montrent des valeurs importantes. Les mêmes raisons que celles du paragraphe 4.2.4.1 sont ici également valables. L'analyse basée sur les facteurs principaux (facteurs dont l'activité ou la réactivité est supérieure à 50%) donne des résultats similaires pour les variations et permutations moyennes (tableau 4.7).

TAB. 4.7: Analyse de sensibilité sur le choix du modèle de calcul, facteurs dont l'activité ou la réactivité dépasse 50%

	Primaire		Secondaire		Tertiaire	
	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY	ΔX	ΔY
Moyen	Variation du taux (activité ou réactivité)					
	0%	0%	6%	14%	8%	20%
Max	Permutation (activité ou réactivité)					
	0	0	0.7	1.8	0.6	1.8
Moyen	Variation du taux (activité ou réactivité)					
	0%	0%	11%	27%	13%	35%
Max	Permutation (activité ou réactivité)					
	0	0	2	3	2	4

4.2.4.3 Conclusions de l'analyse de sensibilité

Les deux analyses de sensibilité permettent de tirer les conclusions suivantes.

1. La méthode doit être limitée aux facteurs principaux.
2. La méthode est indépendante, pour les facteurs principaux, du modèle de calcul choisi. Ceci montre également une relative indépendance du choix des coefficients.
3. La méthode classe les facteurs sans que les poids des intensités soient prépondérants. Ces dernières apportent donc une sensibilité supplémentaire à la méthode.
4. La frontière entre les différentes zones (inerte, active, passive, critique) doit être relaxée. Ainsi la ligne de démarcation, initialement fixée à 50 % doit devenir une plage dont une largeur de 10 % semble raisonnable.

De la sorte, les aspects les plus discutables de cette méthode qualitative (choix du modèle et choix du poids des intensités) perdent leur influence sur les résultats et la méthode peut donc être qualifiée d'objective.

4.2.5 Résultats de la méthode de Gomez & Probst

Le modèle tertiaire, avec les intensités telles que définies par les experts, est choisi pour effectuer l'analyse des résultats. L'analyse partielle du sous-modèle hydraulique ainsi que l'analyse globale sont présentées ci-après.

4.2.5.1 Analyse du sous-modèle hydraulique

Le modèle hydraulique souligne deux facteurs actifs, deux facteurs critiques, trois facteurs réactifs et trois facteurs inertes. La figure 4.7 illustre ce résultat.

Avec une activité des 100 %, l'*élévation du barrage* est le facteur le plus actif de ce système. Il représente le facteur-clé de la structure hydraulique. Pour un aménagement hydraulique au fil de l'eau, la hauteur du barrage conditionne directement :

- la production d'énergie possible ;
- le volume disponible pour le laminage des crues ;
- le coût du projet à travers la surélévation nécessaire des digues et la surélévation du barrage lui-même.

Cette hauteur influence également le niveau d'eau de la nappe souterraine et les mesures nécessaires pour contenir cette influence. La légère réactivité du facteur *élévation du barrage* provient de sa dépendance aux contraintes légales et aux aspects politiques.

Le second facteur le plus actif est la *surface du réservoir* avec une activité de 78 %. Selon le but principal de l'aménagement qui est de réduire le marnage dans la rivière aval, la surface du réservoir représente également un facteur-clé qui permet d'atteindre ce premier but et, en même temps, de limiter les battements dans la retenue. La surface est directement proportionnelle au volume du réservoir ainsi qu'aux infiltrations dans la nappe phréatique.

La position relative entre *élévation du barrage* et *surface du réservoir* est difficile à distinguer. Ils forment tous deux le volume du réservoir. Toutefois, selon les prix unitaires d'acquisition de la surface et comparativement au prix de surélévation du niveau d'eau, l'augmentation du volume est probablement plus intéressante par un accroissement de surface. Ainsi la hauteur du barrage a une activité légèrement supérieure. Un modèle quantitatif doit cependant confirmer ce résultat.

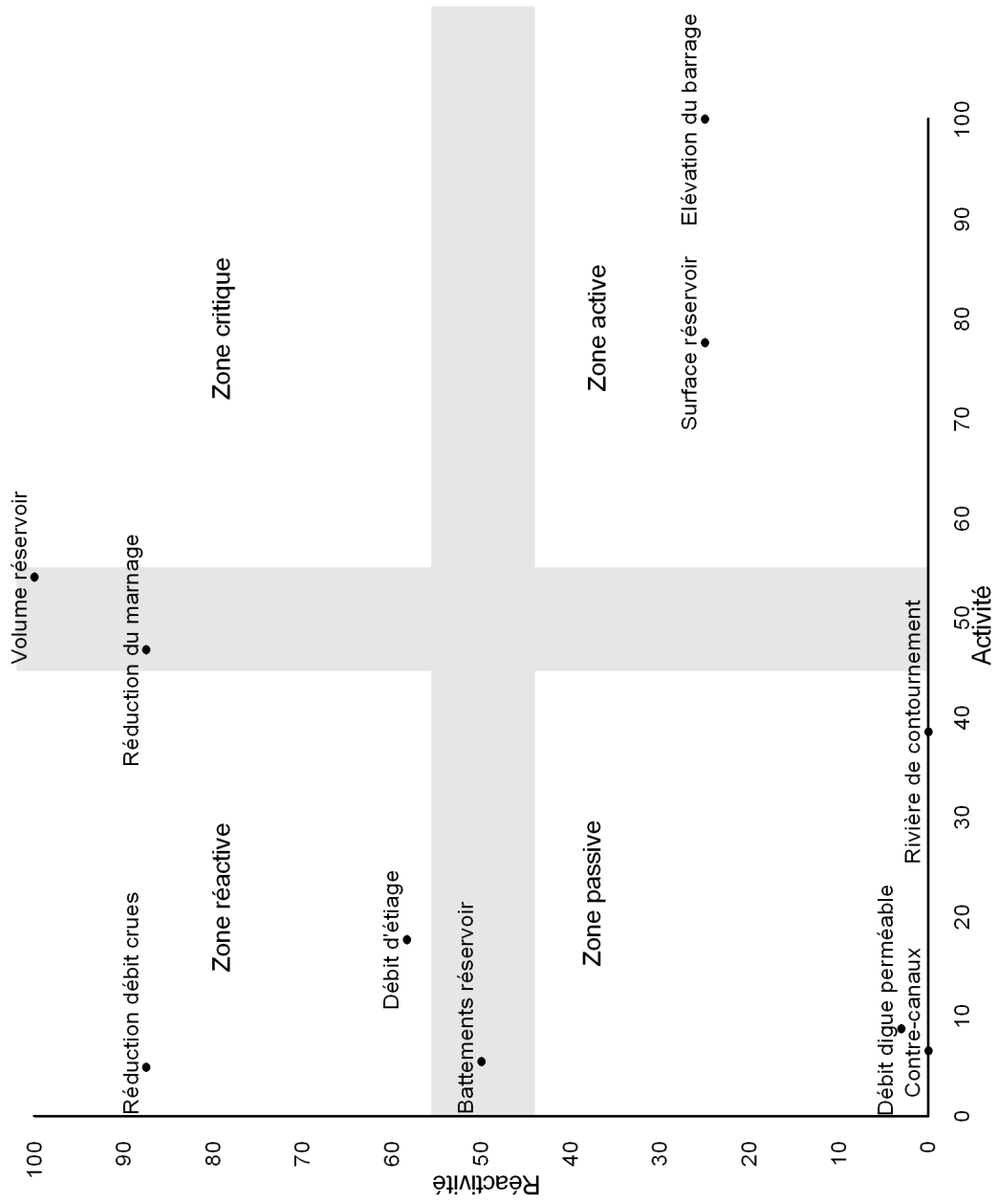


FIG. 4.7: Résultats basés sur les facteurs hydrauliques de la modélisation

Le *volume du réservoir* est issu du produit entre l'*élévation du barrage* et la *surface du réservoir* ; il ne constitue pas un facteur-clé. Sa position critique lui confirme sa fonction de facteur de transition. Il est typiquement une conséquence de l'approche physique de la modélisation.

Le facteur de *réduction du marnage* a également une position critique. Cette réduction est une conséquence directe de la manière dont le réservoir est opéré, tout en respectant les contraintes physiques (volume du réservoir, niveau maximal). Elle influence directement les impacts écologiques aval. Cette réduction peut également être vue comme une contrainte minimale à respecter vis-à-vis de la rivière aval. Compte tenu de l'hydrogramme entrant dans l'aménagement, cette nouvelle contrainte conditionne directement le volume nécessaire du réservoir. Comme sa réactivité dépasse celle du réservoir, la priorité doit être donnée à la gestion de la rivière aval plutôt qu'à celle du réservoir. Les battements du réservoir doivent être compensés par une morphologie adéquate des rives (pente des rives, matériau, cordon écologique).

La *réduction des débits de pointe de crues*, avec une réactivité de 88 %, possède une position passive similaire à celle du marnage. Ces deux réductions représentent les buts hydrauliques directs de l'aménagement. Cependant la combinaison de la réduction du marnage et du débit aval minimum en un seul facteur, l'hydrogramme aval, donne une préférence à la gestion habituelle de l'aménagement (réactivité de ce facteur combiné de 100 %) sur celle des événements rares (crues). Cette constatation permet d'établir une priorité entre les deux buts hydrauliques. L'établissement de cette priorité influence considérablement le choix du site d'un tel aménagement.

Finalement, les trois derniers facteurs hydrauliques, le *débit de la digue perméable*, les *contre-canaux* et la *rivière de contournement*, sont d'un intérêt secondaire. Ce sont toutefois des facteurs purement actifs (réactivité réduite à une valeur nulle). Il faut les considérer comme des contraintes du projet. Ils permettent, respectivement, de générer un courant minimum dans le réservoir, de limiter les impacts hydrauliques sur la nappe phréatique à une zone restreinte ainsi que d'assurer la continuité écologique longitudinale de la rivière.

4.2.5.2 Analyse du modèle complet

Les résultats du modèle complet soulignent cinq facteurs actifs, huit facteurs réactifs et aucun facteur critique. A cause de l'approche physique de la modélisation, la graphe contient de nombreux facteurs inertes. La figure 4.8 illustre ce résultat.

La figure 4.8 place le facteur *élévation du barrage* au même degré d'activité que l'analyse précédente (100 % d'activité). Puisque la hauteur du barrage est un facteur hydraulique, l'ensemble des facteurs hydrauliques conservent leur même taux d'activité. A l'inverse, leur taux de réactivité est fortement réduit. Le facteur *état écologique de la rivière* devient le facteur le plus réactif et décline ainsi le facteur *volume du réservoir* à un taux de réactivité de 27 %. La réactivité des facteurs hydraulique est donc réduite d'un facteur 4 environ. Cette faible réactivité comparée à leur forte activité classe les facteurs hydraulique parmi les leviers du système. Ce résultat est confirmé par le bon sens qui veut que la base du comportement d'un ouvrage au fil de l'eau soit de type hydraulique.

A côté des facteurs hydrauliques, le facteur *support politique* possède une large activité. Il demeure cependant, à l'intérieur du projet lui-même, un facteur non-dirigeable. Cet aspect doit être considéré comme une contrainte directe du projet. Donner des limites raisonnables

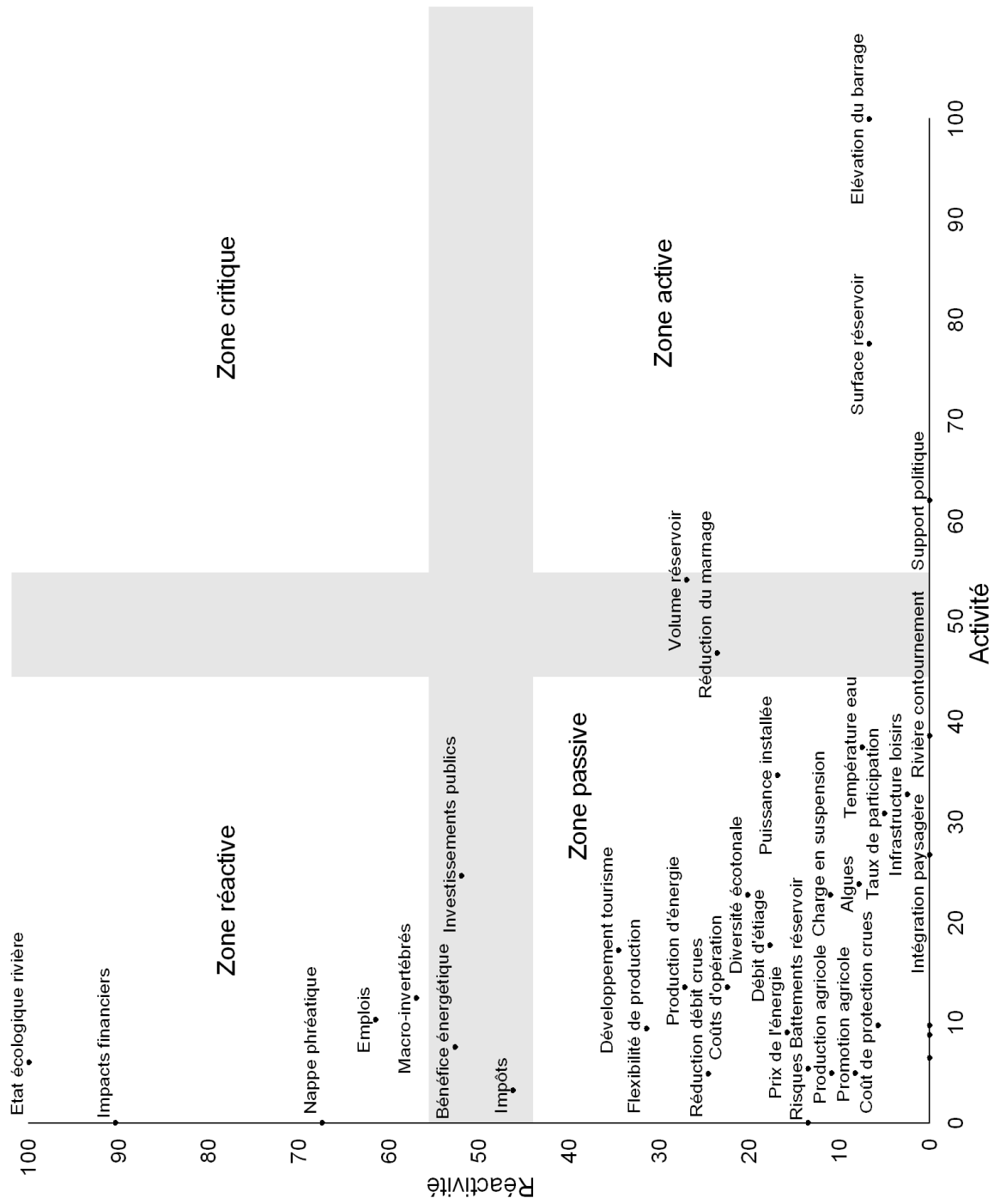


FIG. 4.8: Résultats basés sur l'ensemble des 40 facteurs de la modélisation

aux facteurs qu'il influence (hauteur du barrage, surface du réservoir, débit de la rivière de contournement, élévation du niveau de la nappe phréatique) est une manière élégante de le respecter.

Les facteurs réactifs désignent différents aspects de l'aménagement

1. l'état écologique de la rivière (100 % de réactivité) et les *macro-invertébrés* (55 %) ;
2. les aspects financiers avec les *impacts financiers* (91 %), les *impôts*, soit tous types de taxes (46 %) et les *investissements publics* (52 %) ;
3. les aspects liés à l'impact sur la *nappe phréatique* (67 %) ;
4. les aspects socio-économiques avec les *emplois* (61 %) ;
5. l'énergie avec le *bénéfice énergétique* potentiel (53 %).

Selon les six thèmes principaux concernés par cette modélisation, cinq d'entre eux constituent des buts directs de l'aménagement proposé ; ils sont résumés par les huit facteurs précédents.

Ainsi les buts de cet aménagement peuvent être redéfinis comme la maximisation des bénéfices écologiques tout en limitant, d'une part, le coût total du projet et, d'autre part, les impacts sur la nappe phréatique. Les aspects socio-économiques et la production d'énergie tirent profit de l'aménagement à buts multiples et doivent être considérés comme des opportunités. Ils ne constituent pas les buts premiers.

4.2.5.3 Résumé des résultats obtenus

Les résultats des différents graphes peuvent être synthétisés selon deux axes. Le premier axe forme le vecteur solution, c'est-à-dire qu'il regroupe l'ensemble des variables de projet et de gestion. Le second axe contient les variables des fonctions objectif partiel, c'est-à-dire, les variables objectif. Cette classification permet la distinction de trois groupes de variables.

Le premier groupe définit la taille du projet. Les variables principales de ce groupe sont la hauteur du barrage, la surface du réservoir, le débit de la rivière de contournement et le débit équipé de la centrale hydroélectrique.

Le second groupe synthétise les règles d'opération de l'aménagement. Il peut se résumer à une seule variable de gestion, l'hydrogramme aval. Selon l'hydrogramme amont ou entrant de l'aménagement, qui est une variable non-dirigeable du système, le niveau d'eau du réservoir, la production d'énergie et la réduction du marnage sont autant de conséquences directes et uniquement dépendantes de l'hydrogramme aval.

Le troisième groupe qualifie les résultats atteints par le projet. Il est composé de variables hydrauliques, énergétiques, socio-économiques, écologiques et financières. Il contient les indicateurs du projet. Les principaux sont l'état écologique aval, le coût global, l'impact sur la nappe phréatique, les aspects socio-économiques (loisirs, emplois générés et impact sur les crues) ainsi que la production d'énergie.

4.3 Logiciel *PACEVs*

Dans le cadre de l'assainissement des rivières valaisannes lié à la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) ainsi que de celui de l'octroi des concessions pour les purges et vidanges des aménagements hydroélectriques, le canton du Valais a souhaité appliquer une méthode globale. La considération simultanée de trois objectifs pour l'assainissement (aspects sécuritaire, socio-économique et environnemental) place le choix des mesures prioritaires dans la catégorie des problèmes complexes. La méthode développée ci-dessus est donc adaptée à cette situation. L'acronyme *PACEVs* signifie " Potentiel d'Amélioration des Cours d'Eau Valaisans ".

Effectué comme une application au présent travail de recherche, le développement du logiciel *PACEVs* a rendu nécessaire quelques développements supplémentaires. Ces développements ainsi qu'une application concrète sont présentés ci-dessous. Les développements complets sont publiés dans un rapport technique (Heller, 2006).

4.3.1 Développements du logiciel *PACEVs*

Par rapport à la méthode initiale de Gomez and Probst (1995), le logiciel *PACEVs* reprend les développements effectués précédemment (c.f. paragraphe 4.2.2) et apporte deux développements spécifiques. Ce sont la distinction des effets (transformation de l'activité en impact) et l'introduction du rayon d'action (introduction d'une référence géographique). Afin de rendre le logiciel directement utilisable par les bureaux d'études chargés du choix et de la réalisation des mesures concrètes, les trois réseaux de fonctionnement supposés du système (sécurité, socio-économie et environnement) sont implémentés dans le logiciel. Ce dernier est donc applicable uniquement dans le contexte des petites rivières alpines. Une utilisation plus large nécessiterait une nouvelle définition des réseaux de fonctionnement.

4.3.1.1 Distinction des effets : notion d'impact

Pour qualifier plus précisément l'impact des solutions proposées, les résultats doivent distinguer l'activité positive de l'activité négative de chaque solution. La différence entre ces deux activités est appelée impact.

La méthode est complétée par les étapes suivantes :

- calcul d'influence de chaque branche du réseau de sorte à définir la matrice d'impact de chaque solution proposée sur chaque facteur du système
- agrégation normée de l'activité de chaque solution par sommation thématique
- agrégation normée de l'activité de chaque solution par sommation totale
- agrégation de l'activité de chaque solution par pondération des sommations thématiques.

Le calcul intégré de chaque branche du réseau tient compte du signe de la relation entre deux facteurs successifs. Ce signe est dépendant de la définition donnée à chaque facteur. L'exemple suivant illustre cette problématique.

Pour un volume de rétention donné, la relation entre la *surface* et le *volume* est positive. Ceci signifie qu'une augmentation de surface produit une augmentation de volume. La même relation peut être définie négativement si le facteur *volume* est changé en *réduction*

du volume. Ainsi une augmentation de surface produit une diminution de réduction de volume.

Puisque le signe des relations est une question de définition, il est donc nécessaire de définir un sens positif de sommation. Naturellement l'addition est perçue positivement tandis que la soustraction est perçue négativement. Ainsi, pour une solution proposée, avoir une valeur d'impact élevée signifie avoir un fort impact positif. A l'opposé, avoir une forte valeur négative signifie avoir un impact négatif. L'agrégation d'une série d'éléments positifs et négatifs par sommation nécessite de définir au préalable si un facteur est perçu positivement (une augmentation de son état est souhaitable) ou s'il est perçu négativement (une réduction de son état est souhaitable). Dans ce second cas, son influence reçue doit être inversée avant la sommation. L'exemple suivant illustre ce second aspect de la même problématique.

Soit, pour un problème donné, une solution proposée. Le calcul de cette solution montre un impact positif sur le facteur *finance* et un impact négatif sur le facteur *pollution*. La sommation directe de ces deux impacts pourrait conduire à une valeur nulle. Or le facteur *pollution* est défini négativement (une réduction de son état est recherchée). Son impact négatif est perçu positivement. Avant de le sommer, il faut donc changer son signe. De la sorte, la solution proposée a un impact global doublement positif.

Pour faciliter la comparaison de diverses solutions ou mesures à un problème étudié, les graphes thématiques d'influence sont normés. De manière similaire à l'activité d'un facteur, ils sont normés par rapport à la solution qui offre la plus forte activité.

4.3.1.2 Rayon d'action

Afin de tenir compte des effets liés à l'étendue géographique, chaque facteur du système indique s'il est, ou non, géographiquement situé. Les solutions proposées indiquent ensuite sur quelle étendue leurs effets se font sentir. Cette étendue est fixée par quatre seuils : 25 %, 50 %, 75 % ou 100 %. Elle représente sur le tronçon étudié la part influencée par la mesure. L'étendue est prise comme un coefficient réducteur dans le calcul de l'impact. De la sorte, la méthode permet de distinguer qualitativement les mesures qui ont un impact géographique limité d'avec celles qui ont un impact étendu.

4.3.2 Application à la Drance de Bagnes et résultats du logiciel *PACEVs*

A partir des trois réseaux fonctionnels, les mesures viennent se rajouter comme des facteurs additionnels. Les réseaux augmentés sont alors traités avec le logiciel. L'application présentée ci-après est fictive et n'a pas fait l'objet d'une étude approfondie. Elle est donnée à titre d'exemple.

4.3.2.1 Catalogues des mesures retenues

Les 27 mesures proposées dans le rapport sur l'assainissement de la Dranse de Bagnes (CEVAP, 2005) sont regroupées en 23 mesures distinctes. Ces mesures sont proposées avec les types et les rayons d'action au tableau 4.8.

La nécessité d'attribuer un type à chaque mesure est une aide pour maintenir une vue globale sur le problème et ne pas oublier de mesures. Le rayon d'action permet la hiérarchisation des mesures entre elles, notamment par ordre énumératif. Toutefois, une structure de

TAB. 4.8: Numéro, nom, type, rayon d'action et définition des mesures

N°	Nom	Type	Rayon	Définition
2100	Crue artificielle	Exploitation	100%	Crue annuelle artificielle de 4 heures avec 25 m ³ /s
2101	Crue morphogène	Exploitation	100%	Crue 3-5 ans morphogène de 72 heures avec 25 m ³ /s
2102	Curage	Exploitation	100%	Curage de la rivière de sorte à éliminer les dépôts fins
4100	Déboisement	Autres	25%	Déboisement de la rive droite sur 25% du tronçon
2103	Diversification régime	Exploitation	25%	Modification morphologique du lit sur 25% du tronçon
1100	Dotation	Dotation	25%	Ajout de 50 l/s à la dotation minimale sur 25% du tronçon
3100	Élargissement lit mineur	Construction	75%	Élargissement du lit mineur de 15% sur 75% du tronçon
3101	Élargissement rives	Construction	100%	Élargissement (25%) de l'emprise sur 100% du tronçon
6100	Élimination déchets/bois	Tiers	100%	Service de nettoyage sur la totalité du tronçon
3102	Techniques végétales	Construction	25%	Application de technique végétale sur 25% du tronçon
4101	Extraction matériaux	Autres	25%	Extraction périodique de matériaux sur 25% du tronçon
6101	Intégration tourisme/sport	Tiers	100%	Intégration de chemins pédestres et d'un parcours vita
5100	Purge bassin	Curage/Vidange	100%	Purge du bassin amont avec effet sur 100% du tronçon
4102	Reboisement	Autres	25%	Reboisement du cordon latéral sur 25% du tronçon
3103	Rehaussement ponts	Construction	25%	Rehaussement de ponts avec un effet sur 25% du tronçon
3104	Renaturation pieds berges	Construction	50%	Renaturation des peids de berge sur 50% du tronçon
3105	Renforcement rives	Construction	25%	Renforcement des rives sur 25% du tronçon
6102	Repeuplement piscicole	Tiers	100%	Plan de repeuplement piscicole sur 100% du tronçon
3106	Rivière by-pass	Construction	50%	Rivière by-pass pour passage piscicole sur 50% du tronçon
6103	STEP	Tiers	75%	Construction d'une STEP pour assainir 75% du tronçon
6104	Suivi environnemental	Tiers	100%	Suivi environnemental sur 100% du tronçon
4103	Suppression eaux usées	Autres	75%	Suppression d'eaux usées; influence sur 75% du tronçon
3107	Suppression seuil	Construction	50%	Suppression de seuils pour la faune sur 50% du tronçon
6105	Suppression rejet gravière	Tiers	25%	Suppression des rejets de gravière sur 25% du tronçon

numérotation peut être définie (par type, par bassin versant, ...). Pour faciliter le classement, les mesures peuvent d'abord être triées par ordre alphabétique.

4.3.2.2 Influences des mesures retenues

Les mesures très locales ne sont pas considérées. Elles sont trop spécifiques pour être incluses dans un tel réseau. Ces mesures nécessitent une étude particulière pour déterminer si les impacts négatifs qu'elles engendrent sont compensés par les effets positifs. Le suivi environnemental (mesure n° 6104) est également difficile à appréhender. Excepté son aspect financier (coût comme mesure d'entretien), il n'entre pas directement dans un des trois processus. Il est ainsi difficile d'en tenir compte dans les aspects écologiques.

4.3.2.3 Résultats agrégés des mesures (activité)

Avec un calcul secondaire, le classement des mesures par ordre d'importance est donné à la figure 4.9. La première mesure concerne la restauration d'une crue morphogène. Les deux autres mesures de même type (crue artificielle et curage) occupent les 4^{ème} et 7^{ème} rangs. Ces trois positions marquent l'importance du rétablissement d'un régime naturel de crue capable de rajeunir l'écosystème (destruction de la couche de pavage, inondations des zones inondables, restructuration des zones alluviales, ...). Ces mêmes mesures sont également soutenues par les aspects sécuritaires puisqu'elles maintiennent la capacité hydraulique de la rivière. Les secondes mesures par ordre d'importance sont les élargissements de la rivière, soit l'élargissement du profil hydraulique (2^{ème} mesure) et l'élargissement des rives (5^{ème} mesure).

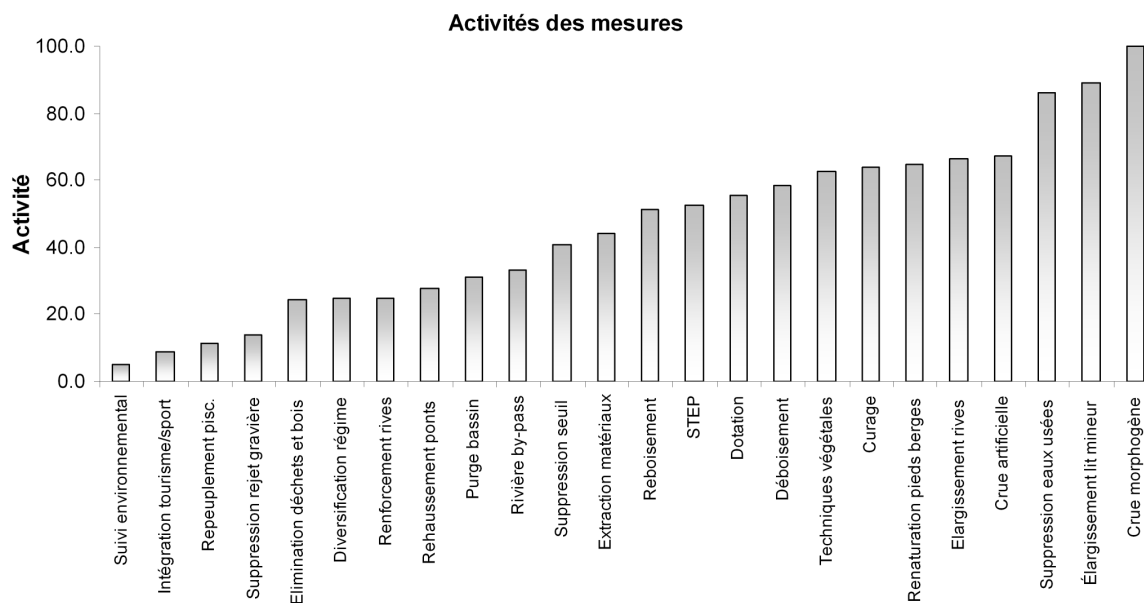


FIG. 4.9: Résultat secondaire agrégé des mesures par ordre croissant d'importance

Ces deux mesures soulignent l'importance de redonner de la place au réseau hydrographique. Ici encore, elles profitent tant pour les aspects écologiques que sécuritaires. La diversification du régime peut être vue comme une conséquence des élargissements. La sixième mesure est la renaturation des pieds de berges. La vie se développe à l'interface eau-air. Il est donc

normal de voir apparaître les pieds de berges comme une mesure importante. Cette mesure est soutenue par la nécessité pour la rivière d'avoir une eau de qualité suffisante (3^{ème} mesure, suppression des eaux usées). Les résultats montrent toutefois les huit premières mesures à un degré d'importance très proche. Il est donc difficile avec ce type de calcul de mieux les distinguer.

Le calcul d'activité tertiaire des mesures abouti à un résultat similaire. Il intervient les deux premières mesures mais leur laisse, comme au calcul précédent, une marge d'environ 20 %. Ces résultats montrent, pour les huit premières mesures, le même degré d'importance. Le classement change toutefois quelque peu à cause des résultats relativement serrés. On aboutit ainsi aux mêmes conclusions qu'au calcul précédent.

4.3.2.4 Résultats désagrégés des mesures (impact)

Les lâchers d'eau ponctuels (curage, crue morphogène et crue artificielle dans une moindre mesure), l'augmentation de l'emprise globale de la rivière (élargissement du lit mineur et des rives) ainsi que la restauration de la qualité de l'eau (suppression des eaux usées et STEP) sont donnés comme mesure prioritaire. Ce résultat, présenté à la figure 4.10, souligne l'importance de ces mesures pour les aspects sécuritaire et écologique. La renaturation des pieds de berges est une mesure essentiellement écologique qui tire profit des élargissements. La STEP présente un impact bénéfique tant pour les aspects écologiques (qualité de l'eau) que pour les aspects socio-économiques (qualité de la rivière comme élément touristique). La dotation est une mesure apparemment de seconde importance. Cette relative faiblesse lui vient de son rayon d'action fixé à 25 % du tronçon étudié. Le calcul d'impact souligne d'abord les mesures qui ont un effet sur l'ensemble du tronçon. La purge du bassin amont apparaît très négative. Elle est modélisée seulement comme une conséquence sur la rivière. La retenue pour laquelle elle est nécessaire reste en dehors de l'espace de modélisation. La différence entre la rivière de contournement et la suppression de seuil n'est pas très importante. Les deux mesures permettent de restaurer la continuité longitudinale de la rivière. L'écologie donne une légère préférence à la suppression du seuil mais les aspects touristiques préfèrent la diversité offerte par une rivière de contournement. La suppression du seuil est préférée principalement pour des raisons de coûts. En conséquence, si l'exploitation d'un tel seuil peut supporter le coût de la rivière de contournement, alors la différence entre ces mesures peut s'annuler. Le suivi environnemental est également négatif. Ce résultat vient de sa modélisation financière uniquement (mesure non directement opérationnelle sur le processus écologique).

4.3.2.5 Résumé des résultats obtenus

A ce niveau de détail et pour l'ensemble de la rivière, deux groupes de mesures apparaissent prioritaires. Il s'agit tout d'abord de la restauration d'un régime de crue plus proche d'un régime naturel. Ce régime peut être restauré par des lâchers d'eau d'intensités et de durées différentes. Ces lâchers peuvent également être faits judicieusement de manière à minimiser les impacts négatifs pour la production d'énergie.

Le second groupe de mesures concerne la place donnée au réseau hydrographique. La restitution à la rivière d'une certaine largeur pour son profil hydraulique ainsi que pour son corridor terrestre permet de diversifier efficacement son régime hydraulique, d'enrichir son écotone et de développer une vie aquatique plus importante. L'emploi de techniques

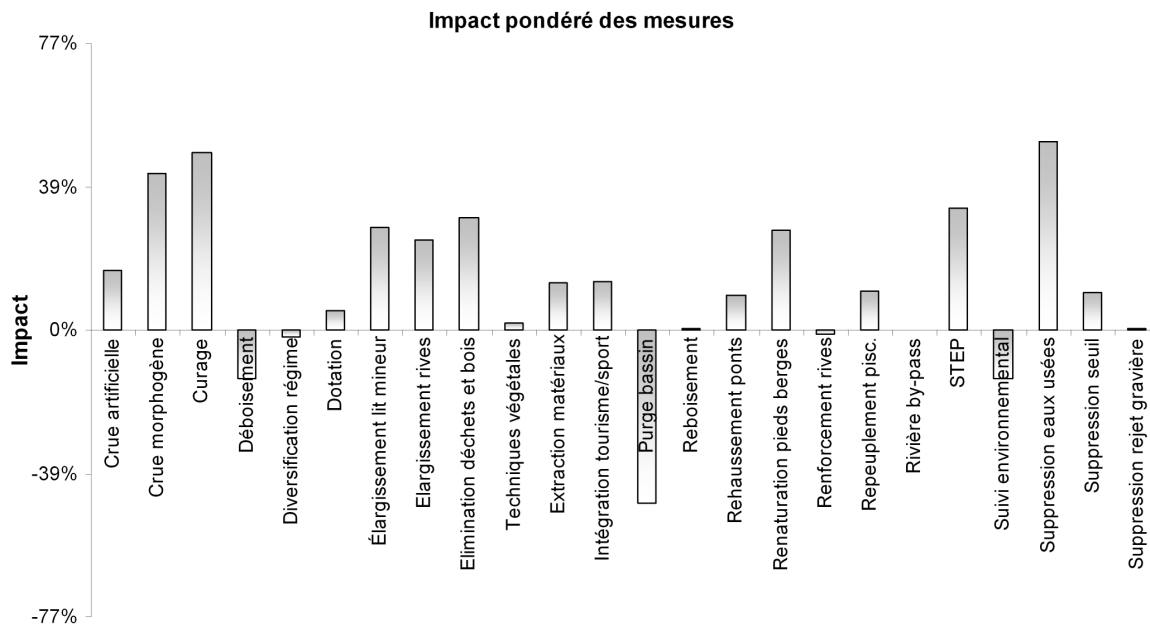


FIG. 4.10: Résultat désagrégé pondéré des mesures

végétales, la renaturation des pieds de berge ainsi que le renforcement des rives doivent être considérés conjointement à ce groupe.

Ces deux groupes de mesures ont un impact fortement positif pour la sécurité vis-à-vis des crues.

L'intégration touristique et sportive est une mesure additionnelle de dimension uniquement socio-économique. Elle permet de tirer profit de l'ensemble des mesures écologiques pour les exposer aux amateurs de nature revitalisée.

Le débit de dotation n'est pas une mesure globale ou semi-globale selon la configuration du réseau hydrographique (rayon d'action de la dotation posé à 25 % du tronçon étudié dans cet exemple). En conséquence il a un effet écologique et social limité (aspect positif de cette mesure). Indépendamment de son rayon d'action, le débit de dotation présente un fort impact négatif pour les aspects économiques. Il semble a priori difficile d'imposer une telle mesure sans autre justification. Il apparaît ainsi plus raisonnable de favoriser des mesures ou groupe de mesures qui visent une amélioration au sens des six modules de l'analyse écomorphologique du cours d'eau tout en minimisant les pertes de production hydroélectrique des sociétés concernées.

4.4 Conclusions

Comme illustré par la modélisation qualitative d'un aménagement à buts multiples ou par l'application du logiciel *PACEVs*, le traitement des systèmes complexes nécessite une approche particulière. La forte interconnexion des éléments qui constituent ces systèmes et leurs aspects hautement dynamiques rendent l'approche globale nécessaire. Ainsi, un outil d'aide à la conception de ces ouvrages nécessite une méthode d'évaluation globale.

Dans un premier temps, la mise à jour des acteurs du système est nécessaire pour comprendre leurs motivations et trouver les facteurs déterminants. L'établissement des relations entre

ces derniers permet de construire le fonctionnement complexe de l'aménagement. L'évaluation du réseau obtenu souligne les aspects importants des mécanismes induits. Cette modélisation permet de détecter les aspects les plus sensibles d'un aménagement hydraulique à buts multiples, notamment de souligner les variables de décision et les indicateurs importants.

Cette étude distingue les variables de projet des variables de gestion (c.f. paragraphe 4.2.5.3). Elle relève comme variables de projet l'ensemble des aspects constructifs (hauteur du barrage, surface de la retenue, contre-canaux, aménagement de loisirs, débit équipé). Comme unique variable de gestion, elle relève le débit aval sortant de l'aménagement.

Il convient encore de relever que la conception de l'aménagement est implicitement contenue dans la typologie des réseaux du système étudié. C'est pourquoi les variables de projet ne distinguent que les variables de taille de l'aménagement. Les variables de conception qui donnent la forme de l'objet étudié sont contenues dans la manière de relier les éléments entre eux.

Les résultats de l'étude de sensibilité (c.f. paragraphe 4.2.4) et ceux de la Drance de Bagnes (c.f. paragraphes 4.3.2.3 et 4.3.2.4) soulignent, d'une part, la stabilité de la méthode proposée et, d'autre part, illustre cette même méthode par des classements similaires. Toutefois, il faut remarquer que cette méthode ne fait que rendre explicite des résultats implicitement contenus dans les réseaux d'influence. A l'instar de tous les modèles, les résultats ne peuvent pas montrer ce qui n'a pas été fourni comme donnée au système. Ainsi, la plus grande attention est requise lors de l'élaboration des réseaux.

A côté de sa capacité à modéliser des problèmes très larges, cette approche a également montré ses limites. Si les aspects qualitatifs peuvent être comparés sur une même échelle arbitraire malgré des éléments d'unités différentes, il est cependant difficile de distinguer réellement le poids des éléments entre eux et encore davantage celui de leurs variations relatives. Cette première modélisation a ainsi montré le besoin d'un modèle quantitatif.

L'absence de relations rigoureuses ou quantifiables entre les différents facteurs n'est toutefois pas suffisante pour rejeter les enseignements d'un tel modèle. Cet état lui permet au contraire de considérer des relations difficilement modélisables mathématiquement. Il faut moins le voir en opposition à un modèle quantitatif et plutôt comme une extension (Atkinson, 2004).

Enfin, l'approche de modélisation physique du phénomène étudié permet de se distancer de la logique de décision. L'approche choisie génère de nombreux facteurs d'importance secondaire et nécessite ainsi de nouveaux modèles de calcul. Elle permet cependant de comprendre le fonctionnement réel du système indépendamment des variables de décision. Or, si le système décisionnel est fortement complexe (forte boucle de rétro-action entre les variables de décision), le système physique, soumis à la dimension temporelle, est totalement linéaire dans son fonctionnement.

A condition de distinguer ces deux systèmes (mode de décision et mode de fonctionnement), la complexité du système global disparaît. Dans le système formé par l'aménagement hydroélectrique fluvial à buts multiples, l'hydrogramme aval est la variable d'entrée du système logique et la variable de sortie du système physique. Cette variable constitue le pivot entre les deux systèmes et est à la base de la modélisation quantitative présentée au chapitre 5^{ème}.

5 Analyse quantitative : modèles de simulation

All models are wrong but some are useful

(Box and Draper, 1987)

5.1 Introduction

Dans l'étude d'un aménagement hydroélectrique à buts multiples, les premières étapes cherchent à définir le système, à comprendre son fonctionnement ainsi qu'à mettre en évidence ses facteurs-clés. Ces études, effectuées par un modèle qualitatif, font l'objet du chapitre 4^{ème}. L'étape suivante, dans l'approche méthodologique, consiste à apporter des réponses quantifiées aux différents buts de l'aménagement. Quels coûts pour quelles productions d'énergie, quel volume de rétention nécessaire pour laminer le marnage, quels battements dans le réservoir compte tenu de sa taille, quel volume de rétention supplémentaire pour écrêter la pointe des crues et de quelles crues, sont autant de questions qui nécessitent une méthode quantitative.

Inscrite dans la suite logique du chapitre 4^{ème} qui s'appuie sur une approche de modélisation qualitative, la méthode quantitative, à cause de la dimension physique du problème abordé, est également basée sur des outils de modélisation. La dimension temporelle considérée ici justifie le terme de modèle de simulation. Le but est de reproduire le fonctionnement des principaux aspects de l'aménagement. Inspiré des conclusions du chapitre 4^{ème}, les modèles de simulation développés ci-dessous sont reliés, directement ou indirectement, à l'hydrogramme de la rivière aval de l'aménagement.

Afin d'appliquer les modèles au cas d'étude choisi, les simulations sont directement effectuées sur des données liées au Rhône valaisan. Le choix de l'année de référence ainsi que le lieu de la station de mesure des débits constituent la première étape de ce chapitre. L'organisation des modèles de simulation est illustré à la figure 5.1 et décrit ci-dessous.

Comme le but principal de l'aménagement est de réduire les effets négatifs du marnage, les modèles de gestion ordinaire arrivent en seconde position. Bien que sans interaction directe, mais par similitude, les modèles de gestion des crues sont placés juste après. Basés sur ces résultats, les autres modèles de simulation sont développés en cascade. A cause de l'aspect hydraulique comme moteur de base de l'aménagement, le modèle hydraulique vient en troisième position. Les simulations thermiques et énergétiques découlent de ces résultats. Les modèles d'attractivité sociale et écologique sont basés sur les modèles hydraulique et thermique. Ils arrivent ainsi en cinquième position. Enfin, le modèle financier calcule les coûts d'investissement ainsi que l'ensemble des revenus liés à l'aménagement à buts multiples. La figure 5.1 ne représente pas les variables de taille et de conception pour ne pas être surchargée. Ces dernières influencent cependant l'ensemble des outils de gestion et de simulation.

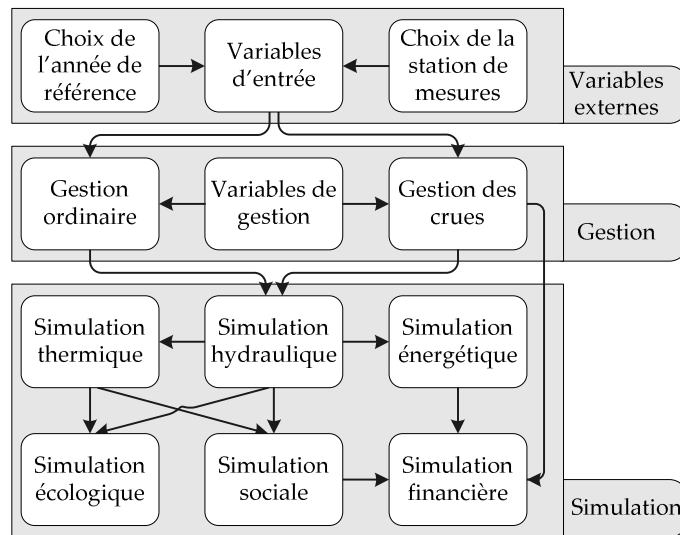


FIG. 5.1: Hiérarchie des différents modèles de simulation développés pour l'analyse qualitative

5.2 Choix de l'année de référence pour la simulation : 1993

Le fonctionnement de l'ensemble des modèles de simulation nécessite des ressources informatiques importantes. Effectué avec un pas de temps horaire, indispensable pour cerner les effets du marnage, la simulation d'une période dépassant une année civile devient trop longue. Par ailleurs, et pour les mêmes raisons, il est nécessaire de travailler avec un hydrogramme réel et non pas avec une courbe des débits classés. Il convient dès lors de choisir une année de référence pour approcher au mieux une année moyenne dans les domaines étudiés. Les cinq critères retenus sont : le volume annuel écoulé, la courbe des débits classés, la courbe des niveaux classés, les températures annuelles moyennes de l'eau et de l'air.

La période étudiée considère les 14 années comprises entre 1990 et 2003. Les débits de la Porte du Scex à l'exutoire du bassin versant du Rhône supérieur et les températures de la station de jaugeage de Sion sont utilisés dans cette analyse.

5.2.1 Analyse du volume annuel écoulé

La moyenne des 14 années considérées donne un volume annuel moyen de $4'457 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Les différences sur les quatorze années par rapport à la moyenne s'étendent entre -25% et +18%. Le tableau 5.1 donne les volumes annuels pour les 7 années les plus proches de la valeur moyenne. L'année 1993 (rang 2) présente un écart positif de 3%.

TAB. 5.1: Classement selon les volumes annuels écoulés à Branson (10^6m^3)

Rang	1	2	3	4	5	6	7	Moy.
Année	00	93	91	97	01	92	03	
Volume	4'487	4'595	4'289	4'285	4'661	4'236	4'685	4'457
Diff. à moy.	30	138	-168	-172	204	-221	228	0
Diff. à moy.	0.66%	3.10%	-3.77%	-3.86%	4.58%	-4.97%	5.12%	0%

5.2.2 Analyse horaire de la courbe des débits classés

Le calcul des 14 courbes des débits classés permet de définir la courbe moyenne des débits classés. La différence entre cette courbe moyenne et la courbe annuelle donne une indication sur le régime hydraulique. La moyenne des différences, pour les 7 années les plus proches de la courbe moyenne, est présentée au tableau 5.2. Ce tableau indique la différence annuelle moyenne ainsi que la différence moyenne calculée après la 500^{ème} heure classée. La classement est effectué sur la différence moyenne annuelle.

TAB. 5.2: Classement selon la courbe des débits classés à Branson (m³/s)

Rang	1	2	3	4	5	6	7
Année	00	93	91	97	01	92	03
Différence annuelle	1.0	4.4	-5.3	-5.5	6.4	-6.9	7.2
Différence dès la 500 ^{ème} heure	0.2	4.1	-5.5	-3.2	6.4	-6.4	6.1

5.2.3 Analyse horaire de la courbe des niveaux classés

Habituellement, le marnage est présenté comme une variation de débit. Toutefois, les stations de mesures enregistrent des variations de niveau. De plus, les écosystèmes sont directement sensibles aux variations de niveau. Il est donc logique de présenter le marnage comme une variation du niveau du plan d'eau de la rivière. Les 14 courbes annuelles des niveaux classés permettent de calculer la courbe moyenne des niveaux classés. Une analyse similaire au paragraphe 5.2.2 permet de classer les années les plus proches de la moyenne. Ce classement est présenté au tableau 5.3.

TAB. 5.3: Classement selon la courbe des niveaux classés à Branson (mm)

Rang	1	2	3	4	5	6	7
Année	90	93	97	01	98	94	91
Différence annuelle	-0.11	-0.86	0.98	1.49	1.71	-2.64	-2.95
Différence dès la 500 ^{ème} heure	0.35	-0.77	1.73	1.26	0.60	-1.72	-2.38

5.2.4 Analyse de la température hydrique

La moyenne des 14 années considérées donne une température hydrique de 6.97°C. Les différences varient entre +5% et -6%. Le tableau 5.4 donne les températures hydriques pour les 8 années les plus proches de la valeur moyenne. L'année 1993, en seconde position, présente un écart positif de 0.2%.

TAB. 5.4: Classement selon la température annuelle moyenne hydrique à Sion (°C)

Rang	1	2	3	4	5	6	7	Moy.
Année	03	93	00	97	94	96	98	
Température	6.98	6.99	7.00	6.94	7.01	7.07	6.87	6.97
Diff. à moy.	0.012	0.017	0.033	-0.033	0.037	0.095	-0.098	0
Diff. à moy.	0.17%	0.24%	0.47%	-0.48%	0.52%	1.36%	-1.40%	0%

5.2.5 Analyse de la température de l'air

La moyenne des 14 années considérées donne une température aérienne de 10.46 °C. Les différences varient entre +8% et -6%. Le tableau 5.5 donne les températures aériennes pour les 8 années les plus proches de la valeur moyenne. L'année 1993, en seconde position, présente un écart négatif de 1.5%.

TAB. 5.5: Classement selon la température annuelle moyenne aérienne à Sion (°C)

Rang	1	2	3	4	5	6	7	Moy.
Année	01	93	92	97	98	95	90	
Température	10.39	10.31	10.27	10.66	10.26	10.24	10.22	10.46
Diff. à moy.	-0.07	-0.15	-0.19	0.20	-0.20	-0.23	-0.24	0
Diff. à moy.	-0.70 %	-1.48 %	-1.85 %	1.90 %	-1.92 %	-2.19 %	-2.29 %	0 %

5.2.6 Choix de l'année de référence

Pour l'ensemble des critères retenus, l'année 1993 se classe toujours en seconde position. La première position est occupée par différentes années qui peuvent être classées, pour un autre critère, à un mauvais rang. L'année 1993 représente le mieux une année hydraulique et thermique moyenne. Elle peut être résumée comme une année avec légèrement plus d'eau, légèrement moins de marnage, une eau un peu plus chaude et de l'air un peu plus froid qu'en moyenne. Le tableau 5.6 résume la position des différentes années selon les critères de choix.

TAB. 5.6: Classement des années

Critère / Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Volume annuel	00	93	91	97	01	92	03	02	90	98	95	99	94	96
Débit classé	00	93	91	97	01	92	03	02	90	98	95	99	94	96
Marnage classé	90	93	97	01	98	94	91	95	96	92	02	00	03	99
Température eau	03	93	00	97	94	96	98	91	95	92	01	90	02	99
Température air	01	93	92	97	98	95	90	99	00	02	96	91	94	03

5.3 Choix du lieu de la station de jaugeage : Branson

La position optimale d'un aménagement à buts multiples doit tenir compte de l'ensemble des buts qu'il propose. Ainsi, l'effet sur le marnage est conditionné par la position des rejets et la longueur du tronçon aval protégé par l'aménagement. La production d'énergie est indépendante de la position géographique. Toutefois, il y a lieu de privilégier un site qui offre une pente naturelle du cours d'eau suffisante pour minimiser la courbe de remous amont. La protection contre les crues demande, dans l'idéal, un site qui est situé juste à l'amont d'une zone à protéger, comme par exemple une ville, un village ou des installations industrielles. Enfin, l'attractivité liée au développement de loisirs offre un potentiel d'autant plus grand que l'aménagement est positionné à proximité d'une zone habitée.

Pour toutes ces raisons, la plaine valaisanne comprise entre Sion et Martigny (à côté de Branson) constitue *a priori* une zone idéale. La station de jaugeage de Branson en est l'exutoire. Cette station est donc utilisée comme référence pour la mesure des débits. La seule station de mesure des températures (aérienne et hydrique) à proximité de cette zone est située à Sion. Elle est donc utilisée comme référence pour les mesures thermiques. La figure 5.2, reprise du chapitre 1^{er}, illustre l'emplacement de la station de Branson par rapport au rejets des centrales hydroélectriques.

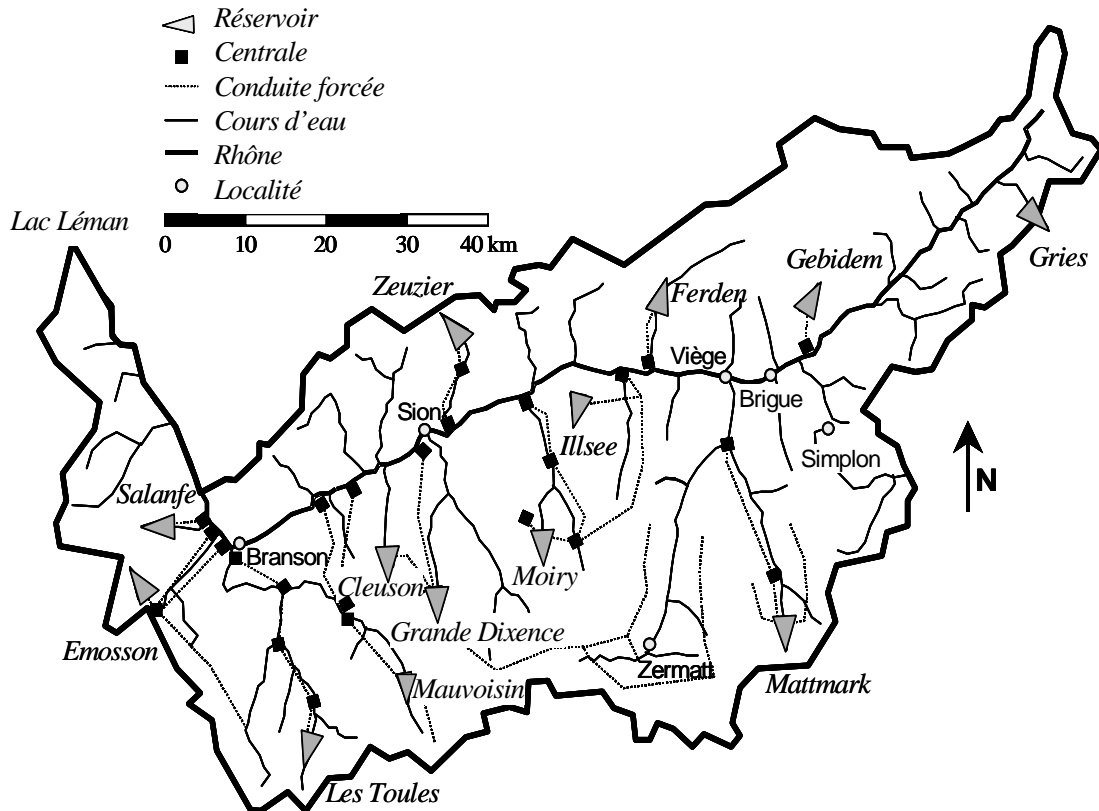


FIG. 5.2: Carte du bassin versant du Rhône supérieur avec ses ouvrages d'accumulation, ses rejets dans le Rhône et la station de mesure de Branson (Jordan, 2007)

5.4 Modèles de gestion : Optimisation de la gestion ordinaire

5.4.1 Objectifs de la gestion ordinaire

La gestion ordinaire de l'aménagement à buts multiples, indépendamment de sa configuration et de sa taille, cherche à atteindre les objectifs retenus (c.f. paragraphes 4.2.5.2 et 4.2.5.3). Elle propose ainsi de réduire le marnage à l'aval, de minimiser les battements dans la retenue et de maximiser la production d'énergie. Les aspects liés à l'utilisation sociale de l'aménagement sont implicitement contenus dans les battements du niveau de la retenue. Les aspects liés aux crues sont dissociés de la gestion ordinaire et font l'objet du paragraphe 5.5. La gestion ordinaire est définie comme la gestion hydraulique de l'aménagement en situation normale à l'unique exception des situations de crues.

La seule variable de gestion est le débit sortant de l'aménagement qui constitue, par la même occasion, le débit de la rivière aval. Cet hydrogramme est la somme du débit turbiné pour la production d'énergie, du débit écoulé par la rivière de contournement et, dans certains cas, du débit directement écoulé au niveau des vannes de l'aménagement. La gestion est calculée à un pas de temps horaire.

5.4.2 Modèles développés de gestion

Les modèles de gestion développés dans le cadre de cette recherche sont répartis dans deux paragraphes : les modèles heuristiques et les modèles optimisés (Heller, Schleiss and Bollaert, 2005). Les premiers sont basés sur des règles et dépendent de l'historique des débits. Ce mode de gestion répond à l'équation 5.1 :

$$Q_{av}(t) = f(Q_{av}(t-1), Q_{av}(t-2), Q_{av}(t-3), \dots, Q_{av}(1), Q_{am}(t)) \quad (5.1)$$

où Q_{av} est le débit dans la rivière à l'aval de l'aménagement et Q_{am} est le débit dans la rivière à l'amont de l'aménagement. Cette gestion est appelée *autorégressive* car elle est principalement fondée sur des débits antérieurs (débits aval ou amont).

Les seconds modèles de gestion cherchent à anticiper les débits futurs pour optimiser la gestion du réservoir. Ils sont appelés *prévisionnistes* et répondent à l'équation 5.2. Ils sont principalement basés sur les débits futurs (débits amont essentiellement) jusqu'à la $k^{\text{ème}}$ période.

$$Q_{av}(t) = f(Q_{av}(t-1), Q_{am}(t), Q_{am}(t+1), Q_{am}(t+2), \dots, Q_{am}(t+k)) \quad (5.2)$$

5.4.2.1 Modèles de gestion heuristique

L'objectif qui lie simultanément la réduction du marnage aval et la minimisation des battements du réservoir est physiquement antagoniste. De manière extrême, les variations de débit peuvent soit transiter totalement dans la rivière, soit être totalement absorbées par la retenue. Ces deux types de gestion fixent les bornes du domaine des gestions possibles. Entre ces deux bornes, il existe une multitude de gestions mixtes possibles.

La gestion qui laisse la totalité du marnage dans la rivière est caractérisée par l'équation 5.3 où le débit aval est égal au débit amont. Ce mode de gestion correspond à la gestion usuelle

des aménagements hydroélectriques au fil de l'eau. Pour autant que le niveau d'eau amont soit maintenu au maximum possible, il correspond également à la gestion qui maximise la production d'énergie. Cette production maximale d'énergie sert de référence par rapport aux autres modes de gestion proposés. Elle est définie comme le 100 % d'énergie potentiellement produite pour un aménagement donné. Cette gestion ne nécessite aucun volume de rétention. Elle est représentée à la figure 5.3 pour une semaine hivernale type. Le débit aval est superposé au débit amont.

$$Q_{av}(t) = Q_{am}(t), \forall t \quad (5.3)$$

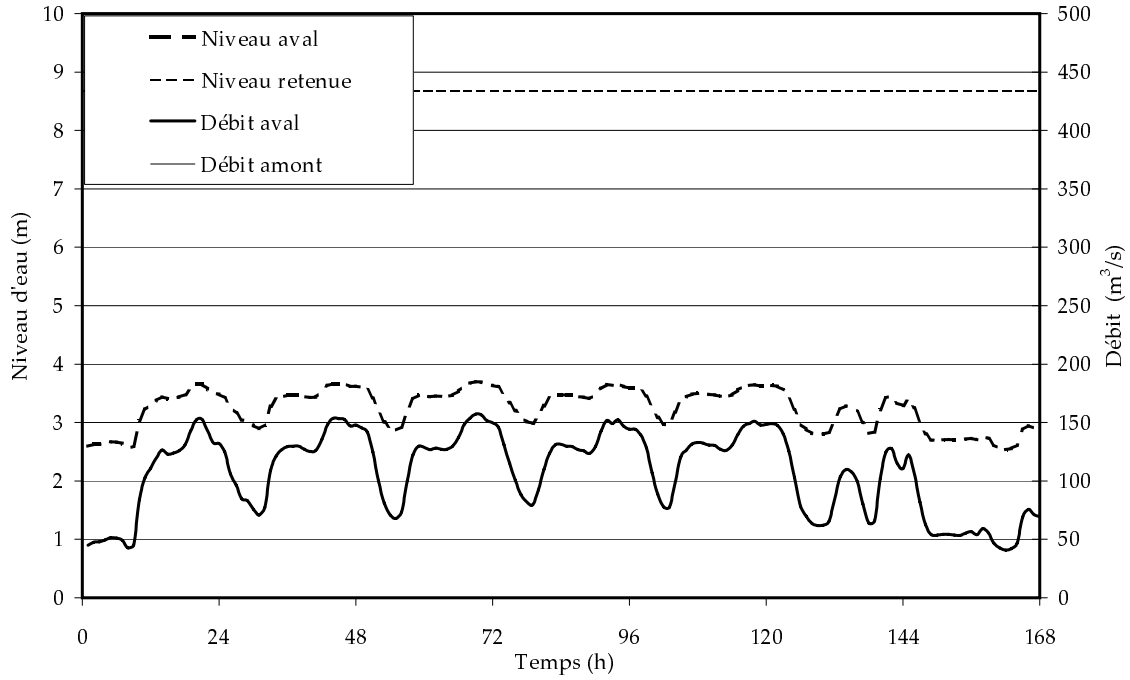


FIG. 5.3: Gestion heuristique d'une semaine hivernale type à Branson avec le niveau du réservoir constant

A l'autre extrémité des gestions possibles, la concentration de la totalité du marnage dans le réservoir répond à l'équation 5.4. Ce mode de gestion nécessite un volume maximal de rétention et produit un débit aval moyen constant. Ce mode de gestion est représenté à la figure 5.4 pour une semaine hivernale type avec, notamment, un dépassement du volume maximal disponible.

$$Q_{av}(t) = \frac{\sum_{i=1}^k Q_{am}(i)}{k}, \forall t \in [1..k] \quad (5.4)$$

où k représente l'horizon de planification pour le calcul du débit moyen. Si ce dernier mode de gestion supprime toutes les variations de débit liées au marnage, il supprime également les variations naturelles. Ce problème peut être facilement résolu si le débit moyen est calculé par une moyenne mobile sur les dernières heures. Ce mode répond à la même équation que le précédent (équation 5.4) avec une variation sur la valeur de k . Cette gestion est aisée à mettre en oeuvre. Elle permet d'adoucir les variations de débits sans en changer réellement

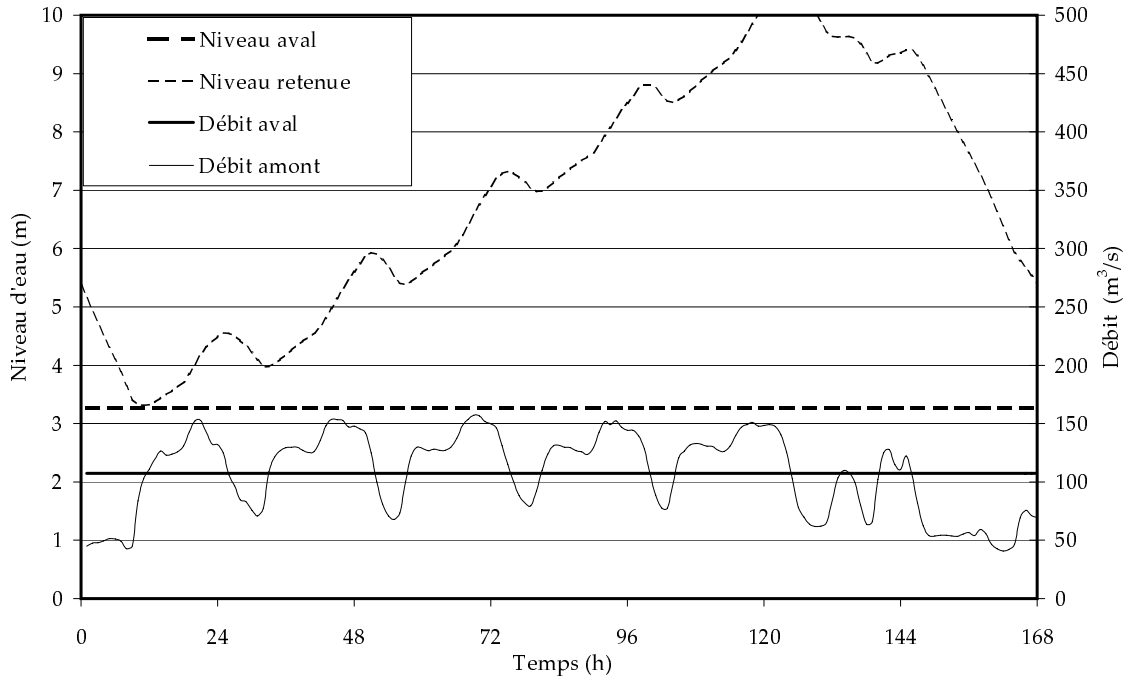


FIG. 5.4: Gestion heuristique d'une semaine hivernale type à Branson avec un débit aval constant

l'amplitude si la durée d'intégration est inférieure au cycle de l'hydrogramme. Les points de débit se retrouvent décalés dans le temps. Cette gestion ne nécessite qu'un volume de rétention limité. L'unique variable de ce mode de gestion est la durée d'intégration, soit la période sur laquelle la moyenne mobile est calculée (k). Ce mode de gestion est représenté à la figure 5.5 pour une semaine hivernale type avec une moyenne mobile calculée sur 5 heures.

L'avantage lié à la simplicité du calcul de la moyenne mobile ne permet pas de contrôler réellement le débit aval. Il réduit seulement la dérivée instantanée de l'hydrogramme (variations du débit). Ce taux de réduction est lié à l'hydrogramme lui-même. Une alternative mathématique à la moyenne mobile consiste à imposer une limite absolue maximale à la valeur possible de la dérivée. Ce mode est appelé "mode du gradient". Il est exprimé par l'équation 5.5 où la fonction f symbolise la courbe de tarage de la rivière aval. Cette gestion permet de borner la vitesse de variation du niveau, entre deux heures successives, à une limite égale ou inférieure à Δh . Ce mode est le fruit d'une réflexion écologique. Si la vitesse de variation du niveau d'eau est supérieure à la migration des animaux aquatiques (invertébrés essentiellement) qui vivent à l'écotone de la rivière (frontière terrestre-aquatique), alors ces derniers disparaissent. Par ailleurs, un abaissement trop rapide du niveau piège également les poissons dans les ourlets de la rive. Si ces ourlets se vident par infiltration ou si l'eau contenue se réchauffe trop, les animaux aquatiques ne peuvent pas survivre. L'unique variable de ce modèle est donc la valeur maximale de croissance ou de décroissance horaire du niveau d'eau. Des valeurs raisonnables de Δh se situent entre 8 et 12 cm/h (Halleraker et al., 2003). Ce mode de gestion très simple dans son application ne nécessite qu'un volume de rétention limité.

$$Q_{av}(t) = f(h_{av}(t-1) \pm \Delta h), \forall t \quad (5.5)$$

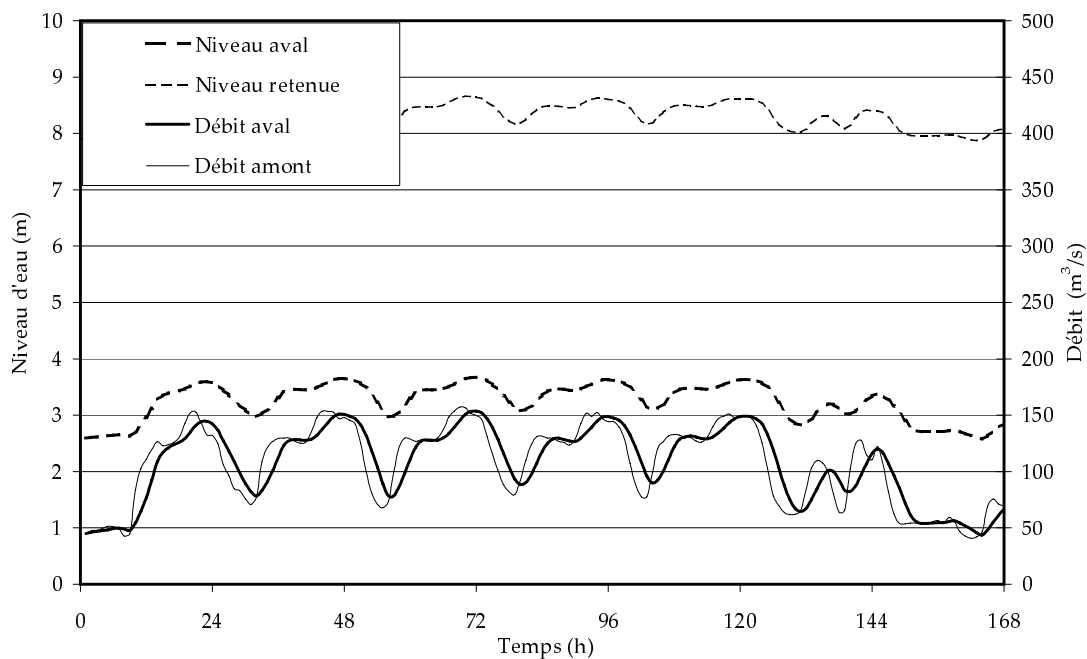


FIG. 5.5: Gestion heuristique d'une semaine hivernale type à Branson avec une moyenne mobile calculée sur 5 heures

où Δh représente le gradient maximal de variation de niveau de la rivière aval entre deux heures successives. Ce mode de gestion est représenté à la figure 5.6 pour une semaine hivernale type avec un gradient d'une valeur de 8 cm/h.

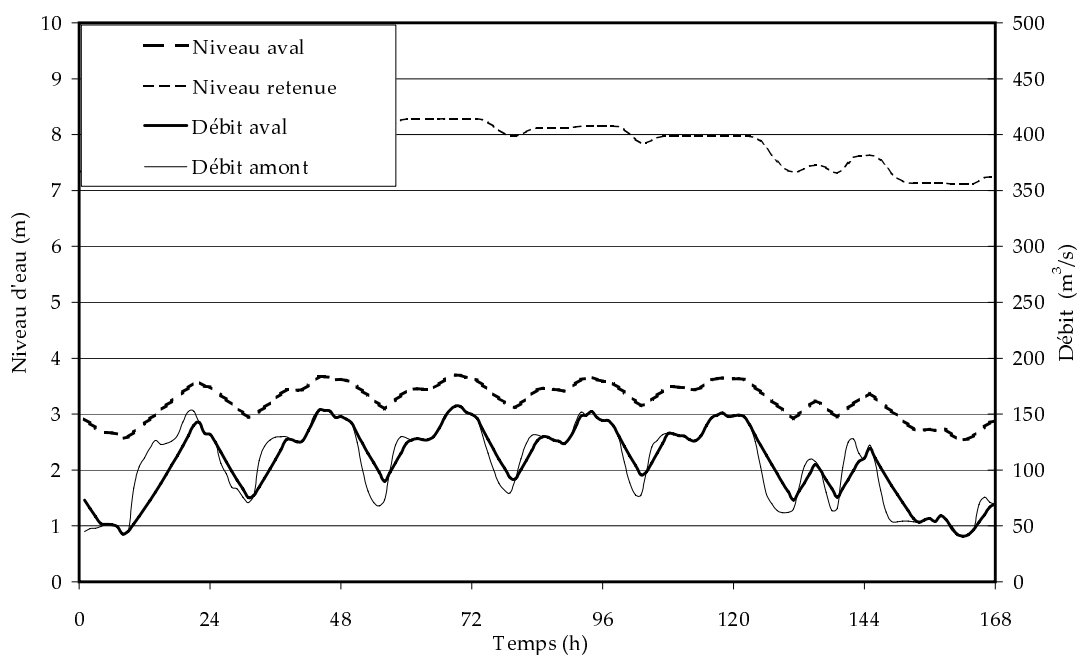


FIG. 5.6: Gestion heuristique d'une semaine hivernale type à Branson avec un gradient d'une valeur de 8 cm/h

La simplicité des deux modèles précédents ne permet pas encore de restreindre la variation totale du niveau de la rivière aval. Le mode de gestion intitulé " mode d'amplitude ", borne

le niveau entre deux valeurs établies. La plage entre ces deux limites constitue l'amplitude maximale possible à l'intérieur de laquelle le niveau varie librement. Cette gestion est représentée par l'équation 5.6. Elle permet de supprimer aisément les pointes et les creux de l'hydrogramme amont. Elle ne peut cependant pas rendre les variations naturelles de débit de la rivière. Ce modèle possède deux variables qui sont h_{min} et h_{max} . Une valeur raisonnable pour l'amplitude hebdomadaire peut être fixée à 30 cm (Pellaud, 2007).

$$Q_{av}(t) = f([h_{min}, h_{max}]), \forall t \quad (5.6)$$

où h_{min} et h_{max} représentent les bornes inférieure et supérieure entre lesquelles le niveau d'eau de la rivière aval est contenu. Il est possible de permettre des variations naturelles dans la rivière en définissant le même modèle par une hauteur moyenne et une demi amplitude. A condition de calculer la hauteur moyenne avec une moyenne mobile ou par une prévision du débit moyen, ce modèle est réduit à une seule variable, l'amplitude Am et s'exprime par l'équation 5.7. Le volume de rétention est minimisé si la hauteur moyenne est calculée en fonction des débits futurs.

$$Q_{av}(t) = f([h_{moy} - Am/2, h_{moy} + Am/2]), \forall t \quad (5.7)$$

où h_{moy} représente le niveau d'eau moyen de la rivière aval pour la période considérée et Am l'amplitude de variation admissible du niveau d'eau de la rivière aval. Ce mode de gestion est représenté à la figure 5.7 pour une semaine hivernale type avec une amplitude hebdomadaire de 40 cm.

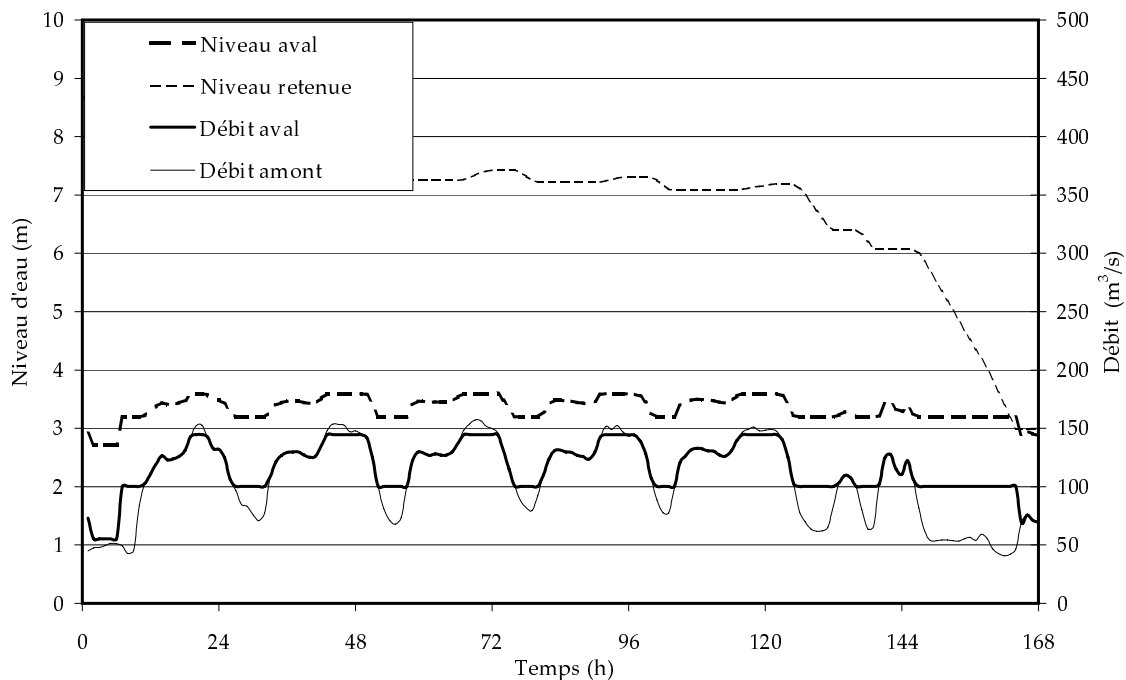


FIG. 5.7: Gestion heuristique d'une semaine hivernale type à Branson avec une amplitude hebdomadaire de 40 cm

Le dernier modèle consiste à lier le second modèle d'amplitude (équation 5.7) et le modèle du gradient (équation 5.5). Il prend le nom de "mode combiné". De la sorte, le débit aval est limité tant dans son amplitude (limitation du niveau minimal et maximal) que dans sa

vitesse de variation (limitation, en valeur absolue, de la dérivée). Ce modèle est donné à l'équation 5.8. Ce modèle possède deux variables, la valeur maximale de variation horaire du niveau d'eau et l'amplitude maximale de la rivière. A cause de la particularité du cycle hebdomadaire du Rhône valaisan, ce modèle peut posséder deux hauteurs moyennes du niveau aval, l'une pour les cinq jours ouvrables et l'autre pour le week-end. Ce mode de gestion avec une amplitude hebdomadaire unique de 30 cm et un gradient de 8 cm/h est représenté à la figure 5.8.

$$Q_{av}(t) = f(h_{av}(t-1) \pm \Delta h) \text{ et } h_{av}(t) \in [h_{moy} - A/2, h_{moy} + A/2], \forall t \quad (5.8)$$

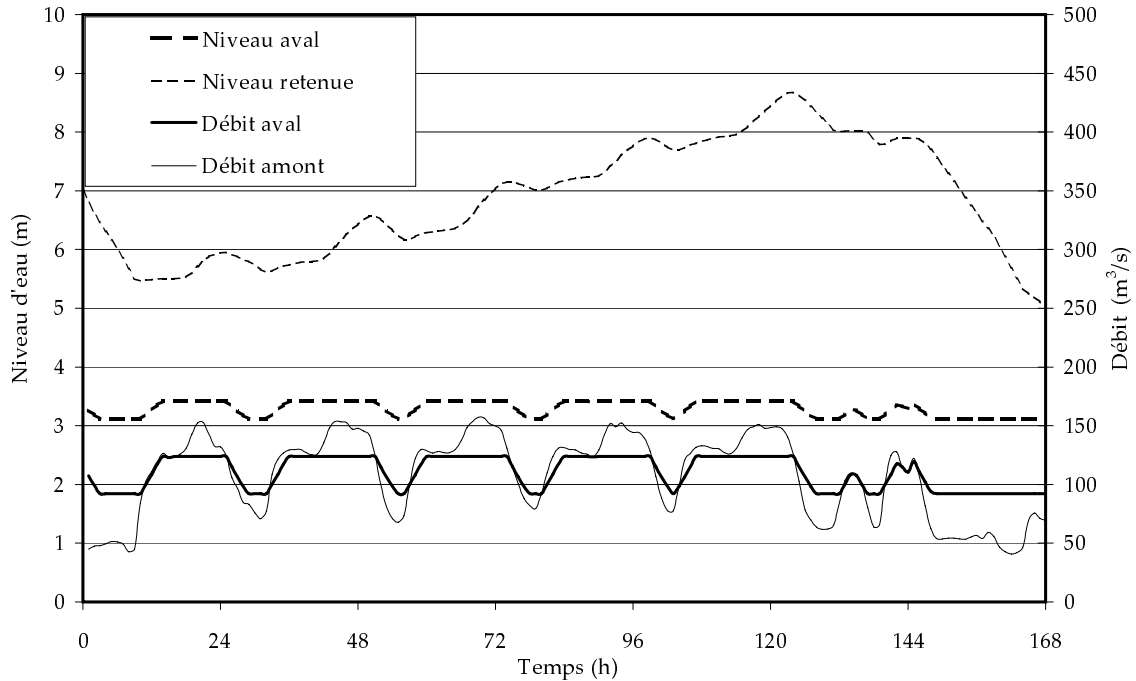


FIG. 5.8: Gestion du réservoir avec le modèle heuristique combiné pour une semaine hivernale type à Branson

5.4.2.2 Comparaison des modèles de gestion heuristique

La figure 5.9 illustre la semaine hivernale type du Rhône valaisan (année 2003, 2^{ème} semaine de février, débits mesurés à Branson) utilisée pour le calcul des hydrogrammes précédents. Cette semaine présente de très fortes variations liées au marnage avec un débit de base de 50 m³/s sur lequel se superpose une variation journalière de 100 m³/s issue du rejet des centrales hydroélectriques. A partir de cet hydrogramme, le tableau 5.7 donne les productions énergétiques et les volumes de rétention nécessaires pour la mise en oeuvre de chacun des modèles heuristiques proposés au paragraphe 5.4.2.1. Les volumes de rétention sont exprimés en mètres de variation calculés avec un réservoir d'environ 1 km² de surface. De ce fait, chaque mètre de variation correspond environ à un volume de 10⁶m³.

Exceptés les deux premiers modes de gestion qui ne présentent aucun intérêt écologique et qui servent seulement de référence, les quatre modes suivants de gestion permettent de conclure que :

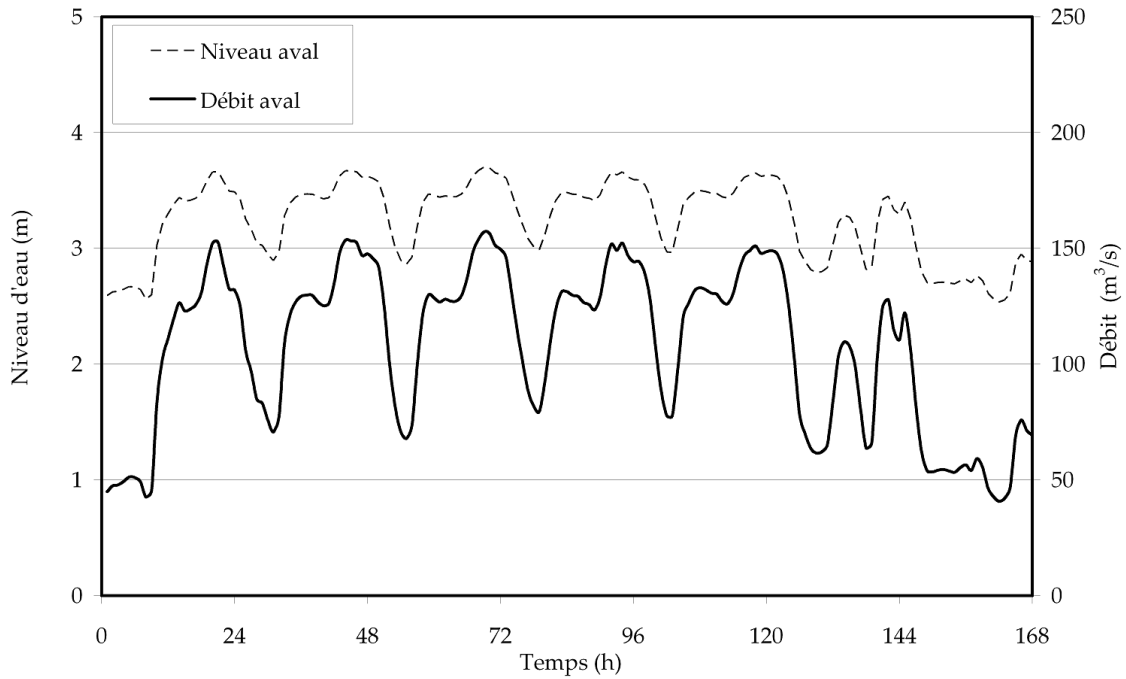


FIG. 5.9: Semaine hivernale type du Rhône valaisan à Branson

TAB. 5.7: Production énergétique et volume de rétention des modèles de gestion heuristique pour une semaine hivernale type à Branson

Modèle heuristique	Production		Volume de rétention		Equation n°
	MWh/semaine	% du max	m	% du max	
Niveau amont constant	849	100 %	0	0 %	5.3
Débit aval constant	315	37 %	7.35	100 %	5.4
Moyenne mobile 10 h	763	90 %	1.65	22 %	5.4
Gradient 8 cm/h	753	89 %	1.55	21 %	5.5
Amplitude 30 cm	663	78 %	1.61	22 %	5.6
Combiné	586	69 %	3.64	50 %	5.8

- le respect du gradient réduit l’efficacité énergétique d’environ 10 % ;
- ce même respect nécessite un volume de rétention d’environ $1.6 \cdot 10^6 \text{m}^3$;
- le respect de l’amplitude réduit l’efficacité énergétique d’environ 20 % ;
- ce même respect nécessite un volume de rétention similaire ($1.6 \cdot 10^6 \text{m}^3$) ;
- la gestion combinée (gradient-amplitude) cumule les effets des deux modes distincts.

Toutefois, l’évolution hebdomadaire hivernale du niveau d’eau du réservoir à la figure 5.8 (gestion combinée) permet deux constatations :

- un important potentiel d’amélioration du point de vue énergétique peut être exploité à condition de prévoir les débits futurs ;
- le marnage journalier nécessite un volume de rétention largement inférieur au volume hebdomadaire (environ 0.5 contre environ $5 \cdot 10^6 \text{m}^3$).

Le développement d’une gestion qui exploite ce potentiel énergétique à l’intérieur des limites écologiques fait l’objet du paragraphe 5.4.2.3.

5.4.2.3 Modèles de gestion optimisée

Les modèles de gestion optimisée suivent les principes des modèles heuristiques mais abordent le même problème sous un angle mathématique. De plus, ils cherchent à intégrer la prévision des débits de manière à anticiper le débit aval et ainsi réduire en même temps le marnage dans la rivière et les battements dans le réservoir. Pour ce faire, ils posent la gestion du débit aval comme un problème mathématique, linéaire ou non, qui doit ensuite être résolu de manière à optimiser la fonction objectif du modèle. La solution arithmétique est calculée à l’aide du logiciel *AMPL* développé par Fourer et al. (2003). Le logiciel est utilisé dans sa version étudiante, gratuite, limitée à 300 contraintes et 300 variables. La résolution est effectuée à un pas de temps horaire. Comme les calculs sont effectués avec des débits historiques, la prévision est considérée comme parfaite.

Le débit aval moyen est calculé à un horizon de 168 heures (7 jours), tandis que le débit aval horaire est calculé à un horizon de 96 heures (4 jours). Cette limite est imposée par le nombre maximal de contraintes de la version étudiante de *AMPL*. La planification est acceptée pour 48 heures. Dans le cas d’une gestion réelle, basée sur une véritable prévision et non sur une prévision parfaite, la planification pourrait être recalculée chaque heure.

Ces modèles de gestion considèrent l’amplitude et le gradient de variation du niveau d’eau de la rivière aval, tels que définis au paragraphe 5.4.2.1, comme des paramètres de gestion. Mathématiquement, afin d’inclure ces paramètres dans le but principal de la gestion proposée, ils sont transformés en contraintes du système. De la sorte, la solution est comprise à l’intérieur des limites imposées. Le second but du modèle est de maximiser la production d’énergie. Ce but est intégré dans le modèle par le biais de la fonction objectif. À cause du volume maximal de rétention et de l’hydrogramme amont, la quantité d’eau turbinée est indépendante du modèle de gestion choisi. La maximisation de l’énergie passe forcément par la maximisation du niveau d’eau dans le réservoir. L’objectif du modèle est de maximiser la somme des taux de remplissage du réservoir de chaque pas de temps. Ce modèle de gestion est formulé aux équations 5.9 à 5.12. La figure 5.10 illustre une telle gestion pour une semaine hivernale.

Objectif :

$$Max \left(\sum_{t=1}^{96} \frac{H_{res}(t)}{H_{res,max}} \right) \quad (5.9)$$

sous contraintes :

$$|h_{av}(t) - h_{av}(t - 1)| \leq \Delta h, \forall t \quad (5.10)$$

$$h_{av}(t) \in [h_{moy} - A/2, h_{moy} + A/2], \forall t \quad (5.11)$$

$$H_{res}(t) \in [H_{res,min}, H_{res,max}], \forall t \quad (5.12)$$

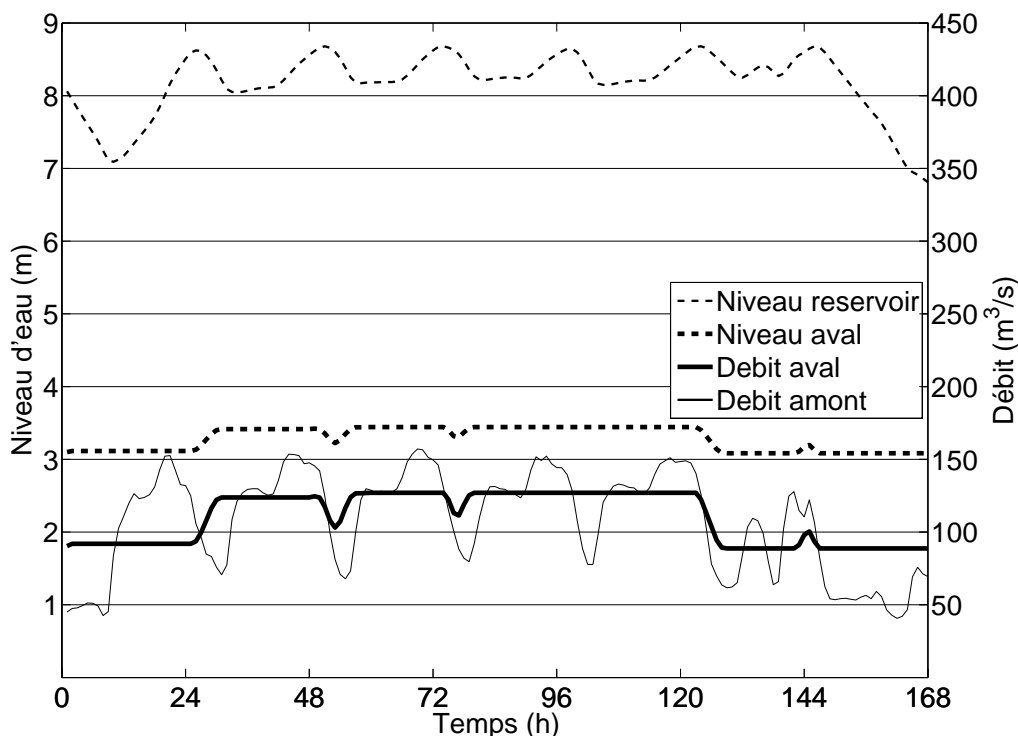


FIG. 5.10: Gestion du réservoir avec le modèle optimisé pour une semaine hivernale type à Branson

D'autres formes de fonctions objectif sont également testées avec les mêmes contraintes. Parmi elles, la minimisation du volume de rétention nécessaire à l'équation 5.13, la minimisation des variations autour d'un niveau donné à l'équation 5.14 ainsi que la maximisation du chiffre d'affaire lié à la production d'énergie (équation 5.15). Des variantes combinées complètent les essais. Enfin, un modèle avec une planification hebdomadaire est testé. Pour contourner la limite des 300 contraintes du logiciel de calcul, la semaine horaire (168 heures) est réduite à 84 variables (pas de temps de deux heures). Le système hebdomadaire réduit est calculé avec la fonction objectif donnée par l'équation 5.9. Puis il est redécomposé en un système horaire et à nouveau optimisé en deux parties distinctes (deux demi-semaines de 84 heures) avec les points de départ et d'arrivée fixés par l'optimisation réduite. Finalement, un modèle cyclique est encore testé (niveau initiale dans le réservoir = niveau final) avec le modèle initial (équation 5.9). Cette contrainte supplémentaire nécessite de suivre le cycle hydraulique de la rivière et n'améliore pas les performances du modèle. C'est pourquoi elle n'est pas retenue.

$$Min\left(\sum_{t=1}^{96}(Q_{am}(t) - Q_{av}(t))^2\right) \quad (5.13)$$

$$Min\left(\sum_{t=1}^{96}(H_{res, cible} - H_{res}(t))^2\right) \quad (5.14)$$

$$Max\left(\sum_{t=1}^{96}\left(\frac{H_{res}(t)}{H_{res,max}} * Q_{av}(t) * P_{vente}(t)\right)\right) \quad (5.15)$$

5.4.2.4 Comparaison des modèles de gestion optimisée

La comparaison des modèles est effectuée avec les mêmes données qu'au tableau 5.7 (paragraphe 5.4.2.2). Les résultats de production énergétique et de volume de rétention nécessaire sont présentés au tableau 5.8 pour chaque modèle optimisé. Les maxima d'énergie et de volume de rétention sont équivalents à ceux du paragraphe 5.4.2.2.

TAB. 5.8: Production énergétique et volume de rétention des modèles de gestion optimisée pour une semaine hivernale type à Branson

Modèle optimisé	Production		Volume de rétention		Equation n°
	MWh/semaine	% du max	m	% du max	
Max taux remplissage	800	94 %	1.53	21 %	5.9
Min volume	748	88 %	1.92	26 %	5.13
Niveau cible	743	88 %	1.52	21 %	5.14
Max chiffre affaire	775	91 %	4.09	56 %	5.15
Bi-horaire	796	94 %	1.56	21 %	5.9

La comparaison des modèles de gestion optimisée donne l'avantage au modèle le plus simple qui maximise le taux de remplissage. Ce dernier maximise au mieux la production d'énergie pour un volume de rétention très proche de la valeur la plus faible. Vis-à-vis du modèle bi-horaire (qui utilise la même fonction objectif), il possède l'avantage de réduire le nombre de calcul d'optimisation (d'un facteur 2 environ). Par rapport aux autres modèles, il possède l'avantage d'avoir une fonction objectif linéaire, ce qui rend sa résolution plus rapide. Ce modèle résume ainsi rapidité et efficacité.

Par comparaison avec les modèles heuristiques, les modèles à gestion optimisée sont globalement meilleurs tant pour la production d'énergie que pour la minimisation du volume de rétention. Compte tenu du marnage aval, le modèle heuristique " combiné " est le seul qui puisse être comparé aux modèles optimisés. Le modèle qui maximise le taux de remplissage montre ainsi sa supériorité puisqu'il réduit, par rapport au modèle de gestion heuristique combiné :

- la perte énergétique d'un facteur 5.4 ;
- le volume de rétention d'un facteur 2.4.

5.4.3 Choix du modèle de gestion ordinaire

Le modèle de gestion optimisée qui maximise le taux de remplissage est le modèle retenu pour la gestion ordinaire de l'aménagement à buts multiples. Ce modèle maximise implicitement la production d'énergie tout en respectant les contraintes de marnage aval. De plus, avec la prévision des débits, il minimise le volume de rétention nécessaire. Enfin, à cause de la forme strictement croissante de la dérivée de toute relation " hauteur-volume " d'un bassin de rétention, ce même modèle, pour un volume de rétention donné, minimise également les battements dans le réservoir. Cependant cet argument a une importance secondaire pour un réservoir de faible profondeur.

Le modèle choisi réduit grandement le nombre de variables. Il passe d'un vecteur horaire (chaque heure possède son débit ce qui constitue une variable indépendante) à quelques paramètres de gestion. Pour distinguer la gestion hivernale de la gestion estivale, le modèle possède un gradient et une amplitude hivernaux et estivaux. Pour limiter les battements dans le réservoir, deux paramètres supplémentaires s'ajoutent, à savoir le niveau minimal accepté dans le réservoir (valeur estivale et valeur hivernale). Une règle de relaxation des contraintes est appliquée en cas d'infaisabilité physique du système obtenu. Le modèle possède ainsi les 6 variables de gestion avec les valeurs types suivantes :

- 2 valeurs de gradient : gradient hivernal à 8 cm/h et gradient estival à 12 cm/h ;
- 2 valeurs d'amplitude : amplitude hivernale à 30 cm et amplitude estivale à 50 cm ;
- 2 valeurs de battements : battement hivernal à 4.5 m et battement estival à 1.5 m.

Les valeurs de ces 6 paramètres peuvent être optimisées simultanément avec les variables de taille de l'aménagement (c.f. chapitre 6^{ème}). La transition hivernale / estivale est effectuée en fonction du débit hebdomadaire moyen. S'il est inférieur à 140 m³/s, la saison est hivernale, s'il est supérieur à 200 m³/s, la saison est estivale. Entre ces deux débits, une transition linéaire est appliquée pour calculer les valeurs des 6 variables de gestion.

Sur la base d'un aménagement défini dans sa taille, les 6 variables du modèle de gestion permettent alors de calculer, sur la base du vecteur de débit amont, la variable de sortie du modèle, soit le vecteur de débit aval.

5.4.4 Application du modèle de gestion optimisée au cas d'étude

Sur la base d'un aménagement standard de 1 km² de surface avec une hauteur utile de 8.68 m, les figures 5.11 et 5.12 présentent deux semaines types hivernale et estivale (6^{ème} et 33^{ème} semaine de l'année 1993). Les valeurs des variables de gestion sont celles du paragraphe 5.4.3.

La gestion hivernale respecte parfaitement les deux contraintes de gradient et d'amplitude sur le niveau aval. En conséquence, à cause de la courbe de tarage (lien entre le gradient exprimé en ch/m et les variations de débit possible), le débit aval est compris entre 80 et 125 m³/s au lieu des 50 et 150 m³/s du débit amont. L'aménagement apporte une composante importante au soutien du débit d'étiage pendant le week-end. Le débit est ainsi largement tranquilisé.

Le débit estival, plus important que le débit hivernal, permet des variations plus importantes. Le débit aval suit ainsi le débit amont. Cette gestion s'approche naturellement d'une gestion usuelle des aménagements au fil de l'eau.

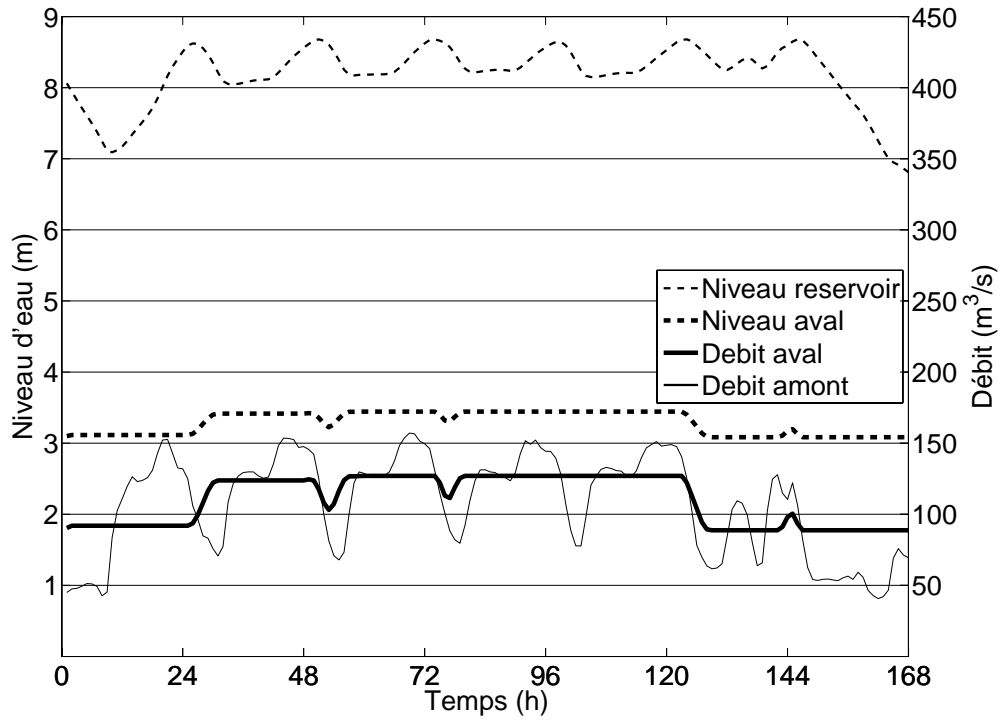


FIG. 5.11: Variation du niveau du réservoir pour une semaine hivernale type à Branson

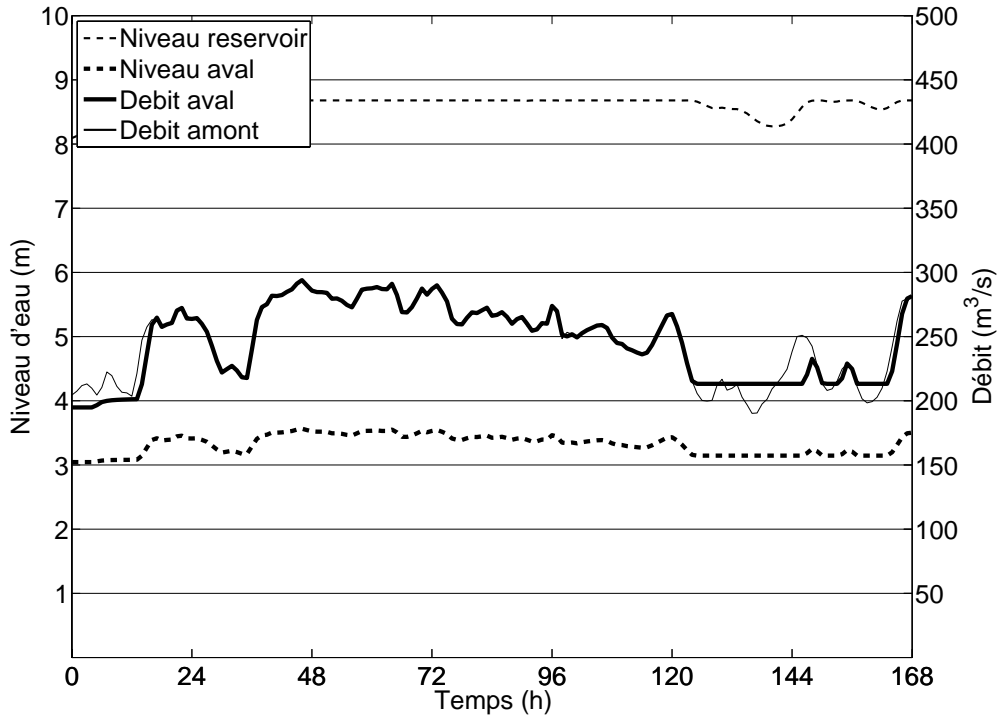


FIG. 5.12: Variation du niveau du réservoir pour une semaine estivale type à Branson

L'agrégation de l'année entière génère la figure 5.13. Elle compare l'état historique (débit du Rhône à la Porte du Scex en 1907) avec le débit actuel et le débit proposé par la gestion optimisée de l'aménagement (Heller, Bollaert and Schleiss, 2005).

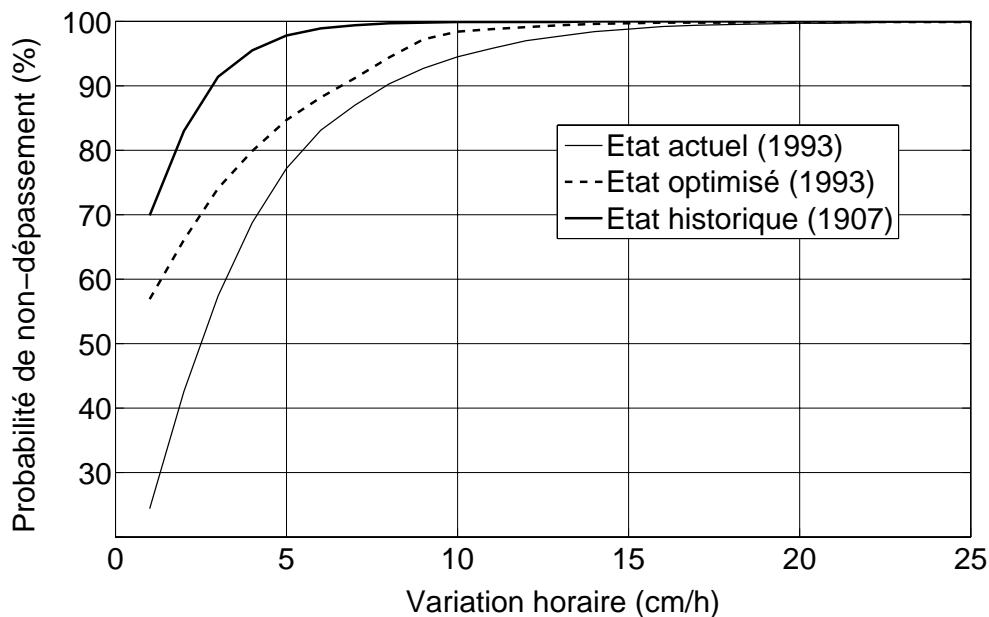


FIG. 5.13: Probabilité d'occurrence annuelle d'une vitesse de variation donnée du niveau d'eau de la rivière aval

L'axe vertical représente la probabilité, calculée sur une année entière, d'avoir un marnage horaire égal ou inférieur à la valeur lue sur l'axe horizontal. Cet indicateur est développé par Meile et al. (2005). La gestion optimisée supprime une très grande partie des oscillations de faible amplitude (inférieure à 5 cm). Elle présente un point d'inflexion à 8 cm/h qui correspond à la valeur de la contrainte du gradient hivernal. Les variations supérieures à 15 cm/h sont supprimées. Si l'on mesure la réduction du marnage artificiel à l'espace compris entre les courbes "état actuel" et "état optimisé" par rapport à la courbe "état historique", la gestion supprime 53% du marnage. A ce stade, une optimisation sur les valeurs des contraintes de gestion doit être menée. C'est l'objet entre autre du chapitre 6^{ème}.

5.5 Modèles de gestion des crues

La gestion des crues représente le second but hydraulique de l'aménagement. A l'opposé de la gestion ordinaire, cette gestion reste difficile à appréhender à cause de la faible occurrence des événements, de leur relative courte durée pour des débits très importants. Pour ces raisons et en fonction du volume de laminage disponible en regard du volume de crue, il n'est pas possible de traiter les deux gestion simultanément. Les résultats tirés de ce chapitre sont tous basés sur les débits de crue issus de l'étude CONSECRU 2 (Hingray et al., 2006). En l'absence de profil hydraulique capable d'accepter de tels débits, un profil élargi est établi à partir du profil actuel. Sur ces bases, quatre modèles de gestion sont proposés. Afin de les placer du côté sécuritaire, aucun modèle n'est basé sur une prévision. Les quatre modèles sont basés sur des règles de gestion qui ne tiennent pas compte de la prévision de débit. De ce fait, elles peuvent être définies comme sécuritaires. Enfin, les gains issus de la rétention peuvent être calculés de deux manières : soit par réduction de la hauteur des digues aval, soit par réduction de la probabilité d'inondation. Les deux calculs présentés sont basés sur un échantillon probabiliste. Comme pour la gestion ordinaire, la station de mesure est celle de Branson.

5.5.1 Etude CONSECRU 2, débits de crue

L'étude CONSECRU 2, mandatée par le canton du Valais, a pour but de déterminer les différents scénarios météorologiques de crue ainsi que les débits qui y sont associés, notamment dans le Rhône supérieur.

Sur la base d'un générateur stochastique de situation météorologique, lui-même calé sur des débits historiques recomposés (crues recomposées sans l'effet bénéfique de rétention des aménagements hydroélectriques), 2000 années sont simulées (50 simulations de 40 ans chacune). Ces simulations font apparaître 117 événements de crues à Branson. La figure 5.14 donne ces 117 hydrogrammes. Une analyse visuelle de ce graphe donne un large fuseau d'hydrogramme dont la pointe est comprise entre 800 et 1'000 m³/s. Un second fuseau comprend des crues dont la pointe se situe entre 1'200 et 1'400 m³/s. Enfin, 4 crues dépassent le débit de 1'500 m³/s dont deux dépassent 2'000 m³/s. L'extrapolation de la courbe recomposée donne, pour toutes ces crues, des périodes de retour théoriques comprises entre 80 et 20'000 ans. Cette valeur de 20'000 ans est assurément le résultat d'un calcul dont la signification est discutable.

Pour la station de Branson, l'étude CONSECRU 2 recommande deux capacités, l'une à 1250 m³/s contenue par les digues et l'autre à 1600 m³/s contenue par les arrière-digues. Ces deux capacités sont reprises tout au long du présent travail.

Une analyse volumétrique de ces 117 crues donne des informations intéressantes. A supposer une capacité hydraulique dans le Rhône, le graphe 5.15 donne les volumes excédants pour chacune des crues. La capacité est posée à 1250 m³/s, c'est-à-dire la capacité future supposée du Rhône à Branson (capacité sans les arrière-digues).

La même analyse avec la capacité future supposée du Rhône à Branson à l'intérieur de ses arrière-digues génère le graphe 5.16. Cette capacité vaut 1600 m³/s.

La capacité des digues à 1'250 m³/s génère 22 événements de débordement sur ces dernières. Ces événements inondent l'espace compris entre les digues et les arrière-digues. Il en résulte

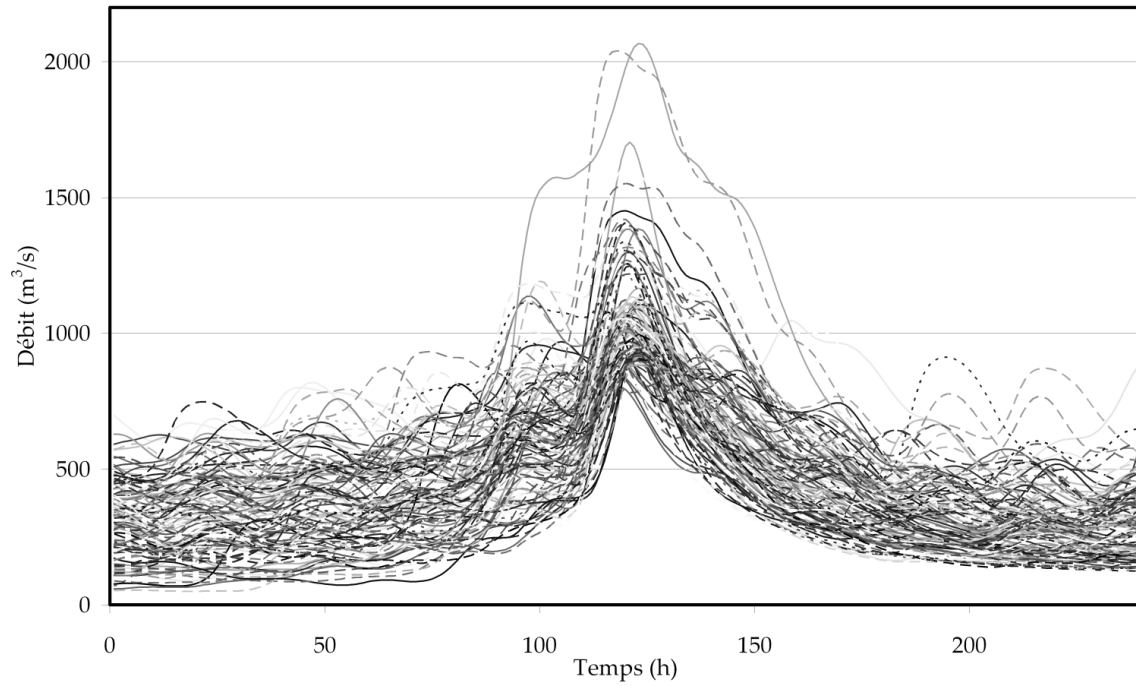


FIG. 5.14: 117 hydrogrammes de crue générés à Branson (CONSECRU 2)

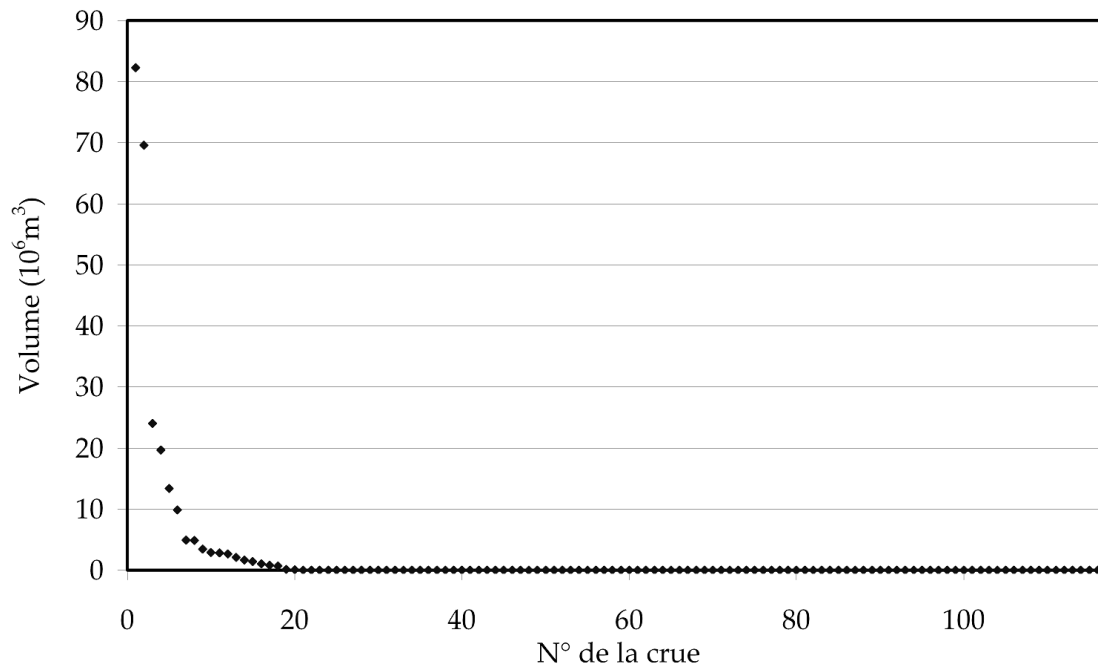


FIG. 5.15: Volumes débordés à Branson avec une capacité de la rivière de 1'250 m³/s

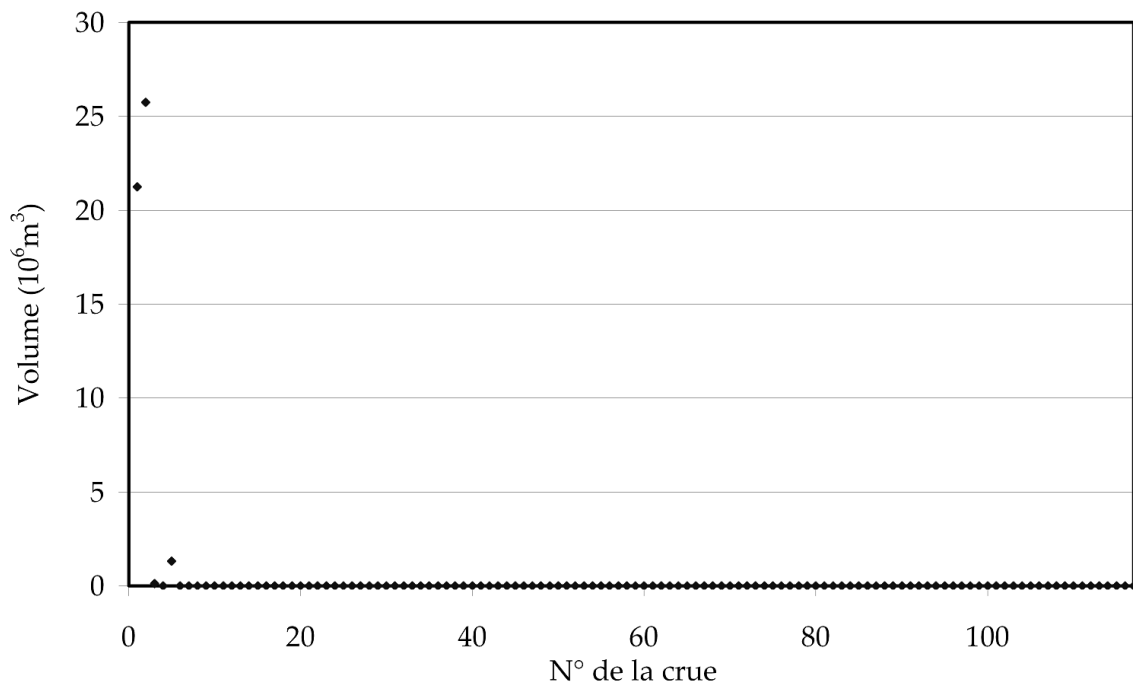


FIG. 5.16: Volumes débordés à Branson avec une capacité de la rivière de $1'600 \text{ m}^3/\text{s}$

une perte de production agricole et des coûts de remise en état des surfaces inondées. Un volume de rétention de $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ réduit ce nombre de 22 à 2 événements.

Avec une capacité des arrières-digues à $1'600 \text{ m}^3/\text{s}$, 4 événements de débordement demeurent. Ces événements inondent directement des espaces à fort dommage potentiel (espaces urbains, installations techniques, zones industrielles). Un volume de rétention de $25 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, réduit ce nombre à 1 seul événement.

Le tableau 5.9 résume l'impact de la rétention sur les débordements compte tenu d'une capacité donnée dans la rivière. L'apparente inhomogénéité des résultats provient de la distribution des hydrogrammes de CONSECRU 2. Toutefois, avec une capacité aval réduite, des volumes importants sont nécessaires alors que pour des capacités plus élevées, des volumes réduits de rétention suffisent. Pour des débits compris entre $1'200$ et $1'600 \text{ m}^3/\text{s}$, un volume de rétention aux environs de $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ semble correspondre à une valeur optimale. Toutefois, pour calculer un véritable optimum, il faut considérer le risque résiduel lié au débordement (probabilité d'occurrence de la crue et son coût des dégâts potentiels) ainsi que le coût de la rétention.

5.5.2 Etablissement de la courbe de tarage

L'établissement d'un modèle de simulation des crues nécessite une courbe de tarage de la rivière aval. Cette relation détermine, pour un débit donné, le niveau d'eau dans la rivière et fixe ainsi pour la gestion le niveau minimal requis dans le réservoir.

L'actuelle courbe de tarage de la section de contrôle de Branson donne une capacité maximale de $1021 \text{ m}^3/\text{s}$ pour une hauteur d'eau de 8.68 m (mesurée depuis le fond du lit). Elle est cependant inutile pour les débits de crue prévus. Aucune autre courbe n'est actuellement proposée.

TAB. 5.9: Nombre de débordement évités sur la base des 117 crues de CONSECRU 2 pour un volume de rétention et une capacité aval donnés

Capacité aval m ³ /s	Volume de rétention en 10 ⁶ m ³					
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	+ 25
1'000	38	6	4	6	3	7
1'100	16	8	3	2	2	4
1'200	15	3	1	1	1	3
1'300	11	1	2	1	0	2
1'400	4	3	0	0	0	2
1'500	3	0	0	0	0	2
1'600	2	0	0	0	1	1
1'700	1	0	1	1	0	0
1'800	0	1	1	0	0	0
1'900	2	0	0	0	0	0

La courbe élaborée dans ce travail est prudente. Elle cherche à donner une capacité suffisante au Rhône pour permettre de traiter les débits de crue générés par l'étude CONSECRU 2. Toutefois, la capacité reste limitée pour ne pas aboutir à des hauteurs d'eau trop faibles ce qui améliorerait la capacité de rétention d'un volume donné. La relation vise, pour une hauteur identique de 8.68 m, une capacité de 1'600 m³/s à la place de l'actuelle capacité de 1'000 m³/s. Elle est produite par homothétie de la courbe actuelle et ne résulte pas d'un calcul hydraulique basé sur une géométrie définie. Afin de ne pas avoir de problèmes numériques pour des débits supérieurs, la relation est extrapolée jusqu'à une hauteur d'eau de 10 m avec une pente 5 fois inférieure à celle calculée à la hauteur 8.68 m. La figure 5.17 présente graphiquement les deux relations.

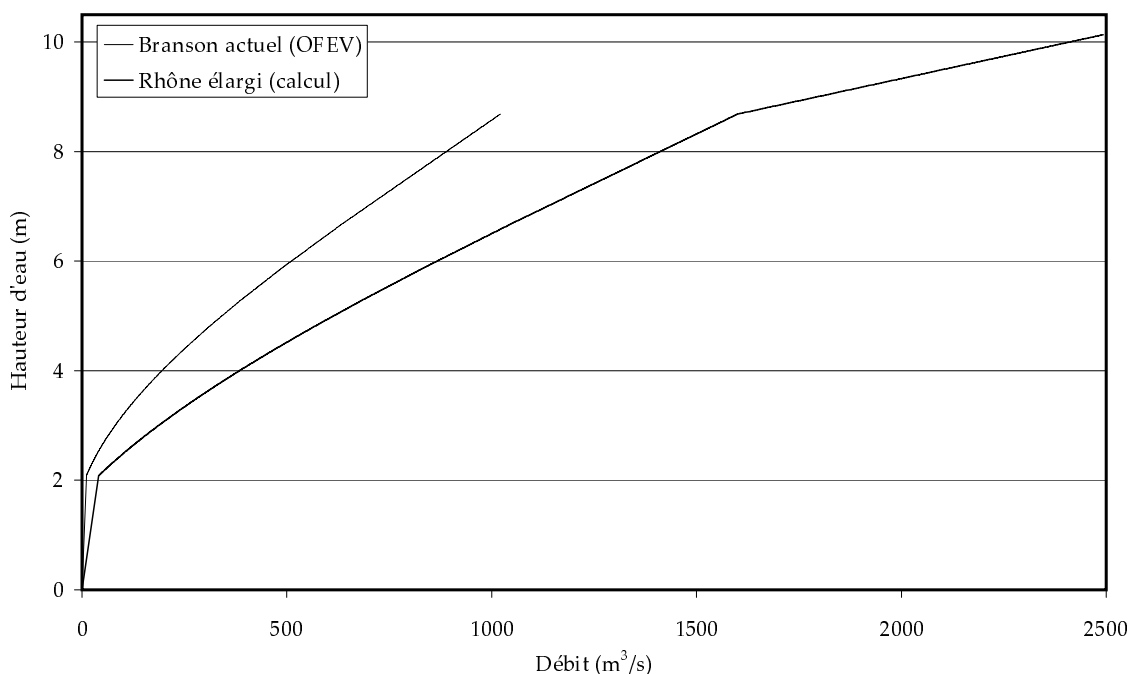


FIG. 5.17: Relation de tarage de la section de Branson : état actuel et état futur

5.5.3 Modèles développés de gestion des crues

Les quatre modèles développés appliquent un ensemble de règles simples pour déterminer l'hydrogramme aval. La différence entre l'hydrogramme amont et aval constitue l'écrêtement accumulé dans le réservoir.

Ces quatre modèles possèdent une règle initiale de vidange préventive du réservoir. Compte tenu d'un volume de $10 \cdot 10^6 \text{m}^3$ (totalité du réservoir) et d'un débit de vidange limité à $200 \text{ m}^3/\text{s}$, le temps nécessaire à l'opération reste inférieur à 14 heures. Il est raisonnable de baser cette opération sur une alarme météorologique. La situation de départ des modèles de crue est donc un réservoir dont le niveau est identique à celui de la rivière.

Chacun des modèles est appliqué à une crue de débit de pointe de $1520 \text{ m}^3/\text{s}$. Il s'agit d'une crue à double pointe dont la période de retour associée peut être estimée à 600 ans (Hingray et al., 2006). L'aménagement simulé à une surface de 1 km^2 et une profondeur de 8.68 m. Il possède un volume de rétention d'au maximum $7.5 \cdot 10^6 \text{m}^3$ (au minimum 1 m de tranche morte). Le volume réellement disponible dans le réservoir pour laminer la crue dépend cependant de l'hydrogramme qui précède la pointe de la crue. Le volume de rétention peut être augmenté par une zone d'épanchement moyennant un organe de liaison. Cette répartition (réservoir, zone d'épanchement) fait l'objet, entre autre, du chapitre 6^{ème}.

5.5.3.1 Modèle de laminage passif

Le premier modèle est entièrement passif. Il ne contient qu'une seule règle, se résumant à "garder l'intégralité des vannes ouvertes pendant tout l'événement de crue". L'aménagement effectue uniquement un laminage passif sur l'hydrogramme amont. En raison de la lenteur du phénomène en regard du pas de temps de calcul, le laminage est calculé par équivalence des niveaux d'eau entre le réservoir et le niveau à la vanne. La figure 5.18 illustre cet effet de laminage passif. La première pointe est réduite de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ et la seconde de seulement $20 \text{ m}^3/\text{s}$. Pendant les 20 heures qui suivent les pointes, le débit aval reste légèrement supérieur au débit sans aménagement à cause de la vidange finale du réservoir.

5.5.3.2 Modèle de laminage actif

Le second modèle ajoute, dans la mesure du possible, une limitation à l'hydrogramme aval. Il nécessite une règle pour la gestion des vannes du barrage en rivière.

Jusqu'à un débit cible, typiquement la capacité hydraulique de la rivière aval, l'aménagement garde les vannes ouvertes. Pour des débits entrants supérieurs, il maintient, si le réservoir le permet, le débit aval constant (à la valeur cible). Lorsque le réservoir est plein, le niveau dans ce dernier est simplement maintenu et il n'a plus d'impact sur le débit aval ($Q_{aval} = Q_{amont}$). De la sorte, l'aménagement apporte une contribution forcément positive, potentiellement sous-optimale. La figure 5.19 illustre cette gestion avec le même aménagement tel que décrit au paragraphe 5.5.3.1. La première pointe de crue est réduite de $57 \text{ m}^3/\text{s}$. Lors de la seconde pointe, le débit aval cible ($1250 \text{ m}^3/\text{s}$) est maintenu pendant quelques heures. Puis, le réservoir étant plein, le débit aval devient identique au débit amont. Le débit de la seconde pointe n'est pas réduit mais l'hydrogramme aval n'est pas non plus supérieur au débit amont. Une telle gestion offre l'avantage, en cas de débordement, de limiter le volume débordé et de retarder le moment de débordement. Ce second avantage peut être significatif en situation d'urgence.

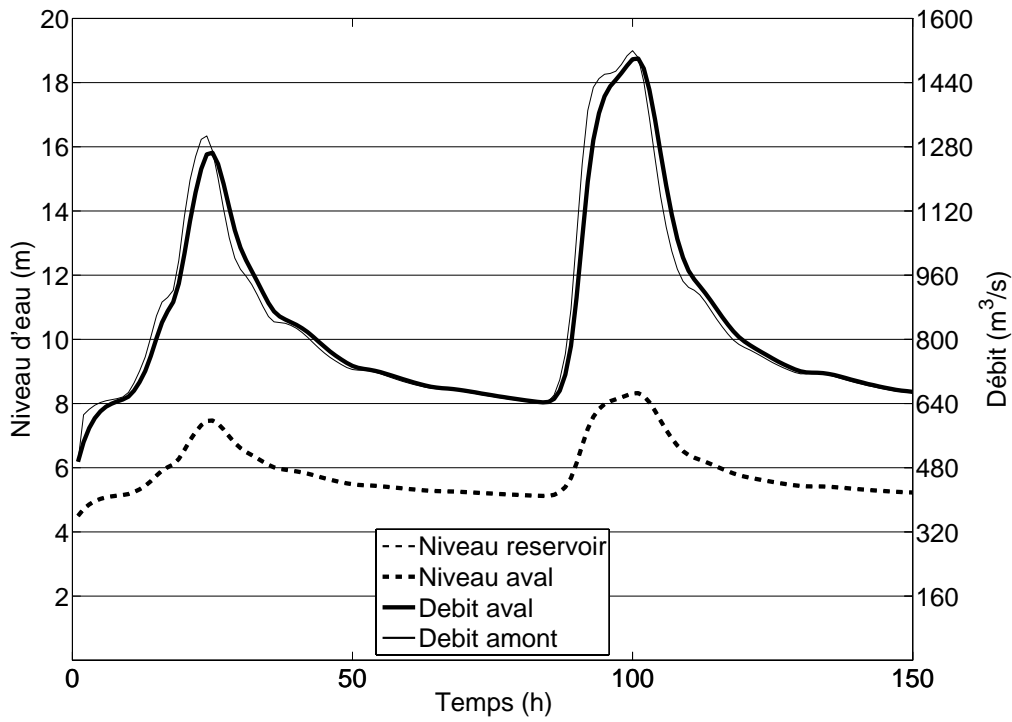


FIG. 5.18: Hydrogramme de laminage passif pour une crue d'un débit maximal de $Q_{pointe} = 1520 \text{ m}^3/\text{s}$

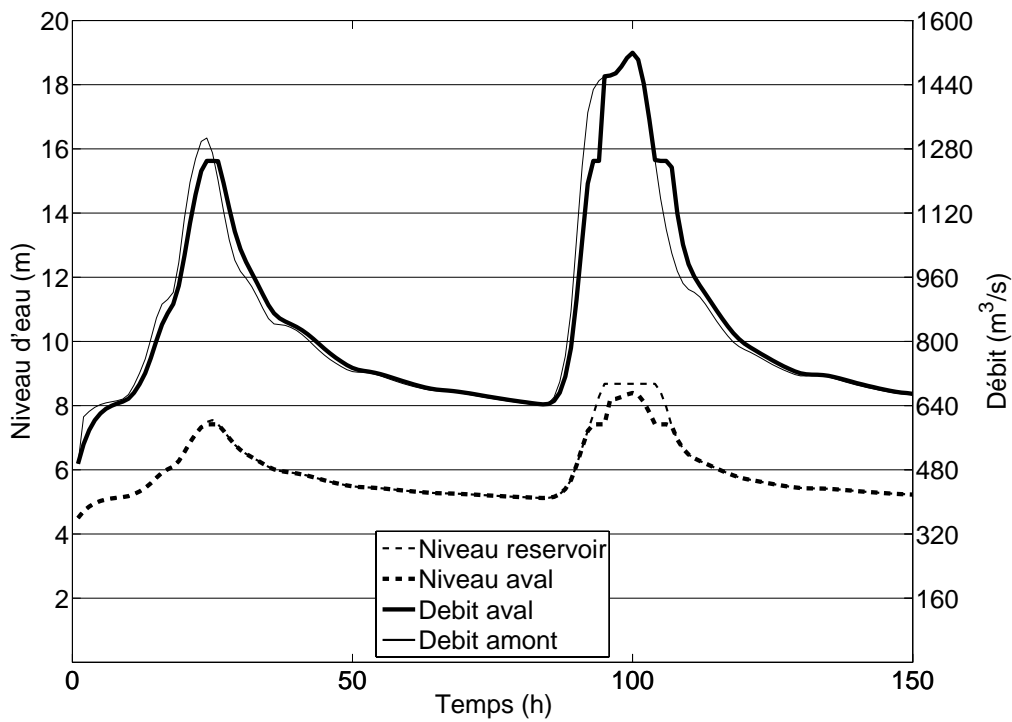


FIG. 5.19: Hydrogramme de laminage actif pour une crue d'un débit maximal de $Q_{pointe} = 1520 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.3.3 Modèle de laminage actif avec réservoir déconnecté

Le second modèle offre le désavantage de remplir le réservoir pendant que le niveau monte dans la rivière avant même d'atteindre le débit cible (la capacité de la rivière aval). Cette perte de volume s'observe à la figure 5.19 sur la courbe du niveau d'eau dans le réservoir pour la période comprise entre 0 et 25 heures. Le troisième modèle, présenté ici, donne la possibilité de déconnecter le réservoir et la rivière amont. Physiquement, il s'agit de construire une vanne entre le réservoir et sa connexion à la rivière. Cette vanne est appelée "porte" afin de la distinguer des vannes du barrage. Ce modèle possède deux règles supplémentaires, l'une relative à la fermeture complète et l'autre relative à l'ouverture partielle de la porte. L'ouverture complète intervient seulement en fin d'événement.

La règle pour la fermeture complète de la porte garantit la déconnection du réservoir et évite son remplissage inopportun. Dès que le niveau dans le réservoir est inférieur au niveau de la rivière et que le débit aval est encore inférieur au débit cible (c'est à dire que le réservoir se remplit sans nécessité) la porte se ferme.

La règle d'ouverture comporte deux cas. La porte s'ouvre partiellement si :

- le niveau dans le réservoir est inférieur à celui de la rivière et le débit aval cible est atteint (le réservoir est rempli par le débit excédentaire) ;
- le niveau dans le réservoir est supérieur à celui de la rivière et le débit aval cible n'est pas atteint (le réservoir se vide en vue d'une prochaine pointe de crue).

Physiquement, l'ouverture partielle pour le remplissage peut être effectuée par une vanne clapet. Par ailleurs, l'ouverture complète nécessitant la quasi-équivalence des niveaux de part et d'autre de la porte, la vidange du réservoir peut être effectuée par un organe spécifique ou, selon la configuration, par la centrale elle-même.

Contrairement au modèle de laminage passif (premier modèle), le débit aval n'est, dans ce modèle, jamais supérieur, de manière incontrôlée, à l'hydrogramme entrant. Il ne garantit cependant pas réduction de la pointe de la crue. Ce modèle offre également plus de libertés de manoeuvre que le second avec cependant les mêmes avantages et inconvénients. La figure 5.20 illustre cette gestion pour l'hydrogramme de crue les caractéristiques de l'aménagement déjà utilisés précédemment. Le niveau du réservoir augmente en permanence malgré la fermeture de la porte. Ceci est dû à la digue perméable et aux débits de percolation, estimés à $5 \text{ m}^3/\text{s}$. La première pointe est totalement absorbée par le réservoir comme dans le cas précédent. La seconde pointe pose le même problème. Toutefois, la durée de réduction du débit de la seconde pointe est largement augmentée.

5.5.3.4 Modèle de laminage actif avec réservoir déconnecté et organe de vidange

Dans le cas d'un hydrogramme de crue avec une double pointe, il est probable que l'aménagement parvienne à écrêter la première pointe mais se retrouve avec un réservoir plein avant la seconde pointe. En effet, la vidange complète du réservoir entre les deux pointes peut être rendue impossible à cause du niveau d'eau dans la rivière. Toutefois, la capacité de cette dernière supporterait un débit supplémentaire. Cette impossibilité est levée avec l'ajout d'un organe de vidange qui rejette son débit à l'aval de la courbe de remous générée par l'aménagement. Cet organe peut également être utilisé pour maintenir le niveau du réservoir au plus bas malgré les débits de la digue perméable et ceux provenant de la percolation.

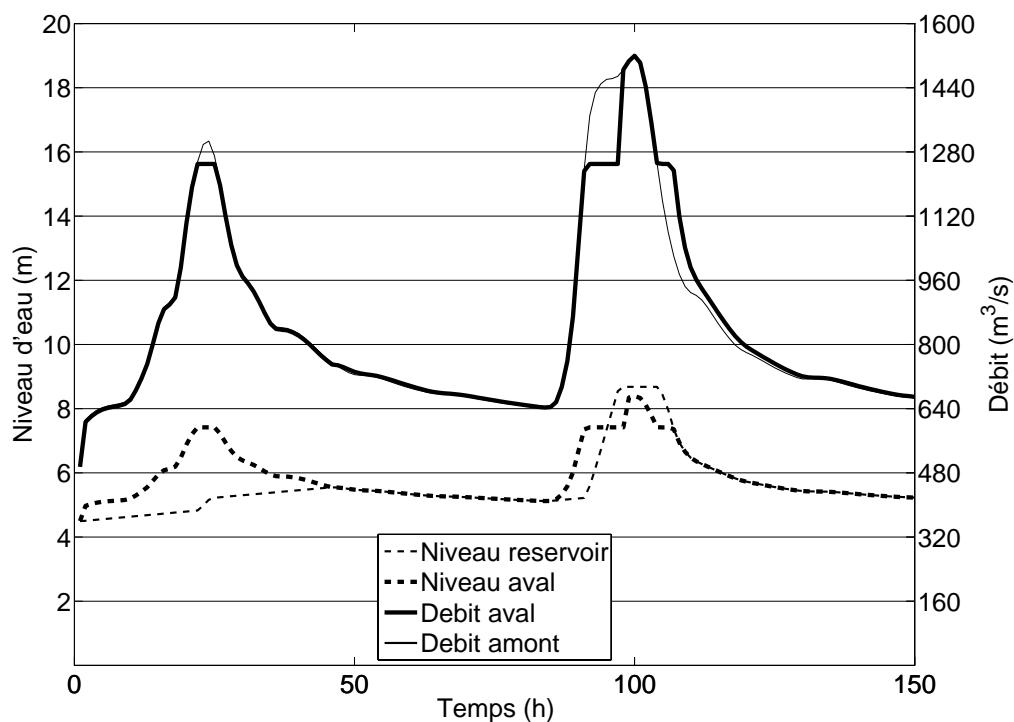


FIG. 5.20: Hydrogramme de laminage actif avec déconnection du réservoir de la rivière amont pour une crue d'un débit maximal de $Q_{pointe} = 1520 \text{ m}^3/\text{s}$

L'organe de vidange nécessite trois règles supplémentaires, deux pour l'ouverture et une pour la fermeture, soit :

- ouverture de l'organe à la fermeture de la porte pour maintenir le niveau du réservoir au plus bas ;
- fermeture de l'organe lorsque que le débit aval cible est atteint (et que la porte est ouverte partiellement) ;
- ouverture de l'organe dès que le débit aval passe en-dessous de la valeur cible pour permettre la vidange du réservoir.

Ce modèle fonctionne hydrauliquement comme le troisième. Il ajoute cependant une sécurité supplémentaire en maintenant le niveau du réservoir au plus bas. La figure 5.21 illustre le fonctionnement d'un tel aménagement. L'organe de vidange a ici une capacité de $22 \text{ m}^3/\text{s}$. La première pointe de crue ne pose pas de problème. L'organe de vidange continue de fonctionner pour maintenir le niveau du réservoir aussi bas que possible. Lorsque la seconde pointe arrive, le réservoir est vide et il absorbe le débit excédentaire. De ce fait, le débit est réduit de $270 \text{ m}^3/\text{s}$. A la fin de la seconde pointe de crue, le réservoir n'est pas encore à son niveau maximal.

Cette gestion utilise au maximum le volume du réservoir. Cependant, le niveau inférieur du réservoir ne peut pas, pour des raisons légales, atteindre le niveau de la nappe phréatique. De ce fait, cette gestion peut être limitée dans son application selon les sites étudiés.

5.5.4 Méthodes de calcul des gains liés à la rétention

Les gains liés à la rétention peuvent être calculés de deux manières :

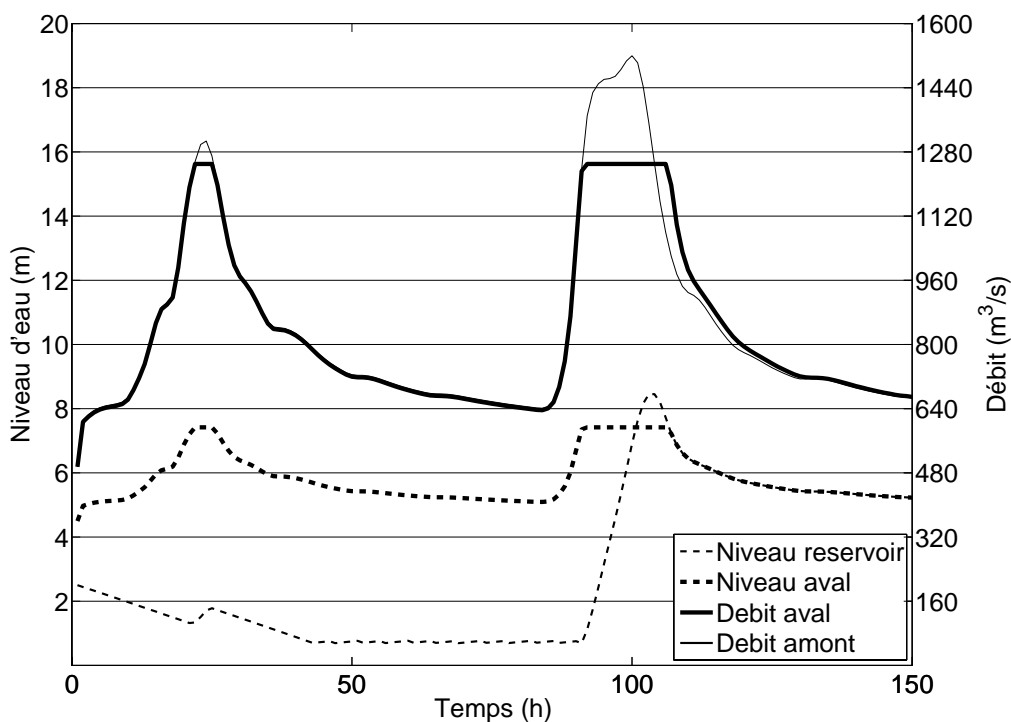


FIG. 5.21: Hydrogramme de laminage actif avec déconnection du réservoir de la rivière amont et vidange aval pour une crue d'un débit maximal de $Q_{pointe} = 1520 \text{ m}^3/\text{s}$

- soit par réduction du risque résiduel aval ;
- soit en gardant un système hydrauliquement neutre ce qui conduit à la réduction des mesures constructives aval.

La quantification économique de la réduction du risque résiduel aval nécessite de connaître, d'une part, le coût associé aux dégâts et, d'autre part, la fréquence d'occurrence de ces dégâts. Etant donné la nécessité d'établir un coût réaliste pour un débit et/ou un volume déversé, cette méthode demande de nombreuses données liées à l'occupation du sol et à sa topographie. Elle est donc difficile à mettre en oeuvre et reste, par ses données, liées à un site précis.

La méthode d'estimation des gains par la réduction des mesures constructives aval supprime cette difficulté. Elle ne nécessite aucune donnée topographique (ou très peu). Elle est également facilement transposable à d'autres sites.

Avec la disparité des échelles de temps considérées (événement de période de retour théorique jusqu'à 20'000 ans pour un aménagement dont la durée de vie est typiquement de 200 ans), il est difficile de calculer l'impact effectif de l'aménagement. Cet obstacle peut être surmonté par une analyse probabiliste basée sur une génération stochastique de scénarios (méthode de Monte Carlo).

Le principe de calcul est d'aboutir, pour le tronçon aval, à une équivalence hydraulique du risque de crue avec ou sans rétention. Ainsi, pour aboutir à la même probabilité de débordement, un ouvrage de rétention conduit à une réduction de la capacité aval, obtenue par un abaissement des digues. La différence de hauteur des digues constitue le gain lié à la rétention. Ce gain est calculé avec un prix unitaire lié au volume de digue.

Le calcul comprend les étapes suivantes :

1. Attribution d'une période de retour tirée de CONSECRU 2 pour chacune des 117 crues de la même étude (c.f. paragraphe 5.5.1).
2. Détermination d'une courbe de tarage de la rivière aval (c.f. paragraphe 5.5.2).
3. Détermination du débit cible. Ce débit est admis ici à 1'250 m³/s. Cette étude vise donc les digues et non les arrières-digues. En clair, l'économie proposée ne touche pas la sécurité du système.
4. Calcul des volumes débordés pour chacune des 117 crues de l'étude CONSECRU 2. Ce calcul est effectué consécutivement pour 5 situations, soit :
 - rivière sans aménagement
 - rivière avec un aménagement, modèle de laminage, gestion passive
 - rivière avec un aménagement, modèle de laminage, gestion active
 - rivière avec un aménagement, modèle de laminage, gestion active déconnectée
 - rivière avec un aménagement, modèle de laminage, gestion active déconnectée et avec organe de vidange.

Connaissant la période de retour de chacune des crues, ces résultats permettent de générer les 5 graphes " période de retour - volume déversé " relatifs aux 5 situations. Une fonction continue est construite par interpolation linéaire entre les 117 valeurs obtenues.

5. Génération stochastique d'un vecteur de $2 \cdot 10^6$ valeurs représentant autant d'années. Etant donné la distribution uniformément répartie dans l'intervalle]0; 1[du générateur de nombres pseudo-aléatoires, l'inverse de chaque valeur donne la valeur de la période de retour de la crue principale de l'année considérée. Cette méthode tend à sous-estimer les impacts liés aux crues. Elle ne considère que la plus grande crue annuelle et néglige les autres crues possibles et leurs dégâts. De ce fait, l'impact réel de l'aménagement est sous-estimé.
6. Sur la base des $2 \cdot 10^6$ années et des volumes débordés attribués à chaque période de retour, le volume annuel moyen déversé, pour chaque type de gestion, est calculé. Ce volume tient compte d'une probabilité d'échec lié au dysfonctionnement de l'aménagement. La loi de probabilité suit une fonction bi-linéaire basée sur la période de retour de la crue considérée. Il est admis un fonctionnement parfait jusqu'à une période de retour de 500 ans (probabilité de 1) puis une probabilité linéairement décroissante jusqu'à 0 pour une période de retour de 1'000 ans. Au-delà, la loi réduit l'aménagement à un impact nul. Le résultat de ce calcul fournit le volume annuel probable déversé pour chacune des 5 situations. Il faut relever que la loi probabiliste utilisée est plutôt pessimiste. En effet, les barrages en rivière sont dimensionnés pour permettre le passage d'une crue millénaire avec l'une des vanne fermée. Il est donc très probable que pour une telle crue, l'effet de la rétention soit pleinement réalisable.
7. Le volume annuel probable retenu est obtenu par le calcul de la différence entre chaque type de gestion et la situation sans aménagement.
8. Indépendamment pour chacun des 4 modes de gestion de l'aménagement, le niveau des digues aval est progressivement abaissé de sorte à aboutir à un volume annuel probable déversé équivalent à la situation sans aménagement.
9. Par modification itérative de la surface et de la hauteur de l'aménagement, une matrice " volume annuel probable retenu " et une matrice " abaissement potentiel des digues aval " est générée pour chaque mode de gestion.
10. La dernière étape consiste à attribuer un coût soit au volume d'eau retenu, soit au volume de digue aval économisé. Cette étape discutable quant aux valeurs choisies

arrive tout à la fin du processus de calcul. De ce fait, ces valeurs peuvent être modifiées sans nécessiter un calcul complet.

5.5.5 Application de la méthode de gestion des crues au cas d'étude

La méthode de gestion active déconnectée avec organe de vidange aval est appliquée au Rhône valaisan. Elle se base sur le catalogue de crues de l'étude CONSECRU 2 ainsi que sur la courbe de tarage proposée au paragraphe 5.5.2.

La figure 5.22 présente la réduction de hauteur de digue possible pour la gestion active déconnectée avec organe de vidange, en fonction de la surface et de la hauteur utile du réservoir. La spécificité de ce mode de gestion très actif fait disparaître l'importance relative de la hauteur vis-à-vis de la surface du réservoir au profit du volume qui devient le seul facteur explicatif. Ce comportement est illustré par les lignes d'équi-niveau qui correspondent à un volume identique.

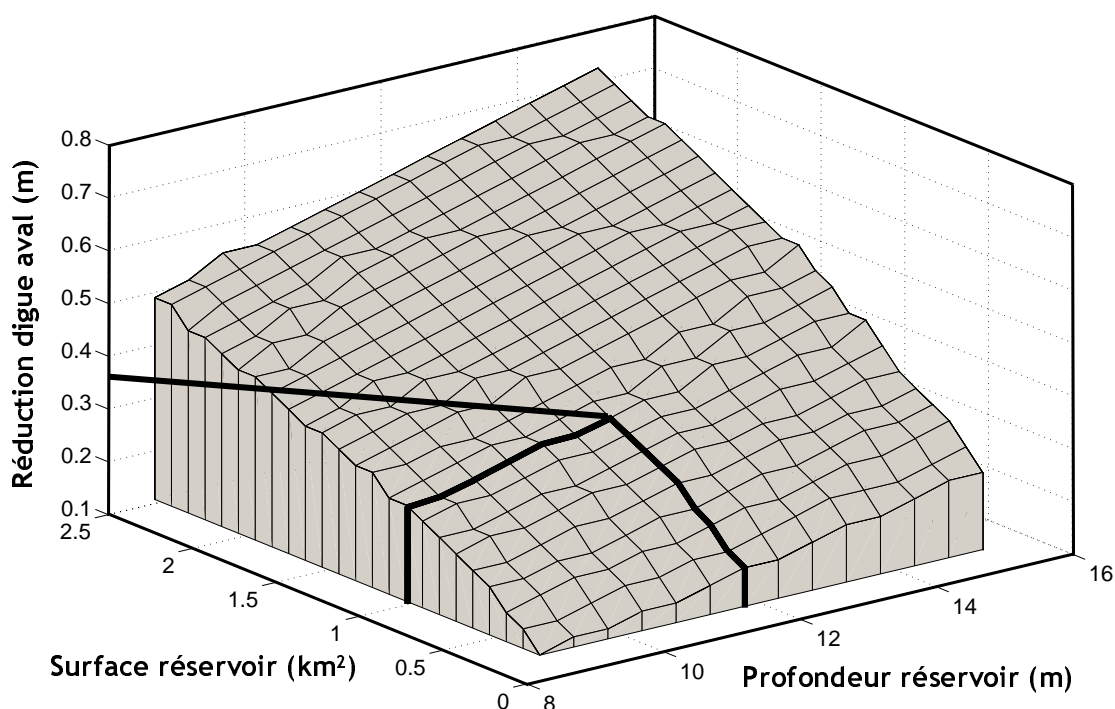


FIG. 5.22: Réduction possible de la hauteur des digues aval en fonction de la taille de l'aménagement et d'une gestion active déconnectée avec organe de vidange ; exemple avec l'aménagement standard

Pour le premier calcul économique (valeur attribuée au volume d'eau retenu), le m^3 d'eau prend une valeur comprise entre 5 et 10 CHF. Cette valeur est valable pour une inondation comprise entre les digues et les arrière-digues, soit sur du terrain agricole. Elle tient compte, d'une part, de la perte de la récolte en cours ainsi que des installations agricoles et, d'autre part, de la remise en état de la surface. Dans le cas d'une zone urbanisée (non-consideré ici), cette valeur est certainement plus élevée.

Pour le second calcul économique (valeur attribuée au volume de digue évité), les indices de la construction attribuent un coût moyen de 50 CHF/ m^3 . Cette valeur comprend la matière, le transport et la pose. La différence de volume est calculée sur la base de la figure 5.23.

La largeur sommitale est constante et vaut 4 m. La pente des digues varie entre 1 : 2 et 1 : 3.

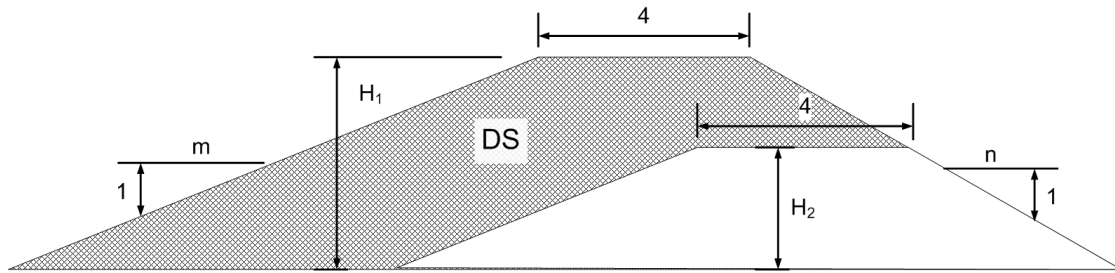


FIG. 5.23: Section de digue utilisée pour le calcul de la réduction du volume nécessaire (m)

Sur cette base, la différence de section de la digue est donnée par l'équation 5.16.

$$DS = (H_1 - H_2) \left(4 + H_1(m + n) - \frac{H_1 - H_2}{2}(m + n) \right) \quad (5.16)$$

Si l'on pose que $H_1 = 4m$ et que $(m + n) = 5$, ce qui correspond à des valeurs raisonnables pour le Rhône valaisan, la même expression se simplifie en l'équation 5.17.

$$DS = 24(H_1 - H_2) - 2.5(H_1 - H_2)^2 \quad (5.17)$$

Si l'on admet encore un tronçon aval protégé de 50 km, soit un total de 100 km de digue (deux rives) avec un coût volumique de 50.-/m³ de digue, l'expression devient :

$$\Delta C_{crue} = 120(H_1 - H_2) - 12.5(H_1 - H_2)^2 \quad (5.18)$$

où ΔC_{crue} est exprimé en 10⁶CHF et $(H_1 - H_2)$ est donné en unité métrique. L'application de cette formule à la figure 5.22 donne des réductions potentielles de coût comprises entre 12 et 80·10⁶CHF.

L'aménagement standard, avec un réservoir de 1 km² d'une profondeur de 8.68 m et une zone d'épanchement de 1 km² d'une profondeur de 3 m, possède un volume total d'environ 11.5·10⁶m³. Le calcul tient compte d'une tranche morte d'environ 2 m. Le volume utile en situation de crue est donc d'environ 9.5·10⁶m³. Ce volume, avec une gestion active déconnectée possédant un organe de vidange (c.f. figure 5.22), conduit à un abaissement des digues aval de 36 cm. Cet abaissement représente une économie possible d'environ 40·10⁶CHF avec l'équation 5.18.

5.6 Modèle de simulation hydraulique de l'aménagement

5.6.1 Modèle développé de simulation hydraulique du réservoir

Le modèle de simulation hydraulique du réservoir résout l'équation de bilan. Ce modèle simple est applicable moyennant la condition de courant. Avec un pas de temps horaire, cette condition est toujours respectée. Le modèle hydraulique est donc formulé par la seule équation 5.19.

$$V_{res}(t) = V_{res}(t - 1) + 3600(Q_{am}(t) - Q_{av}(t)) \quad (5.19)$$

Le niveau dans le réservoir est calculé par une relation "niveau-volume". Cette relation est calculée en considérant, d'une part, le réservoir lui-même et, d'autre part, le volume créé par la courbe de remous amont.

La partie relative au réservoir est calculée sur la base d'un rectangle qui constitue le fond du réservoir et de quatre berges, chacune modélisée par une fonction bi-linéaire propre. De la sorte, les berges peuvent présenter une rupture de pente et s'adapter à une configuration réaliste.

La partie relative à la courbe de remous est calculée à l'aide du logiciel *HEC-RAS* et du modèle complet du Rhône actuel. La courbe calculée fait référence au cas d'étude sur le Rhône valaisan dans la région située entre Saxon et Riddes (Valais central). Le volume lié à la courbe de remous est calculé avec un débit constant de 100 m³/s et ne considère pas la courbe de raccordement. Il tient compte seulement du tronçon où le niveau d'eau est horizontal selon le calcul. Dans le cas des calculs hydrauliques liés aux crues, la courbe de remous est négligée. Dans le cas d'un élargissement du lit mineur, ce volume peut être grandement augmenté.

La courbe présentée à la figure 5.24 est basée sur les valeurs actuelles du Rhône à Riddes avec un réservoir d'une surface de 1 km² (réservoir fictif carré de 1'000 m de côté). Les berges ont une pente de 1 : 3 jusqu'à un 1.5 m sous le niveau maximal puis de 1 : 2 jusqu'au fond.

La courbe s'incurve très légèrement jusqu'à la hauteur maximale de l'aménagement (8.68 m). Elle s'étend au-delà pour éviter tout problème de résolution numérique. L'extension (de 8.68 à 15 m) est générée sans considérer la courbe de remous amont et avec des berges verticales. L'allure globalement linéaire de la fonction est typique des réservoirs à faible profondeur.

5.6.2 Validation du modèle hydraulique

Le modèle hydraulique est comparé, pour les mêmes débits amont et aval ainsi que la même courbe volumétrique du réservoir, avec une simulation effectuée sur le logiciel *Routing System II* développé au Laboratoire de Constructions Hydraulique (Dubois, 2005).

Les résultats des débits sont absolument identiques. De très petites différences volumétriques apparaissent sur le bilan annuel qui sont liées à la discrétisation de la courbe volumétrique. La précision de discrétisation est de l'ordre du centimètre. Elle reste certainement inférieure aux oscillations naturelles du plan d'eau (vagues de surface).

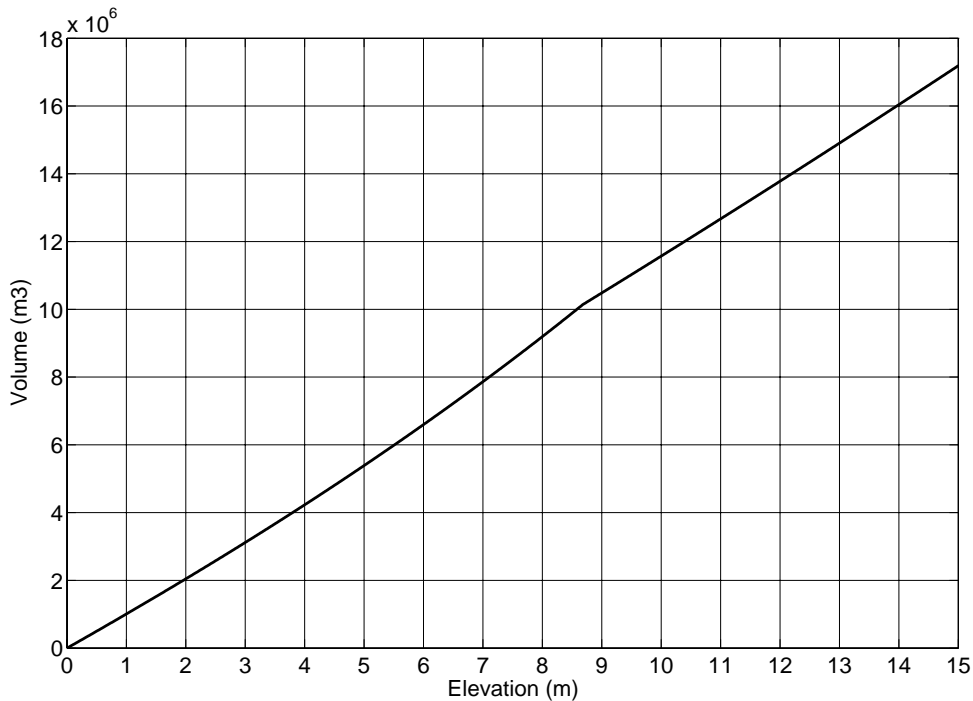


FIG. 5.24: Courbe volumétrique de l'aménagement

5.6.3 Variables internes d'entrée et sortie du modèle hydraulique

Le modèle hydraulique possède peu de variables d'entrée. Les principales sont :

- la longueur et largeur du fond du réservoir. Ces grandeurs sont données en unité métrique ;
- la hauteur utile maximale de l'aménagement ;
- les pentes des quatre berges du réservoir. Chaque berge est modélisée à l'aide de trois points dans une coupe verticale perpendiculaire à la rive ;
- la relation volumétrique de la courbe de remous amont. Cette variable est directement entrée sous forme de relation mathématique polynomiale.

Les données du modèle permettent de calculer la courbe volumétrique de l'aménagement. Son application au modèle de bilan génère la seule variable de sortie de ce modèle, soit la hauteur d'eau dans l'aménagement pour chaque pas de temps. Cette variable est matérialisée par un vecteur.

5.6.4 Application du modèle hydraulique au cas d'étude

Sur la base de l'aménagement standard de 1 km² de surface avec une hauteur utile de 8.68 m, les figures 5.11 et 5.12 présentent deux semaines types hivernale et estivale (6^{ème} et 33^{ème} semaine de l'année 1993). Les valeurs des variables de gestion sont celles du paragraphe 5.4.3.

La gestion hivernale écrête les pointes de débit liées à la production d'énergie. Elle anticipe l'accroissement du débit de sorte à vider préventivement le réservoir et aboutir ainsi au niveau maximal lorsque le débit amont diminue. Les oscillations journalières du réservoir

sont d'environ 60 cm. Le marnage hebdomadaire nécessite quant à lui un volume d'environ $3 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Ce volume correspond, pour la taille choisie, à un battement d'environ 3 m.

A cause du débit moyen plus élevé, la gestion estivale permet, pour une même oscillation aval du plan d'eau, une variation de débit plus importante. De la sorte, le débit aval de l'aménagement suit de très près le débit amont et le niveau du réservoir reste constant. La légère variation qui apparaît en fin de semaine est liée à la limitation sur l'amplitude. Le niveau du réservoir oscille de quelques dizaines de cm seulement.

L'agrégation des variations du réservoir sur l'ensemble de l'année de référence est présentée à la figure 5.25. Pendant la moitié du temps, le réservoir ne subit aucune variation horaire (ou inférieure à 1 cm). Pendant 80 % du temps, elles sont inférieures à 5 cm et 95 % du temps inférieures à 10 cm. Les variations horaires n'excèdent pas 20 cm. Cette courbe est légèrement meilleure que la courbe des oscillations actuelles du Rhône. La courbe de remous à l'amont du réservoir, qui suit les oscillations de ce dernier, possède ainsi un marnage également amélioré par rapport à l'état actuel.

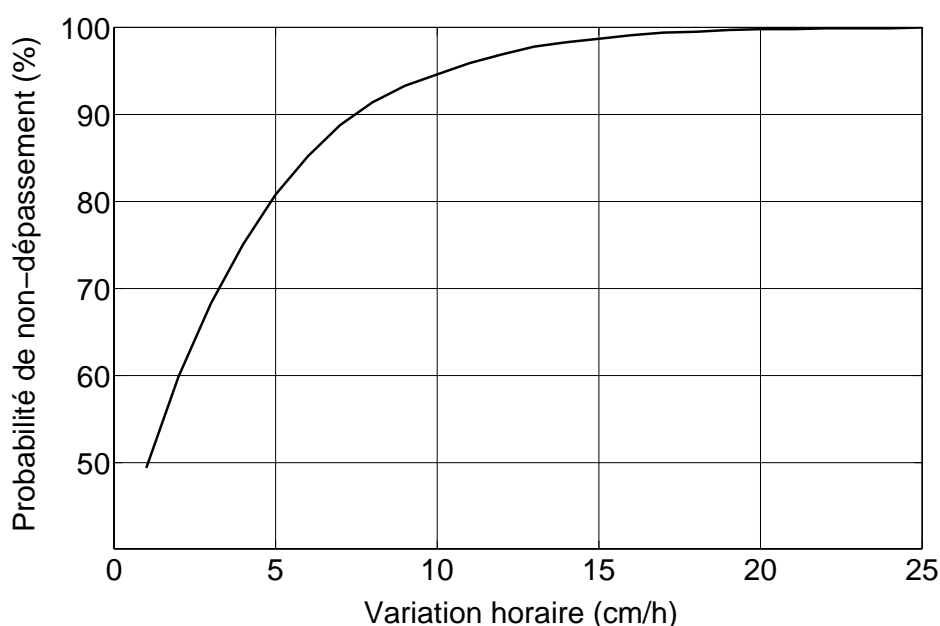


FIG. 5.25: Probabilité d'occurrence annuelle d'une vitesse de variation du niveau d'eau dans le réservoir

5.7 Modèle de simulation thermodynamique de l'aménagement

5.7.1 Objectifs des modèles thermodynamiques

Dans le cadre du projet d'aménagement à buts multiples et suite à l'analyse qualitative, trois motivations liées à la température du réservoir sont soulignées. Ce sont les aspects liés à l'écologie aquatique et ceux liés aux aspects sociaux.

Le fonctionnement écologique d'un milieu aquatique est fortement lié au régime thermique (air et eau). Il y a donc lieu d'étudier le régime du réservoir pour en connaître, d'une part, les effets sur l'écologie du réservoir lui-même et, d'autre part, son influence sur le régime aval.

La seconde motivation est liée à la formation de brouillard persistant qui peut être généré par la création d'un plan d'eau. L'augmentation du nombre d'événements annuels ainsi que de leur durée doit être quantifiée.

La troisième motivation est relative aux possibilités d'utilisation du réservoir pour des loisirs aquatiques. La connaissance de l'évolution de la température dans le réservoir permet de mieux en cerner les limites.

5.7.2 Brève revue littéraire sur les modèles thermiques

Il existe de nombreux modèles pour résoudre les équations physiques liées à la thermique des fluides. Les qualités offertes par les fluides génèrent une interaction entre les aspects uniquement thermiques et les mouvements des particules de ces derniers. De ce fait, la résolution thermique dans un milieu aqueux ne peut être déconnectée d'un modèle de simulation des particules du fluide.

Les modèles les plus précis sont basés sur des modèles tridimensionnels d'éléments ou de différences finis. Les logiciels *ANSYS-CFX* (De Cesare et al., 2006) ou *SSIM* (Olsen, 2005) considèrent la température du fluide comme une qualité de ce dernier et appliquent un schéma de résolution couplant température et circulation pour calculer le champ thermique du fluide. Ces modèles ont l'avantage d'être très précis mais nécessitent de fortes ressources informatiques. Ils sont indépendants de la topologie du problème et, si cette dernière se complique un peu, la résolution peut nécessiter plusieurs heures de calcul.

Dans le cas d'un champ thermique plan uniforme, la résolution peut être réduite à l'axe vertical. Le logiciel *DYRESM* (Antenucci and Imerito, 2000), abréviation de "Dynamic Reservoir Model", basé sur cette hypothèse, calcule la stratification thermique des réservoirs et les courants verticaux qui y sont associés. Ce mode de calcul est valable pour les lacs et les réservoirs de grande profondeur.

Si, au contraire, la stratification verticale est négligée, le modèle peut être réduit à un système bidimensionnel (plan horizontal) ou même uni-dimensionnel (abscisse curviligne pour un écoulement). Avec un modèle bidimensionnel, Dias and Lopes (2006) étudient la salinité et la température de la rivière *Ria de Aveiro Lagoon* (Portugal). Cette rivière possède la particularité d'un écoulement en tresse. Le modèle donne une erreur thermique moyenne d'environ 5 % par rapport aux mesures. Les logiciels unidimensionnels *Heat Source*

(Boyd and Kasper, 2004) et *SSTEMP* (Bartholow, 2002) permettent de calculer la température le long d'un cours d'eau. Chaque section perpendiculaire à l'écoulement possède une seule valeur de température. Yoshida et al. (2005) utilisent le logiciel *SSTEMP* pour simuler sur la rivière *Mekong* (Chine, Myanmar, Laos, Thaïlande, Cambodge et Viêt Nam) les modifications thermiques potentielles liées à la construction de grands réservoirs. Gooseff et al. (2005) développent un modèle similaire lié à un routage cinématique dans la rivière *Lower Madison* (Montana, USA) pour quantifier l'impact des changements climatiques sur la température de l'eau. Cox and Bolte (2007) couple un modèle thermique unidimensionnel avec un système d'information géoréférencé qui tient compte de la végétation et de l'orientation géographique pour calculer l'ombre portée sur le cours d'eau.

Enfin, dans le cas de réservoir peu profond et de taille modeste, le modèle thermique est réduit à une seule cellule (zéro dimension). Le modèle développé ci-dessous est largement inspiré de la publication de Gooseff et al. (2005) pour le calcul du flux surfacique (J_{tot}).

5.7.3 Modèles thermodynamiques développés

5.7.3.1 Modèle thermique

La température uniforme de l'eau (T_{res}) dans le réservoir est calculée en fonction de l'énergie thermique contenue selon l'équation 5.20 (Chapra, 1997) :

$$T_{res} = \frac{H}{\rho C V_{res}} \quad (5.20)$$

où H représente l'énergie thermique, ρ la masse volumique de l'eau, C la chaleur massique et V_{res} le volume du réservoir. Si la température du réservoir est connue à un instant donné (admise au temps $t=0$), l'évolution temporelle peut être calculée par la relation 5.21.

$$T_{res}(t) = T_{res}(t_0) + \frac{dT_{res}(t)}{dt} \quad (5.21)$$

La dérivée temporelle de l'énergie thermique est donnée, sur la base de l'équation 5.20, par l'équation 5.22.

$$\frac{dT_{res}}{dt} = \left(\frac{V_{res}}{\rho C} \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{H}{\rho C} \frac{\partial V_{res}}{\partial t} \right) \frac{1}{V_{res}^2} \quad (5.22)$$

Cette équation se simplifie et devient (équation 5.23) :

$$\frac{dT_{res}}{dt} = \frac{1}{\rho C V_{res}} \frac{\partial H}{\partial t} - \frac{T_{res}}{V_{res}} \frac{\partial V_{res}}{\partial t} \quad (5.23)$$

La dérivée partielle de l'énergie (premier terme de l'équation 5.23) s'écrit comme la somme du flux convectif et du flux surfacique. Le flux convectif dépend de l'énergie liée au débit entrant, Q_e à la température T_e , et de l'énergie liée au débit sortant, Q_s à la température T_{res} . Cette dérivée partielle vaut (équation 5.24) :

$$\frac{\partial H}{\partial t} = (\rho C) (Q_e T_e - Q_s T_{res}) + J_{tot} A_s \quad (5.24)$$

où J_{tot} représente le flux énergétique surfacique du volume considéré et A_s l'aire sur laquelle agit ce flux. J_{tot} dépend partiellement de la température T_{res} du volume de contrôle.

La variation du volume de contrôle (second terme de l'équation 5.23) s'exprime comme (équation 5.25) :

$$\frac{\partial V_{res}}{\partial t} = Q_e - Q_s \quad (5.25)$$

Avec les équations 5.24 et 5.25, l'équation 5.23 devient (équation 5.26) :

$$\frac{\partial T_{res}}{\partial t} = \frac{1}{V_{res}} \left(Q_e T_e + \frac{J_{tot} A_s}{\rho C} - Q_e T_{res} \right) \quad (5.26)$$

Cette équation différentielle est résolue par un schéma d'*Euler*. Dans le cas où la condition de courant n'est pas respectée, plutôt que de réduire le pas de temps, le schéma d'*Euler* est abandonné au profit du schéma de *Runge-Kutta*.

Le modèle de flux surfacique (J_{tot} en W/m^2) est constitué des 6 termes de l'équation 5.27 :

$$J_{tot} = J_{sol} + J_{an} + J_{sed} - (J_{br} + J_{cc} + J_e) \quad (5.27)$$

où J_{sol} est le flux surfacique lié à la radiation directe du soleil sur le volume de contrôle, J_{an} le flux surfacique lié à la radiation de l'atmosphère sur le volume de contrôle, J_{sed} le flux surfacique lié à l'impact du sol sur le volume de contrôle, J_{br} le flux surfacique lié à la radiation du volume de contrôle dans l'atmosphère, J_{cc} le flux surfacique lié à la convection et à la conduction du volume de contrôle dans l'atmosphère, J_e le flux surfacique lié à l'évaporation du volume de contrôle dans l'atmosphère.

1. La radiation du soleil (J_{sol}), aussi appelée radiation à ondes courtes, est une grandeur directement mesurée par les stations météorologiques. Elle entre ainsi dans le modèle directement comme une variable.
2. La radiation de l'atmosphère sur le volume de contrôle (J_{an}), aussi appelée radiation à ondes longues, est calculée par la loi de Stefan-Blotzmann. Elle s'exprime comme (équation 5.28) :

$$J_{an} = \sigma (T_{air} + 273)^4 (A + 0.031 \sqrt{P_{vap}})(1 - R_L) \quad (5.28)$$

où σ représente la constante de Stefan-Boltzmann, T_{air} la température de l'air, A le coefficient d'atténuation compris entre 0.5 et 0.7, P_{vap} la pression vapeur de l'air et R_L le coefficient de réflexion atmosphérique (valeur fixée à 0.03).

3. L'impact thermique du sol sur le volume de contrôle (J_{sed}) est calculé par l'équation 5.29 :

$$J_{sed} = \frac{k_{sed} \rho_{sed} C_{sed} (T_{sed} - T_s)}{z_{sed}} \quad (5.29)$$

où k_{sed} est le coefficient de diffusion des sédiments, ρ_{sed} la masse volumique des sédiments, C_{sed} la chaleur massique des sédiments, T_{sed} la température des sédiments et z_{sed} l'épaisseur des sédiments dans laquelle s'établit le gradient thermique (valeur fixée à 25 cm). Ce flux thermique étant multiplié par A_s dans l'équation 5.26, l'impact des rives est donc négligé. Cette approximation est valable pour des plans d'eau peu profonds et étendus. L'équation 5.29 peut être simplifiée avec l'équation 5.30 :

$$\lambda_{sed} = k_{sed} \rho_{sed} C_{sed} \quad (5.30)$$

où λ_{sed} est la conductivité thermique des sédiments. La conductivité thermique de l'eau vaut $0.585 W/m/K$. Burger et al. (1985) donnent pour des roches granitiques des valeurs raisonnables comprises entre 1.7 et $3.4 W/m/K$ et pour des roches calcaires des valeurs comprises entre 2.1 et $3.4 W/m/K$. Pour des sols secs, les valeurs sont comprises entre 0.3 et $0.5 W/m/K$.

Pour l'application de ce modèle et en l'absence de mesure directe, la conductivité thermique des sédiments est fixée à 1. Cette valeur est un compromis entre la valeur liée à l'eau (sol partiellement saturé), et celles liées aux sols secs et aux roches (dépôt alluvial).

La température des sédiments est calculée, selon Burger et al. (1985), comme la moyenne annuelle de la température de l'air avec une oscillation sinusoïdale annuelle de $\pm 2^\circ C$. L'oscillation est directement liée à la date de l'année civile.

4. La radiation du volume de contrôle dans l'atmosphère (J_{br}) est calculée par la loi de Stefan-Boltzmann. Elle vaut (équation 5.31) :

$$J_{br} = \varepsilon \sigma (T_{res} + 273)^4 \quad (5.31)$$

où ε est l'émissivité de l'eau. Cette valeur est fixée à 0.97.

5. Le flux surfacique lié à la conduction et la convection du volume de contrôle dans l'atmosphère est calculé par une relation empirique (Thomman and Mueller, 1987; Kim and Chapra, 1997) qui tient compte de l'effet du vent.

$$J_{cc} = c_1 (19 + 0.95 u_v^2) (T_{res} - T_{air}) \quad (5.32)$$

où c_1 est le coefficient de Bowen (0.47) et u_v la vitesse du vent. La formule $(19 + 0.95 u_v^2)$ est une relation dimensionnelle empirique développée par Brady et al. (1969) donnée en unité impériale ($cal cm^{-2} day^{-1} mmHg^{-1}$). Lorsqu'elle est exprimée en unité SI, il faut multiplier le coefficient de Bowen c_1 par $(4.185/8.64)$.

6. Le flux surfacique lié à l'évaporation du plan d'eau (J_e) suit la loi de Dalton. Cette loi admet que le taux d'évaporation est proportionnel à la différence entre la pression vapeur de l'air (P_{vap}) et la pression vapeur saturante (P_{sat}). L'équation 5.33 combine la loi de Dalton avec la relation développée par Brady et al. (1969).

$$J_e = (19 + 0.95 u_v^2)(P_{sat} - P_{vap}) \quad (5.33)$$

Cette équation est dépendante des unités. Exprimée en unité SI (pression en mbar) et avec l'humidité relative (φ_{air} en %), elle devient (équation 5.34) :

$$J_e = \frac{4.185}{8.64} (19 + 0.95 u_v^2) \frac{P_{vap}}{1.333} \left(\frac{1000}{\varphi_{air}} - 1 \right) \quad (5.34)$$

La température résiduelle de l'eau dans le réservoir (T_{res}) est calculée par l'équation 5.21 dont la résolution nécessite les équations 5.22 à 5.34. Cette température est également, par définition, celle de l'eau qui sort du réservoir.

La température de la rivière aval (T_{av}) admet un mélange parfait. Elle est calculée par l'équation 5.35 :

$$T_{av} = \frac{T_e (Q_{am} - Q_{perm}) + T_{res} Q_s}{Q_{av}} \quad (5.35)$$

où Q_{perm} , selon la définition de l'aménagement (c.f. paragraphe 1.5.2), représente le débit qui transite en permanence dans le réservoir de l'amont vers l'aval. Il est soutiré à la rivière amont par une digue perméable. L'équation 5.35 peut être réécrite comme (équation 5.36) :

$$T_{av} = \frac{(T_e - T_{res}) (Q_{am} - Q_{perm})}{Q_{av}} + T_{res} \quad (5.36)$$

Si la totalité du débit aval provient du débit amont (le réservoir est en phase de remplissage), l'équation 5.36 n'est plus valable et elle est remplacée par l'équation 5.37.

$$T_{av} = T_e \quad (5.37)$$

5.7.3.2 Modèle de condensation

Le modèle de formation de brouillard au-dessus du réservoir est lié aux résultats du modèle thermique. Il reprend notamment le flux surfacique lié à l'évaporation du plan d'eau (J_e). Le développement qui suit, un peu fastidieux, est pourtant simplement basé sur un modèle de bilan. Il est peut-être judicieux de commencer par le rappel quelques définitions de la thermodynamique de base.

1. Soit r le rapport de mélange d'un volume d'air, défini par l'équation 5.38 :

$$r = \frac{M_{eau}}{M_{air,sec}} \quad (5.38)$$

où M_{eau} représente la masse d'eau contenue dans le volume d'air et $M_{air,sec}$ la masse d'air sec de ce même volume.

2. Il faut rappeler que la masse d'air sec, $M_{air,sec}$, n'est pas une constante mais qu'elle dépend de la température de l'air. Sur la base de mesures effectuées avec un taux d'humidité supposé nul (inférieur à 1%), elle est approchée par la relation donnée à l'équation 5.39.

$$M_{air,sec} = 10^{-5} T_{air}^2 - 0.0047 T_{air} + 1.2923 \quad (5.39)$$

3. Le même ratio, r , peut être également exprimé en fonction de la pression vapeur de l'air. Il vaut alors (équation 5.40) :

$$r = \frac{M_{mol,vap}}{M_{mol,air}} \frac{P_{vap}}{P - P_{vap}} \quad (5.40)$$

où $M_{mol,vap}$ est la masse molaire de l'eau, $M_{mol,air}$ la masse molaire moyenne de l'air (à ne pas confondre avec $M_{air,sec}$ qui est la masse de l'air sec), P_{vap} la pression vapeur dans l'air et P la pression atmosphérique ou pression totale.

On se souvient que la formule atomique de l'eau s'écrit H_2O et donc qu'une molécule d'eau a une masse atomique de 18 Dalton! Par définition du Dalton, l'eau a donc une masse molaire de 18 g (c'est-à-dire qu'une mole d'eau, soit $6.023 \cdot 10^{23}$ molécules, pèse 18 g). La masse molaire moyenne de l'air est plus difficile à calculer puisqu'il faut tenir compte de sa composition qui, par ailleurs, est légèrement variable. Mesurée, elle vaut, en moyenne, 28.97 g.

L'équation 5.40 est ainsi réécrite (équation 5.41) :

$$r = 0.6213 \frac{P_{vap}}{P - P_{vap}} \quad (5.41)$$

4. Le ratio identique, dans la condition où la pression vapeur est saturante ($P_{vap} \rightarrow P_{sat}$), est dépendant de la température de l'air et s'écrit (équation 5.42) :

$$r_{sat}(T_{air}) = 0.6213 \frac{P_{sat}(T_{air})}{P - P_{sat}(T_{air})} \quad (5.42)$$

5. La pression vapeur saturante (P_{sat}) en fonction de la température de l'air, peut être calculée par la formule de Clapeyron, soit (équation 5.43) :

$$\ln\left(\frac{P_{sat}(T_{air})}{P_0}\right) = \frac{M_{vap} L_v}{R} \left(\frac{1}{T_0 + 273} - \frac{1}{T_{air} + 273} \right) \quad (5.43)$$

où P_0 est la pression vapeur de référence, L_v la chaleur latente de l'eau ($2.26 \cdot 10^6$ J/kg), R la constante des gaz parfaits (8.31447 J/K/mol) et T_0 la température d'ébullition de la pression vapeur de référence. Cette équation est basée sur l'hypothèse des gaz parfaits (L_v est indépendante de la température).

6. La formule de Clapeyron peut être approchée avec une bonne précision par la formule simplifiée de Rankine (équation 5.44).

$$\ln(P_{sat}(T_{air})) = 13.7 - \frac{5120}{T_{air} + 273} \quad (5.44)$$

Cette formule génère un écart compris entre 0.39% et 4.1% pour des températures comprises entre 5 et 140°C. Cette équation dimensionnelle donne la pression en atmosphère.

7. Le lien entre la pression vapeur (P_{vap}) et la pression vapeur saturante (P_{sat}) est donné par la définition de l'humidité relative (équation 5.45) :

$$\varphi_{air} = \frac{P_{vap}}{P_{sat}(T_{air})} \quad (5.45)$$

8. Enfin, à partir du flux surfacique d'évaporation et compte tenu des unités utilisées, la quantité d'eau évaporée au-dessus du plan d'eau est exprimée par l'équation 5.46.

$$M_{evap} = 3.6 J_e A_s \frac{1}{L_v} \quad (5.46)$$

Ces points étant clarifiés, la procédure de calcul relatif à la formation du brouillard au-dessus d'un plan d'eau est la suivante :

1. – Avec la mesure de la température de l'air (T_{air}), la pression vapeur saturante (P_{sat}) est calculée par la formule de Rankine (équation 5.44).
 - Avec la mesure de la pression atmosphérique (P) et la pression vapeur saturante calculée (P_{sat}), le rapport de mélange saturant (r_{sat}) est calculé par l'équation 5.42.
 - Avec la température de l'air (T_{air}), la masse de l'air sec ($M_{air,sec}$) est calculée par l'équation 5.39.
 - Enfin, avec la masse d'air sec ($M_{air,sec}$) et le rapport de mélange saturant (r_{sat}), la masse d'eau saturante ($M_{eau,sat}$) est calculée par l'équation 5.38. La masse d'eau saturante représente la capacité maximale d'eau contenue dans un volume donné. Elle est exprimée en g/m³.
2. – Avec la mesure de l'humidité relative (φ_{air}) et la pression vapeur saturante calculée (P_{sat}), la pression vapeur (P_{vap}) est calculée par l'équation 5.45.
 - Avec la mesure de la pression atmosphérique (P) et la pression vapeur calculée (P_{vap}), le rapport de mélange (r) est calculé par l'équation 5.41.
 - Enfin, de manière analogue à la masse d'eau saturante, avec la masse d'air sec ($M_{air,sec}$) et le rapport de mélange (r), la masse d'eau (M_{eau}) est calculée par l'équation 5.38. Cette masse représente l'eau effectivement contenue dans le volume donné. Elle est exprimée en g/m³.
3. – Sur la base du modèle thermique (qui fournit J_e et A_s), la quantité d'eau évaporée (M_{evap}) est calculée par l'équation 5.46.
 - Cette quantité d'eau est répartie dans le volume d'air au-dessus du plan d'eau. Ce volume (V_{evap}) est calculé en fonction des dimensions du plan d'eau (A_s) avec un périmètre supplémentaire de 50 m de large et en tenant compte du vent. La hauteur du volume est un paramètre fixe du modèle établi de manière sécuritaire à 25 m.
 - Compte tenu des unités, la masse d'eau additionnelle (ΔM_{eau}) est calculée par (équation 5.47) :

$$\Delta M_{eau} = 10^6 \frac{M_{evap}}{V_{evap}} \quad (5.47)$$

4. Finalement, la condition de formation de brouillard répond à l'équation de bilan suivante (équation 5.48) :

$$M_{eau} + \Delta M_{eau} < F_s * M_{eau,sat} \quad (5.48)$$

où F_s représente un facteur de sécurité. Sa valeur est admise à 0.95. Il y a donc formation de brouillard si la pression vapeur dépasse 95 % de la pression vapeur saturante.

Ce modèle n'influence pas le flux d'évaporation. Il est donc possible de générer un flux lié à l'évaporation alors que l'air est déjà théoriquement saturé. Ceci constitue une impossibilité au sens de la loi de Dalton. Toutefois, cette infraction place le modèle du côté de la sécurité.

5.7.4 Variables internes d'entrée et sortie des modèles thermodynamiques

Les variables d'entrée du modèle thermique sont :

- la surface du réservoir ;
- le débit sortant (ou entrant) du réservoir. Ce débit est une conséquence de la gestion de l'aménagement ;
- le volume d'eau contenu dans le réservoir. Ce volume est une conséquence du volume total du réservoir ainsi que de la gestion de l'aménagement ;
- le débit de la digue perméable. Cette variable représente le seul levier de gestion capable, l'aménagement étant construit, d'influencer la température du réservoir.

La température horaire du réservoir et de la rivière aval constituent les deux seules variables de sortie du modèle thermique. Elles sont matérialisées par deux vecteurs.

Le modèle de condensation ne contient pas directement de variable interne d'entrée. Il dépend du modèle thermique par le flux d'évaporation et par conséquent dépend des mêmes variables que ce dernier.

Le taux de saturation de l'air constitue la seule variable de sortie du modèle. Le nombre d'événements annuels ainsi que leur durée est une représentation agrégée de ce même résultat.

5.7.5 Validation du modèle thermique : Systèmes lenticques et lotiques

Le modèle de calcul de la température de l'eau est calibré et validé à l'aide de deux systèmes lenticques et un système lotique. Les deux systèmes lenticques sont constitués par deux étangs du canton de Genève (Suisse) et le système lotique par le Rhône genevois et une partie de l'Arve genevoise.

Les températures de calibration sont issues, pour les deux étangs, du travail de thèse de Auderset-Joye (1993). La période des mesures s'étend du 19 septembre 1988 à la fin de l'année 1989. Il s'agit de températures prélevées une fois chaque deux semaines en milieu de journée. Les températures sont mesurées à différentes profondeurs puis agrégées dans une moyenne pondérée.

Pour le Rhône genevois, les températures et les débits sont issus des stations de mesure cantonales (Services industriels genevois) ou fédérales (OFEV). La période s'étend du 12 juin 2003 à la fin de la même année. Il s'agit de mesures continues.

Dans les trois cas, les variables météorologiques sont mesurées à l'aéroport international de Cointrin à Genève (Suisse). La figure 5.26 situe géographiquement le tronçon du Rhône étudié, les deux étangs de Choulex et Pougny ainsi que l'aéroport.

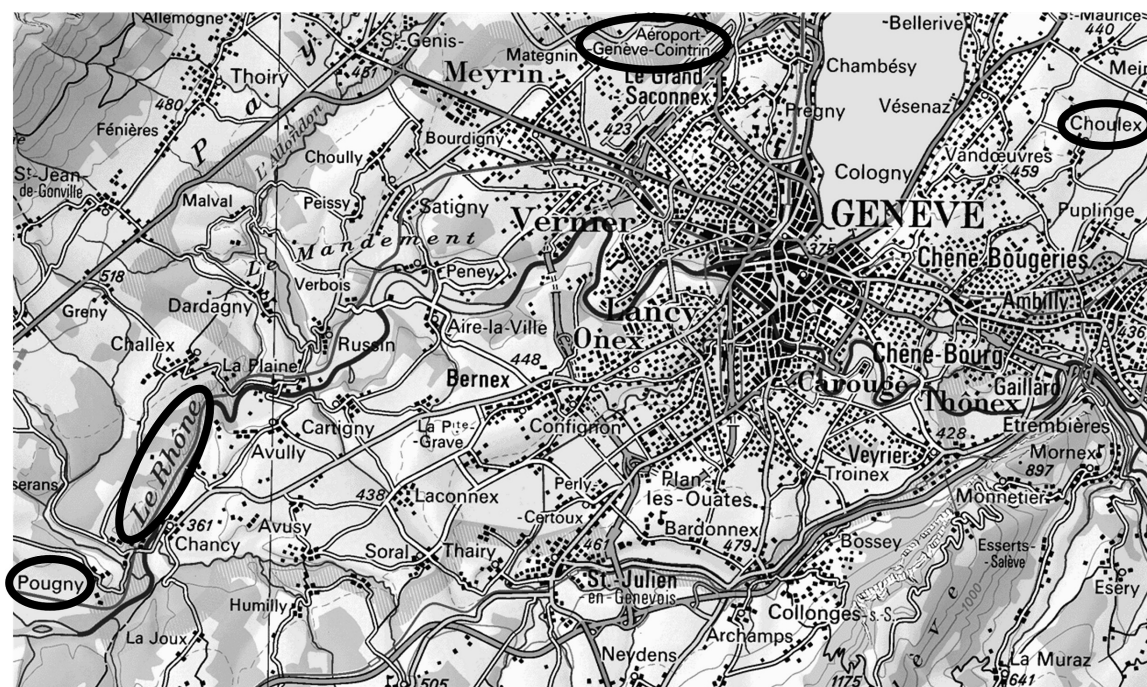


FIG. 5.26: Situation géographique des étangs, du Rhône et de l'aéroport de Genève

Le premier étang est situé sur la rive gauche du Rhône à Choulex dans la campagne genevoise à environ 10 km de l'aéroport. Il s'agit d'un étang de dimensions modestes (50 x 25 m) avec une profondeur très faible (environ 1 m). Sa faible inertie thermique le rend sujet à de fortes variations et très dépendant des conditions météorologiques. La figure 5.27 montre la simulation effectuée sur 16 mois consécutifs. La tendance annuelle est très bien respectée. Manifestement, les mesures ponctuelles ne permettent pas de mettre en évidence les variations journalières.

La figure 5.28 illustre les mêmes résultats et présente uniquement les températures simulées correspondant aux heures de celles observées (valeur admise de la mesure : 12h00). La différence (Delta) en valeur absolue est également représentée. Elle reste normalement inférieure à 2°C excepté pour un événement mal simulé (avril 1989). Cette différence vient probablement d'un événement météorologique différent par rapport à celui mesuré à l'aéroport.

Le tableau 5.10 résume la performance du modèle pour cet étang à l'aide de 5 indicateurs. La différence moyenne, en valeur absolue, s'élève à 1.10°C ce qui représente, en moyenne, 13.6% de la température. Avec des valeurs proches de l'unité, le Nash ainsi que l'indice de corrélation R^2 montrent une bonne performance. Le peu d'inertie thermique rend par ailleurs les fluctuations journalières importantes et l'heure de mesure importante. Or celle-ci n'est pas connue avec précision.

TAB. 5.10: Performance de l'étang de Choulex à Genève

$\Delta^\circ C$	Δ	RMSE	Nash	R^2
1.10	13.6%	0.49	0.950	0.976

Le second étang est situé à Chancy-Pougny, très proche du Rhône, en rive droite, à sa sortie du territoire suisse. Il est situé à environ 16 km de l'aéroport. De dimension plus importante

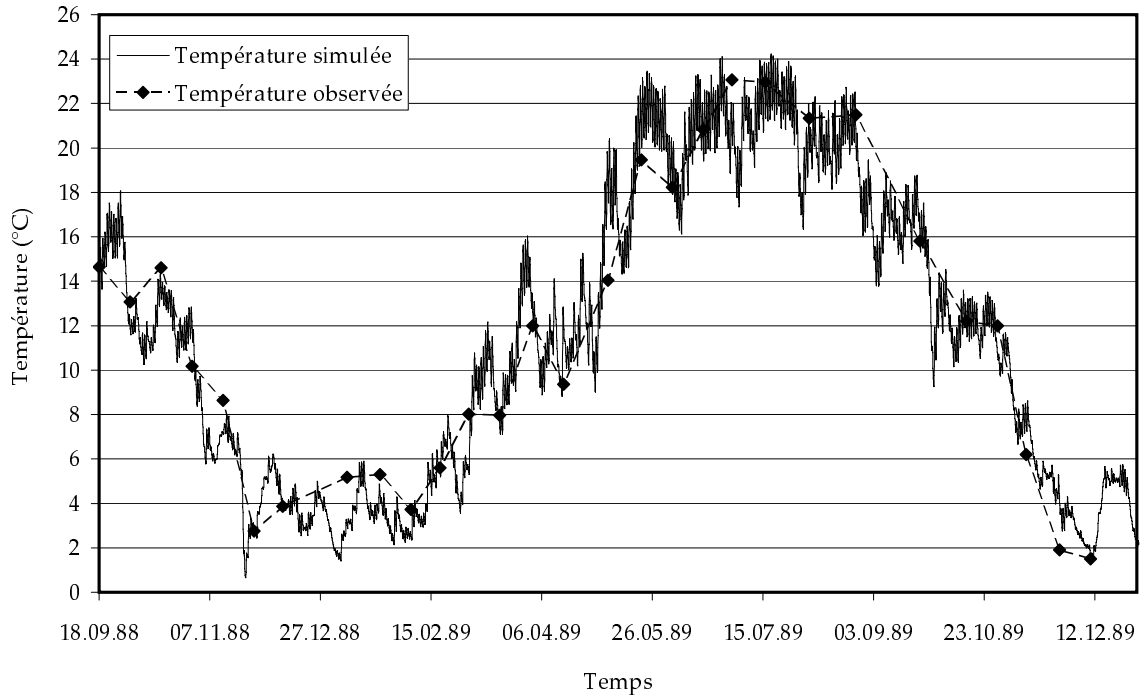


FIG. 5.27: Températures simulées et observées de l'étang de Choulex à Genève de septembre 1988 à décembre 1989

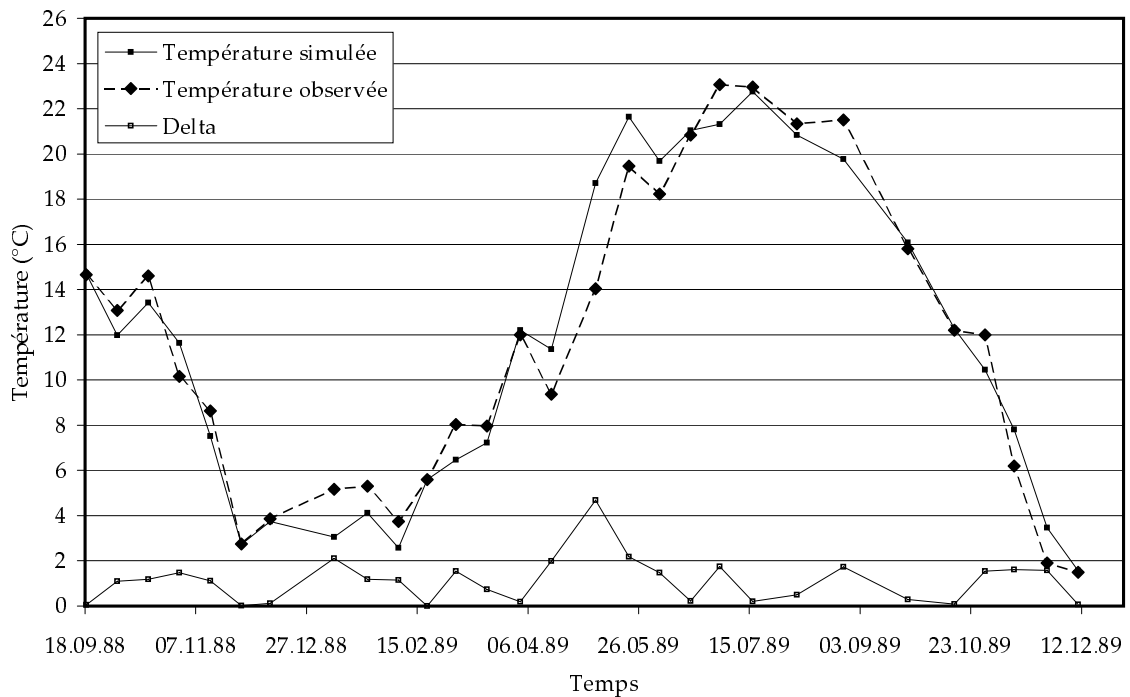


FIG. 5.28: Températures simulées et observées et différences absolues de l'étang de Choulex à Genève uniquement aux dates de mesures de septembre 1988 à décembre 1989

que le premier étang (200 x 100 m) avec une profondeur d'environ 8 m, il a un volume 130 fois supérieur. Sa plus grande inertie thermique rend ses variations plus lentes et plus faciles à simuler. La figure 5.29 illustre la température simulée sur les 16 mois consécutifs. Seules les valeurs correspondant aux mesures sont représentées. La différence absolue (Delta) entre la simulation et la mesure reste inférieure à 2°C . Un événement, similaire au premier étang et pour la même période (refroidissement en avril 1989), est mal simulé. Erreur sur l'instrument ou sur la méthode de mesure de température ? Phénomène météorologique propre à la région de l'aéroport (ensoleillement) ? Fort vent au-dessus des étangs qui augmente l'évaporation ? Erreur sur la mesure des variables météorologiques ? Phénomène thermique non simulé par la méthode ? Importantes précipitations froides ? Les causes de cette différence peuvent être nombreuses et il est difficile de les expliquer.

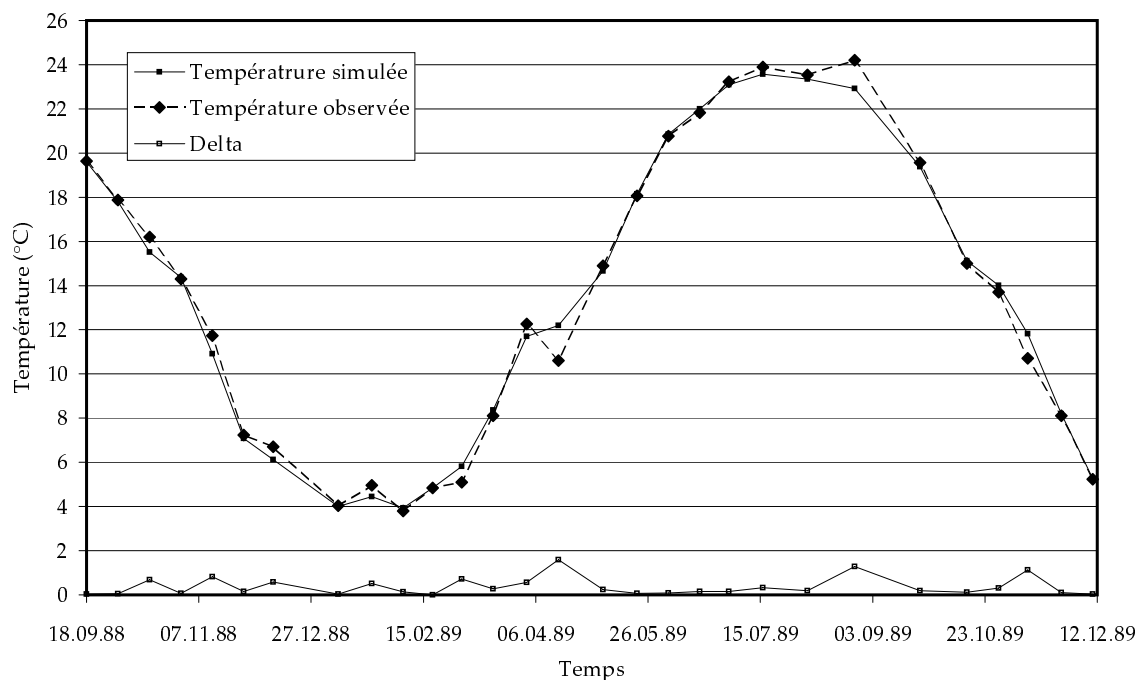


FIG. 5.29: Températures simulées et observées et différences absolues de l'étang de Pougny à Genève uniquement aux dates de mesures de septembre 1988 à décembre 1989

Le tableau 5.11 agrège les résultats à l'aide des 5 mêmes indicateurs. L'inertie joue un rôle important sur la qualité des résultats. La différence moyenne de température, en valeur absolue, est inférieure à 0.5°C , ce qui correspond à une erreur moyenne inférieure à 4%. La différence maximale vaut 1.6°C . Le Nash et l'indice de corrélation sont très proches de l'unité ce qui montre l'excellence de la simulation.

TAB. 5.11: Performance de l'étang de Pougny à Genève

$\Delta^{\circ}\text{C}$	Δ	RMSE	Nash	R^2
0.37	3.5 %	0.164	0.993	0.997

Le même modèle est encore appliqué au Rhône genevois (exutoire du lac Léman jusqu'à sa sortie de Suisse). A la différence des étangs qui sont considérés comme des systèmes parfaitement lenticules (vitesse de l'eau nulle), le Rhône possède un fort débit. Pour respecter la condition de courant, le schéma de résolution par *Runge-Kutta* est nécessaire. Le pas de temps horaire est également divisé par deux. Le débit et la température du Rhône à sa sortie

du lac Léman sont mesurés en continu. Il en va de même pour l'Arve qui est son affluent principal (environ le quart du débit). Le Rhône possède 4 autres affluents (Drize, Aire, Nant d'Avril et Allendon). Les trois premiers ont des débits de l'ordre de la centaine de l/s et le dernier du m³/s. Seule la température des deux premiers est mesurée en continu. Celles des deux autres sont reconstituées sur la base de mesures ponctuelles.

Le Rhône est divisé en 7 tronçons. Chaque tronçon correspond à une cellule thermique. Ce découpage correspond aux entrées des affluents ainsi qu'aux points de mesures de débits intermédiaires. La surface du plan d'eau est admise constante et mesurée à l'aide d'un SIG au 1 : 25'000. La profondeur moyenne est calculée sur la base des relevés des profils en travers. Le système possède ainsi un linéaire de 23 km pour un volume de 17.3·10⁶ m³.

La figure 5.30 illustre les résultats obtenus pour une période de 6 mois (mi-juin à décembre 2003). On constate la forte influence du débit issu du lac. Toutefois, la figure 5.31 montre la bonne corrélation entre la courbe simulée et celle observée.

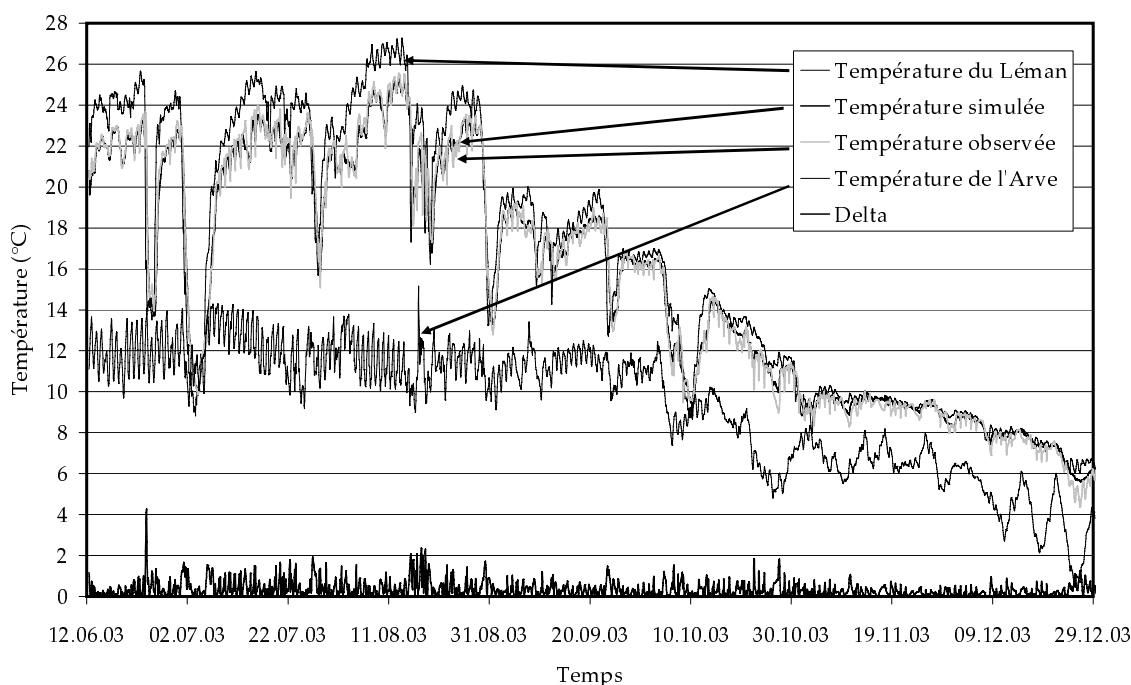


FIG. 5.30: Températures simulées et observées dans le Rhône genevois de juin à décembre 2003

Le tableau 5.12 agrège les résultats à l'aide des 5 indicateurs. Afin de distinguer l'influence du modèle thermique de la forte corrélation naturelle du système, la différence des moyennes des températures est rajoutée comme indicateur. Le calcul effectué sans le modèle thermique (températures entrantes pondérées par leurs débits) donne une différence annuelle moyenne négative de 0.34 °C. Elle correspond à l'énergie thermique apportée au Rhône par l'environnement sur son tronçon étudié. Le même calcul, mais avec le modèle thermique, réduit cette différence d'un facteur 45 environ (0.007 °C). Cette valeur n'est pas comparable avec le tableau 5.12 (0.29 °C). Celui-ci indique une variation en valeur absolue alors que la différence thermique (0.007 °C) indique une différence énergétique moyenne entre la mesure et le calcul.

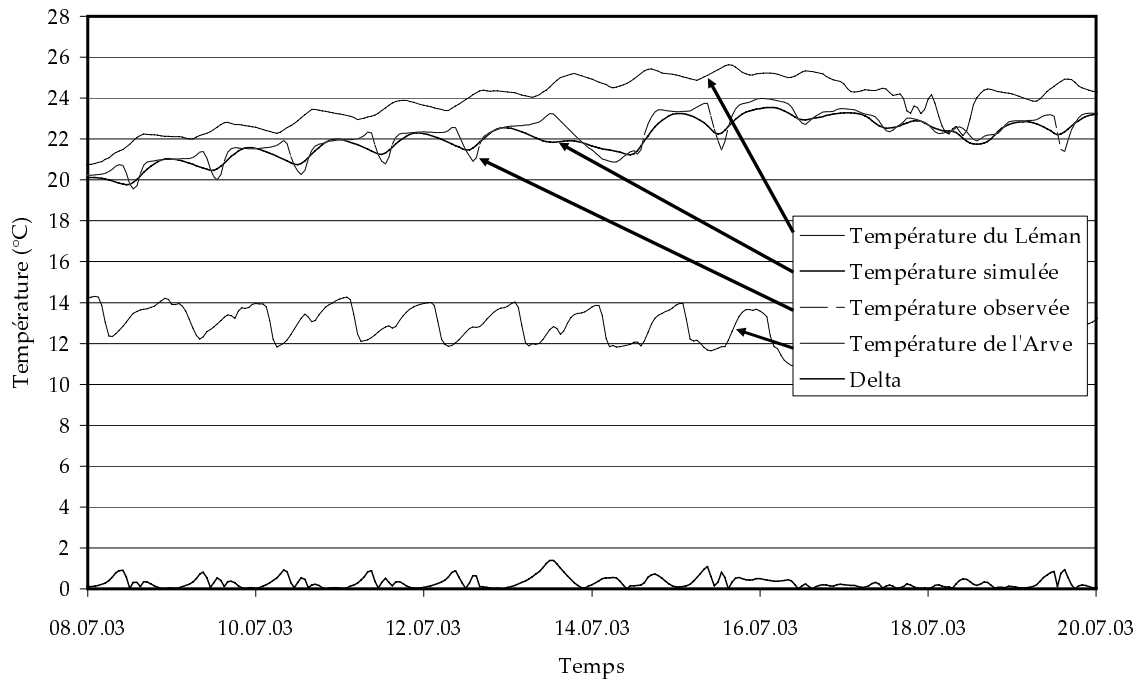


FIG. 5.31: Températures simulées et observées dans le Rhône genevois, agrandissement sur la seconde semaine d'août 2003

TAB. 5.12: Performance du Rhône genevois

$\Delta^{\circ}C$	Δ	RMSE	Nash	R^2
0.29	2.7%	0.108	0.996	0.998

5.7.6 Application du modèle thermique au cas d'étude

L'application du modèle thermique à l'aménagement à buts multiples permet, d'une part, d'estimer la température de la retenue et, d'autre part, de cerner l'impact sur le régime thermique aval.

Sur la base du réservoir standard de 1 km², d'une hauteur utile de 8.68 m, d'un débit à la digue perméable de 5 m³/s et avec les données hydrologiques et météorologiques de 1993, la température simulée est représentée à la figure 5.32. La température du réservoir est comprise en été entre 16 et 18 °C. L'impact sur la rivière aval reste faible et les deux courbes, températures amont et aval, sont superposées.

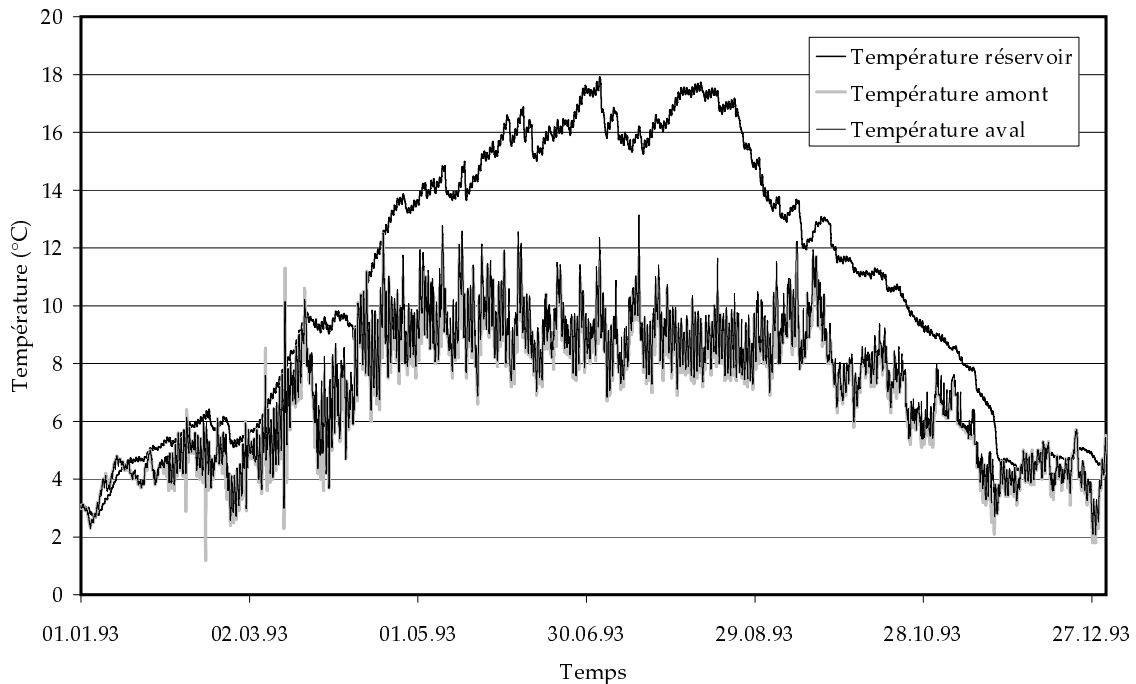


FIG. 5.32: Températures simulées dans le réservoir avec l'année 1993

La figure 5.33 donne, pour la même année, la différence entre les températures amont et aval. On observe globalement un réchauffement, notamment en été, de la température aval. Cette différence s'élève en moyenne sur l'année à 0.21 °C. Elle est quasiment nulle pour les mois d'hiver (0.02 °C pour le mois de janvier) et monte à 0.24 °C en été (mois de juin). Compte tenu des variations naturelles du Rhône (4 °C en hiver et 9-10 °C en été) ces variations sont peu significatives.

5.7.7 Analyse de sensibilité du modèle thermique

La variation du débit de la digue perméable permet de régler la température dans le réservoir sans modifier la gestion du débit aval. Plus le débit de la digue est élevé, plus la température dans le réservoir s'approche de celle du Rhône. Toutefois, c'est également la solution qui maximise l'élévation de la température aval. Au contraire, un petit débit de transit permet de réduire l'influence sur l'aval et de conserver l'énergie dans le réservoir.

La figure 5.34 illustre pour des débits de digue perméable compris entre la valeur nulle et 10 m³/s les différentes températures obtenues dans le réservoir.

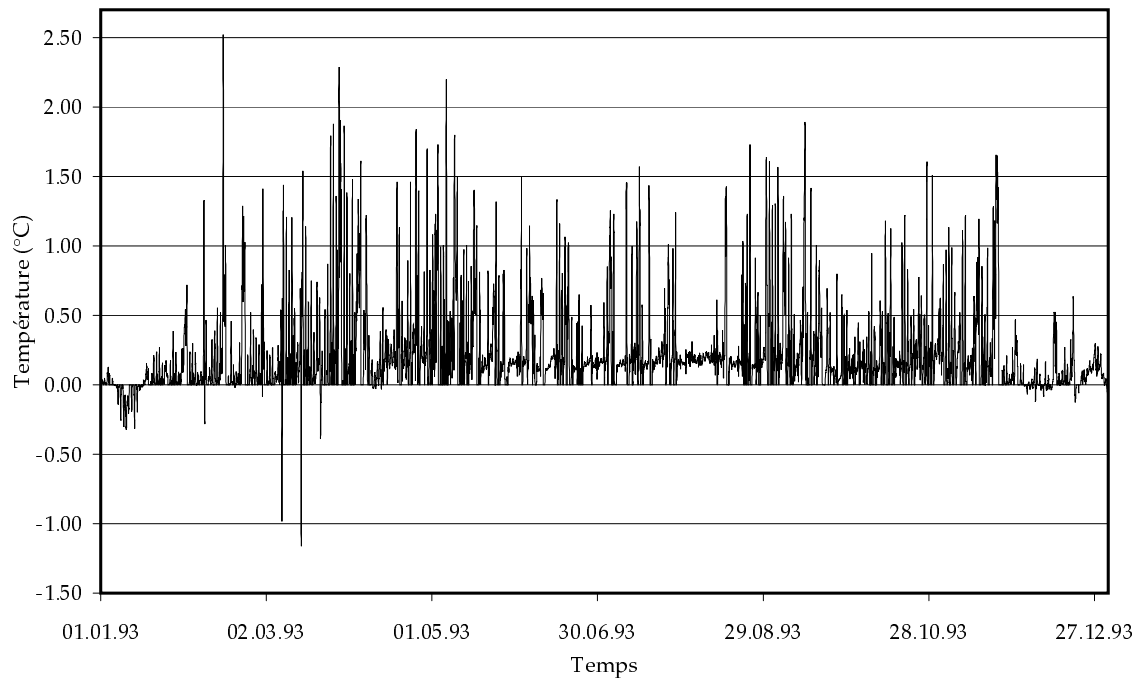


FIG. 5.33: Différences de température dans le Rhône aval pour l'année 1993

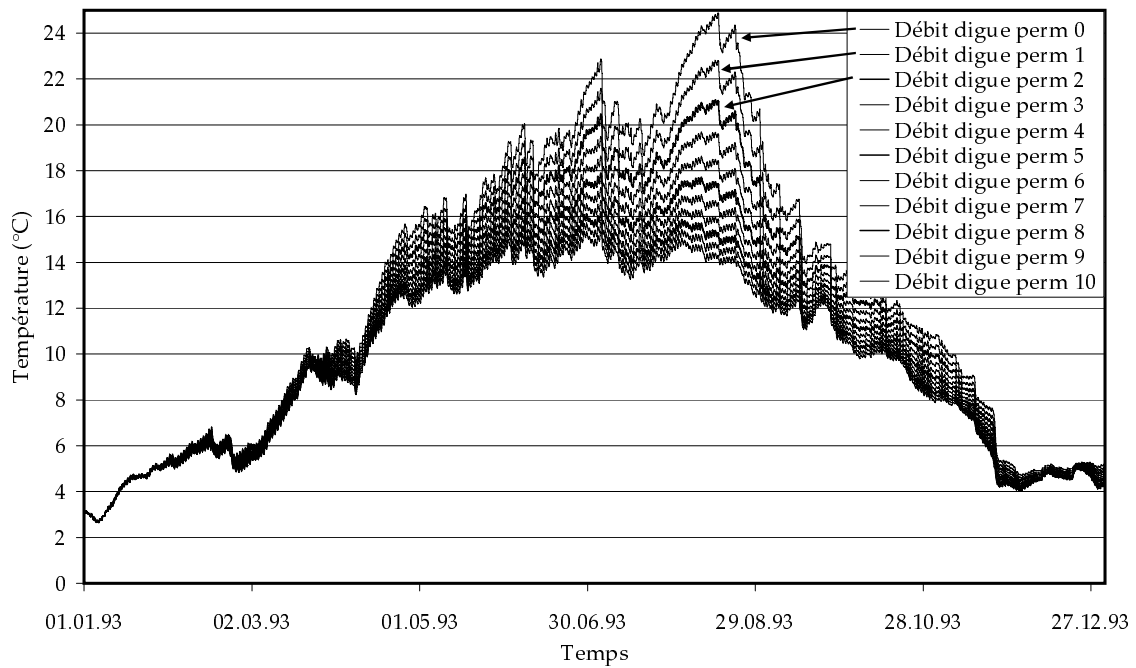


FIG. 5.34: Différences de température dans le réservoir selon le débit de la digue perméable pour l'année 1993

Les différences pendant les saisons d'automne, d'hiver et de printemps sont peu marquées. Pendant l'été, la différence maximale peut être de 10°C au maximum et de 6°C en moyenne. Le débit de la digue perméable permet de régler la température du réservoir en été sur une plage comprise entre 15 et 21°C . Cette petite variation permet cependant des réponses très différentes tant sur le plan écologique que sur le plan de l'utilisation sociale.

Il convient cependant de relever que ces calculs sont le fruit d'un modèle à cellule unique. Dès lors, la température est uniforme dans tout le réservoir. Il est probable, d'une part, qu'une légère stratification s'installe sur la profondeur du réservoir et que, d'autre part, les zones peu profondes et peu influencées par les mouvements d'eau liés à la régulation aient une température supérieure à celle calculée. Un degré de précision aussi détaillé n'est toutefois pas l'objet spécifique de ce travail.

5.7.8 Application du modèle de condensation au cas d'étude

L'application du modèle de condensation pour l'année 1993 à aménagement standard de 1 km^2 , une hauteur utile de 8.68 m et un débit à la digue perméable de $5\text{ m}^3/\text{s}$ génère la courbe hygrométrique présentée à la figure 5.35.

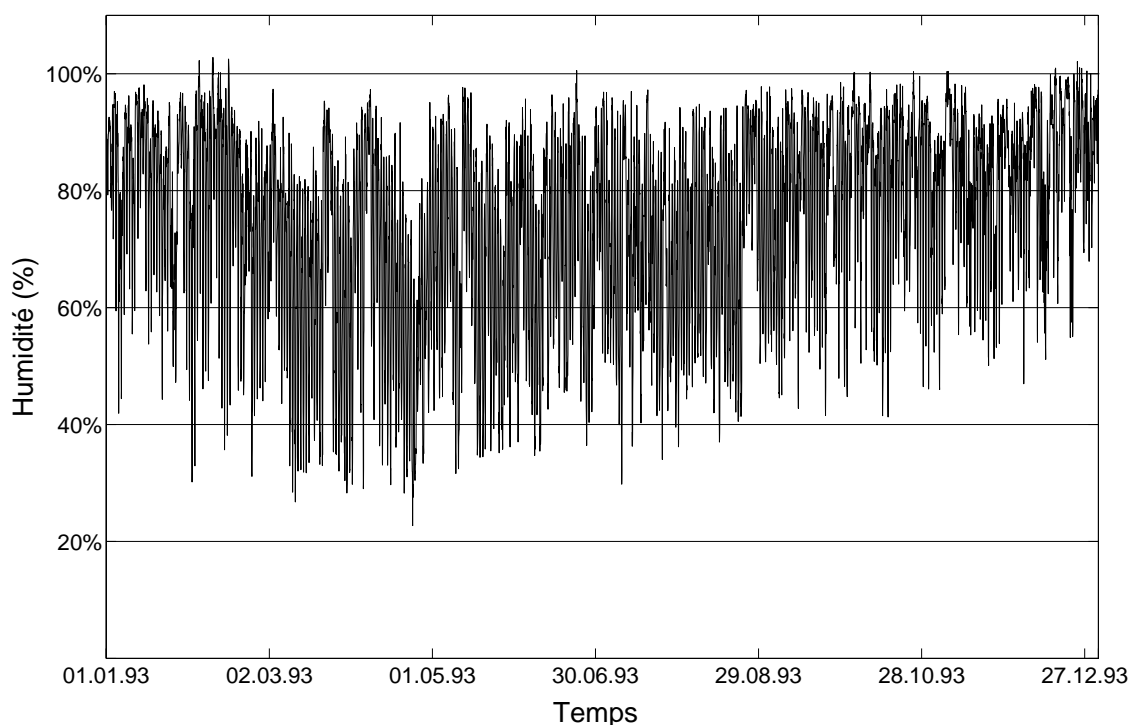


FIG. 5.35: Courbe hygrométrique calculée au-dessus du réservoir pour l'année 1993

Cette courbe montre 7 événements de formation de brouillard dont les durées s'échelonnent entre 1 et 5 heures. En tout, ce sont 19 heures de condensation sur l'ensemble de l'année. Une simulation identique sans réservoir génère 11 heures de condensation. L'aménagement augmente le taux d'humidité moyen de 5 %.

5.7.9 Analyse de sensibilité du modèle de condensation

La variation du débit de la digue perméable ne produit aucune variation sur le nombre d'heures de condensation. Cette variation modifie la température du réservoir en été. Toutefois, à cause de la température de l'air élevée pendant cette saison, la limite de condensation est relativement éloignée du taux généré. Le risque de formation de brouillard est donc inexistant.

La variation de la surface du réservoir a un faible impact sur le nombre d'heures de condensation. Ce nombre oscille entre 16 et 20 heures pour des tailles comprises entre 0.2 et 2.2 km².

La variation du coefficient de sécurité (F_s dans l'équation 5.48) génère des différences plus marquées. Elles sont résumées au tableau 5.13 pour l'aménagement de base. La dernière colonne du tableau montre une augmentation maximale du nombre d'heures par un facteur 3. Toutefois, avec un coefficient F_s probablement supérieur à 95 %, l'impact de l'aménagement est négligeable.

TAB. 5.13: Variation du nombre d'heures de condensation selon le coefficient F_s sans et avec aménagement

F_s	Sans	Avec	Différence	Variation
100.0 %	0	0	0	-
97.5 %	0	1	1	-
95.0 %	11	19	8	73 %
92.5 %	39	119	80	205 %
90.0 %	216	526	310	144 %

5.8 Modèle de simulation énergétique : Dimensionnement et production

5.8.1 Objectifs du modèle de dimensionnement des machines

Sans constituer un objectif essentiel de l'aménagement, la production d'énergie représente un aspect important. Les investissements nécessaires pour l'acquisition des machines hydrauliques et pour les constructions de génie civil représentent des sommes additionnelles importantes pour lesquelles il faut assurer la rentabilité. Cette rentabilité économique dépend de l'investissement et de la production.

L'investissement des machines hydrauliques peut être relié à deux paramètres de dimensionnement, le diamètre de la roue et sa vitesse de rotation. Ce même investissement peut également être approché par la puissance hydraulique brute de la machine et sa hauteur de chute maximale.

Sur la base du diamètre de la roue, l'encombrement des machines peut être estimé. Avec la contre-pression aval nécessaire sur la turbine, la profondeur d'implantation peut être calculée. Ces deux résultats suffisent pour déduire les coûts de génie civil.

La production d'énergie dépend, outre les conditions hydrauliques de débits et hauteurs de chute (calculées par le modèle hydraulique au paragraphe 5.6), du coefficient de rendement de la chaîne énergétique de transformation. Ce coefficient dépend des deux paramètres de dimensionnement (diamètre de la roue et vitesse de rotation) et est habituellement représenté sous la forme d'une colline de rendement.

L'optimisation de ces deux paramètres est couramment effectuée à l'aide d'abaques. Ces abaques, définies par type de turbine, sont élaborées sur la base de statistiques de machines réalisées (Chapuis, 1990). Toutefois, ces abaques considèrent que la chute est une quasi-constante du système. Dans le cas du projet d'aménagement à buts multiples, cette hypothèse n'est plus respectée. Le dimensionnement de la turbine devient ainsi à part entière un problème d'optimisation.

5.8.2 Modèle de dimensionnement des machines

5.8.2.1 Dimensionnement initialement prévu par VATECH

Afin de pouvoir utiliser la même colline de rendement pour le dimensionnement de problèmes similaires, cette dernière est exprimée de manière adimensionnelle. L'axe horizontal représente le débit par le nombre ϕ et l'axe vertical l'énergie par le nombre ψ . Les nombres ϕ et ψ sont reliés au débit, à la hauteur de chute ainsi qu'aux paramètres de dimensionnement de la turbine par les équations 5.49 et 5.50. Ces deux équations servent également de définition des nombres adimensionnels ϕ et ψ :

$$Q_t(t) = \phi(t) \frac{\pi^2 D^3 n_t}{240} \quad (5.49)$$

$$H_n(t) = \psi(t) \left(\frac{\pi D n_t}{60} \right)^2 \frac{1}{2g} \quad (5.50)$$

où Q_t représente le débit turbiné par la machine, D le diamètre de la machine, n_t la vitesse de rotation et H_n la hauteur de chute.

Chaque couple (ϕ, ψ) permet de déterminer, à partir de la colline des rendements, le rendement de la turbine sous des conditions de débit et de hauteur de chute déterminées. Sur cette même colline, il est possible de représenter les différentes limites de fonctionnement de la machine. Ce sont la limite d'ouverture des vannes d'entrée, la limite de rotation des pales, les limites de cavitation (suction et pression sur les pales) ainsi que la limite de saturation. Ces limites restreignent l'espace des couples (ϕ, ψ) disponibles. La figure 5.36 (Vulliod and Chapuis, 2006) illustre, sous forme d'un graphe 2D, la colline des rendements utilisée et ses différentes limites.

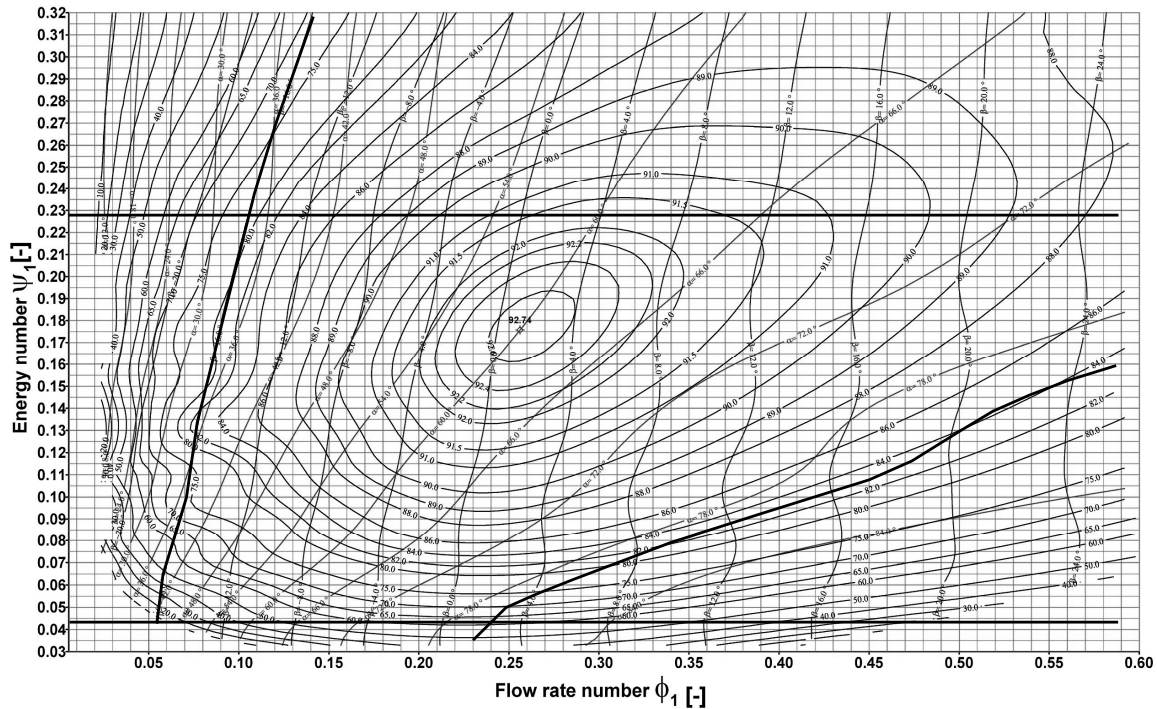


FIG. 5.36: Colline des rendements et ses limites de fonctionnement en graphe 2D (Vulliod and Chapuis, 2006)

La méthode de dimensionnement proposée par VATECH (Vulliod and Chapuis, 2006) s'effectue en 8 étapes.

1. Définition d'une colline de rendement sur la base d'un modèle réduit de turbine ;
2. Surcharge de la colline avec les limites de fonctionnement ;
3. Détermination du diamètre et de la vitesse par les équations 5.49 et 5.50 ;
4. Lecture du rendement de la turbine pour chaque heure simulée de fonctionnement ;
5. Choix du rapport de la multiplication de la vitesse de rotation. Ce choix conditionne le nombre de pôles de l'alternateur ;
6. Lecture du rendement du multiplicateur pour chaque heure. Ce rendement est donné au tableau 5.14 en fonction de la charge ;
7. Lecture du rendement de l'alternateur pour chaque heure. Ce rendement est donné au tableau 5.15 en fonction de la charge ;
8. Calcul de l'énergie électrique horaire délivrée avant le transformateur. La sommation annuelle donne l'énergie produite.

TAB. 5.14: Rendement du multiplicateur en fonction de la charge

Charge (% de la charge max)	Rendement
100 %	98.5 %
75 %	98.0 %
50 %	97.2 %

TAB. 5.15: Rendement de l'alternateur en fonction de la charge

Charge (% de la charge max)	Rendement
100 %	96.8 %
75 %	96.6 %
50 %	95.9 %
25 %	93.4 %

Normalement, les couples (ϕ, ψ) sont concentrés dans deux ou trois zones de la colline des rendements. La méthode des centres de masse permet de choisir le meilleur couple (D, n) qui optimise la production annuelle. Ce dimensionnement est également effectué de manière à se tenir éloigné de la limite de saturation et d'avoir ainsi un nombre faible de cavitation. Ce nombre de cavitation (σ_{cav}) permet de déduire par la formule de Thoma (équation 5.51) la profondeur d'implantation de la machine compte tenu de la chute nette et de la hauteur d'eau aval :

$$\sigma_{cav} = \frac{H_b - H_v - H_s}{H_n} \quad (5.51)$$

où H_b représente la pression barométrique, H_v la tension vapeur sur les pales, H_s la contre-pression aval mesurée à l'axe de la turbine et H_n la hauteur de chute nette. Afin de ne pas trop user les pales mais pour ne pas implanter trop profondément la machine, il est accepté d'enfreindre le critère de Thoma quelques heures par an (environ 1 % du temps total d'utilisation).

Cette procédure expose le problème du dimensionnement de manière adimensionnelle mais ne permet pas de le résoudre. En effet, le point 3 de la procédure (choix du diamètre et de la vitesse) n'est pas résolu de manière explicite. Les équations 5.49 et 5.50 permettent seulement de relier les couples (Q, H) aux couples (ϕ, ψ) à condition d'avoir déterminé le diamètre et la vitesse de rotation. A cause de la forte variation de la hauteur de chute, les couples (ϕ, ψ) sont largement répartis sur la colline des rendements et il n'est plus possible de trouver facilement le meilleur dimensionnement. La figure 5.37 illustre l'extension de ces couples sur la colline des rendements. Cette figure montre un bon alignement horizontal des différents couples, proche du rendement optimal. Toutefois, une grande partie des couples se situe en dehors des limites de fonctionnement (parties supérieures limitées sur l'axe ψ à 0.23).

5.8.2.2 Méthode de dimensionnement développée

La procédure de dimensionnement développée se base sur la colline des rendements tronquée par les différentes limites. Cette procédure est constituée des étapes suivantes.

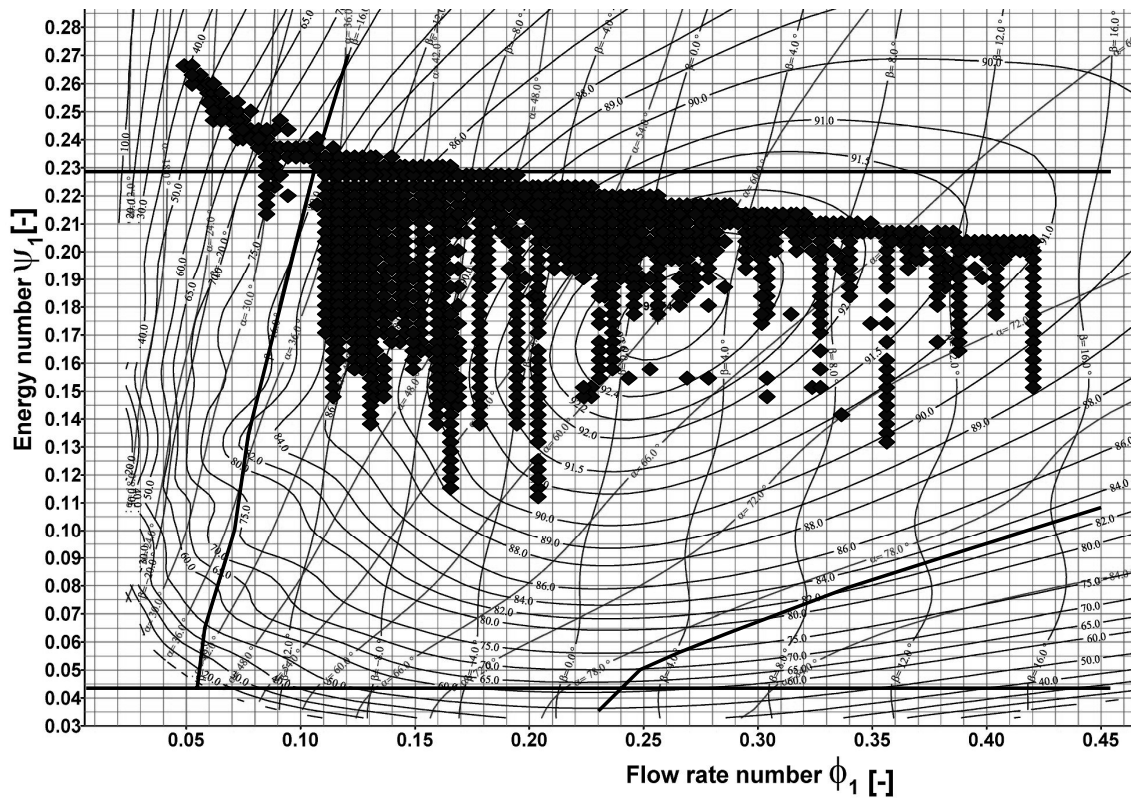


FIG. 5.37: Colline des rendements et couples simulés

1. La colline des rendements est amputée des espaces de solutions situées hors des limites admissibles. Le rendement η est alors considéré comme nul. La figure 5.38 illustre en perspective la colline des rendements tronquée ;
2. Afin d'approcher au mieux le fonctionnement réel des machines, le débit est réparti entre les différents groupes. Pour une situation avec deux groupes, la règle suivante divise le débit :
 - si $Q_T(t) > Q_{dim}$ alors $Q_{t,1}(t) = Q_{t,2}(t) = \frac{Q_T(t)}{2}$
 - sinon $Q_{t,1}(t) = Q_T(t)$ et $Q_{t,2}(t) = 0$
 où Q_{dim} est le débit nominal de chaque machine hydraulique (valeur identique pour les deux groupes), Q_T le débit de la rivière qui peut être turbiné (limité au maximum par $2 \cdot Q_{dim}$), $Q_{t,1}$ le débit turbiné du premier groupe et $Q_{t,2}$ celui du second groupe.
3. Le dimensionnement est optimisé sur le premier groupe (le plus utilisé). L'optimisation est effectuée par itération sur la vitesse pour chaque incrément de diamètre (double optimisation en boucle imbriquée). La fonction objectif maximise la production annuelle d'énergie sur la base de la colline tronquée. Le couple optimal (diamètre, vitesse) constitue le résultat de cette optimisation. Ce couple optimal est alors appliqué aux différents groupes.
4. L'énergie annuelle totale est obtenue par application de la méthode initiale sur les deux groupes avec le diamètre optimal et la vitesse optimale. L'énergie est calculée avec la colline complète.
5. Le résultat est agrégé dans un coefficient de rendement global (η) qui tient compte de la chaîne de production complète moyennée sur les deux groupes. Il est calculé par le ratio de l'énergie produite sur l'énergie hydraulique brute.

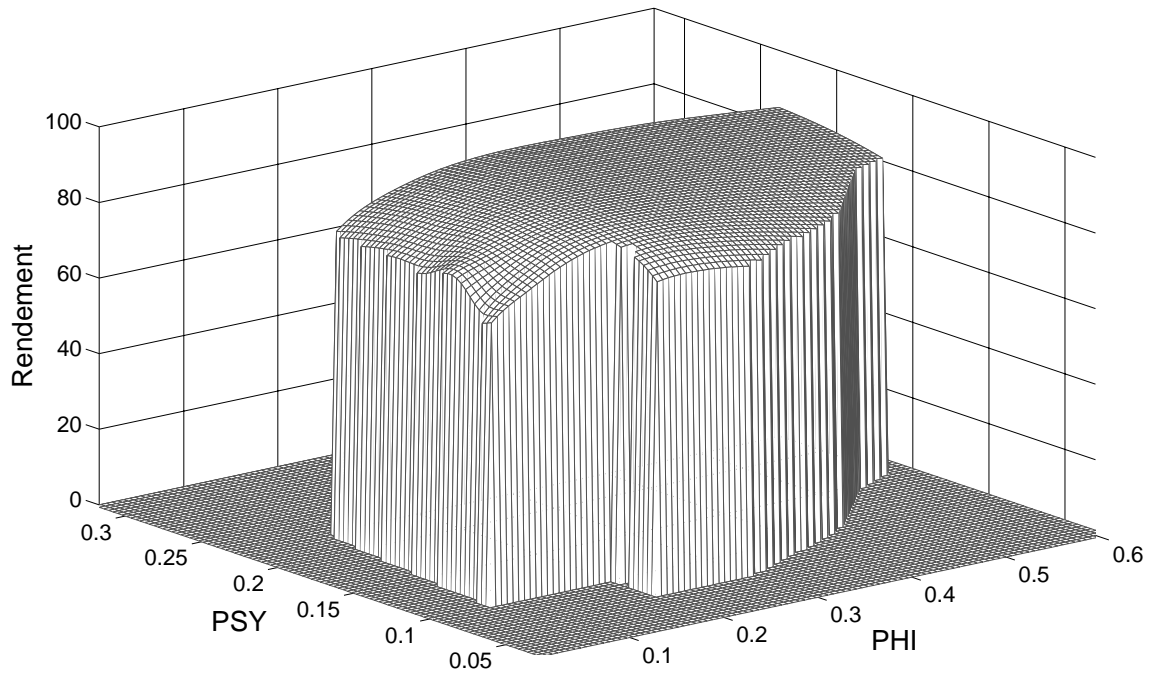


FIG. 5.38: Colline tronquée du rendement des machines représentée en 3D

6. L'application du critère de Thoma (équation 5.51) pour chaque heure de fonctionnement et le classement par ordre croissant de la profondeur nécessaire donne pour le 99^{ème} fractile sur 100 la profondeur requise des machines. Cette profondeur est mesurée entre le talweg de la rivière aval et l'axe de la turbine.

5.8.3 Application du modèle de dimensionnement au cas d'étude

Sur la base de l'année moyenne choisie (1993) avec l'aménagement standard (surface 1 km², hauteur 8.68 m) et avec un débit équipé de 200 m³/s, le tableau 5.16 donne les caractéristiques optimales des machines hydromécaniques du point de vue de la production. Ces calculs sont effectués avec la courbe de tarage aval actuel de Branson.

TAB. 5.16: Caractéristiques optimales des machines hydromécaniques

Débit m ³ /s	Diamètre m	Vitesse 1/min	Rendement global	Profondeur m
200	4.08	108	87.1 %	4.20

Ces résultats amènent deux commentaires. D'une part, le diamètre de la machine est étonnamment grand. En conséquence, la vitesse de rotation est plutôt faible. D'autre part, la profondeur d'implantation est également étonnamment grande. Ces deux résultats (diamètre et profondeur) augmentent notablement le prix de l'installation. En effet, dans la procédure établie au paragraphe 5.8.2.2, les aspects économiques ne sont pas pris en compte.

Il est difficile de trouver des relations continues qui expriment, d'une part, le coût de la machine en fonction de son diamètre et de sa vitesse et, d'autre part, le coût de génie civil

en fonction du diamètre et de la profondeur d'implantation. Le modèle de dimensionnement est donc transformé de sorte à calculer le rendement global comme une fonction du diamètre (et de la vitesse optimale associée) et de la profondeur.

5.8.4 Analyse de sensibilité du modèle de dimensionnement

Une première analyse de sensibilité est effectuée avec les trois principales variables de taille. La surface du réservoir est comprise entre 0.2 et 1.2 km², la hauteur utile du barrage entre 7.68 et 14.18 m et le débit équipé entre 180 et 320 m³/s. Pour chaque combinaison, le rendement global optimal est calculé sans considération économique sur le diamètre ni sur la profondeur d'implantation. La figure 5.39 illustre la variabilité du rendement pour quatre surfaces (0.2, 0.5, 0.8 et 1.2 km²) et toutes les combinaisons de hauteurs et de débits équipés. Ces valeurs sont calculées avec l'année 1993.

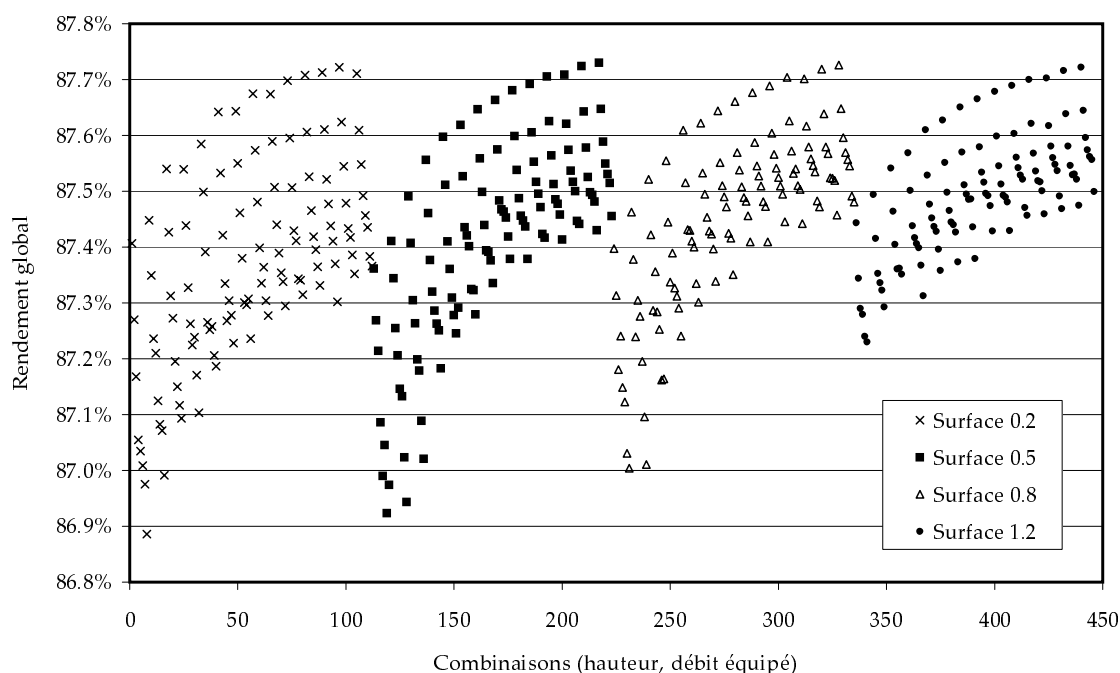


FIG. 5.39: Sensibilité du rendement global en fonction de la surface, de la hauteur utile et du débit équipé

Le rendement global offre peu de variabilité en fonction des trois tailles principales de l'aménagement relatives à la production d'énergie (surface, hauteur et débit équipé). Le rendement global moyen varie sur une plage inférieure à 1% (entre 86.9 et 87.8%). Il diminue avec l'augmentation du débit, augmente avec l'accroissement de la hauteur utile mais reste très peu sensible à la surface de l'aménagement. L'augmentation du débit disperse les valeurs de ϕ sur une zone de plus en plus large par rapport au sommet de la colline. Au contraire, l'accroissement de la hauteur permet de rassembler les valeurs de ψ autour du sommet de la colline. La valeur moyenne de 87.5% donne une bonne approximation de l'efficacité globale sans considération sur les tailles de l'aménagement.

La seconde analyse de sensibilité porte sur le diamètre des machines hydrauliques. L'algorithme d'optimisation du diamètre est légèrement modifié. Au lieu de s'arrêter lorsqu'il a atteint la production d'énergie maximale, il mémorise la production pour chaque diamètre

avec sa vitesse optimale. La figure 5.40 illustre la variation d'énergie en fonction du diamètre. Ces valeurs sont calculées sans limite sur la profondeur. Le rendement est exprimé en pourcentage de la production maximale mesurée à l'arbre de la turbine (diamètre 4.08 m) du groupe principal.

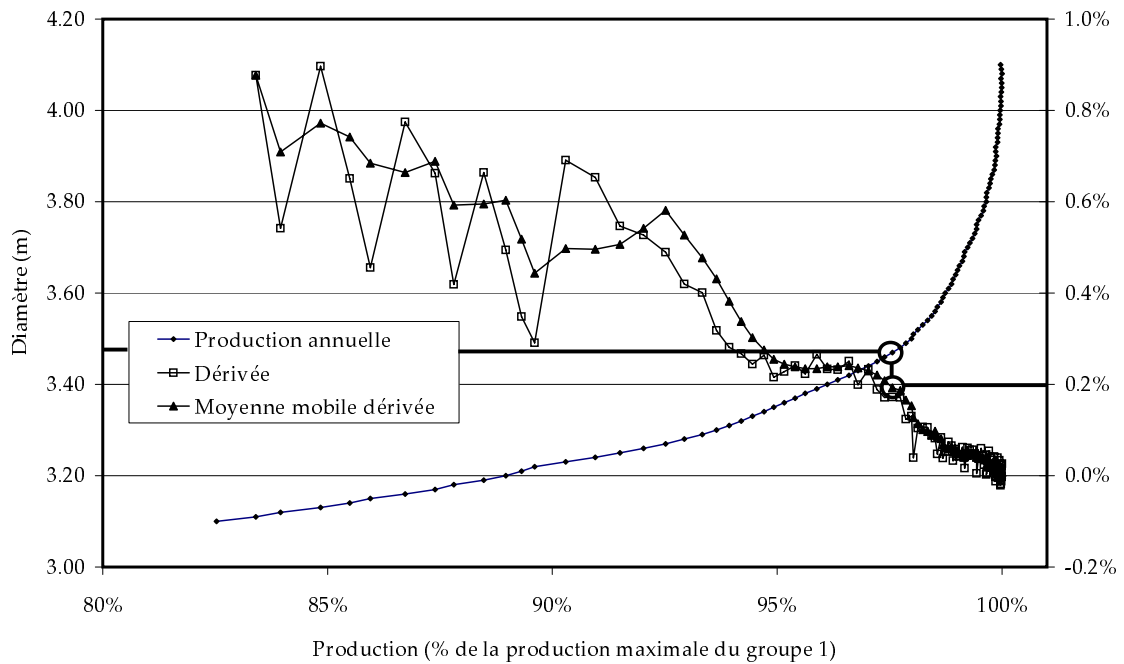


FIG. 5.40: Sensibilité du rendement de la turbine en fonction du diamètre des machines

L'augmentation du diamètre génère une réduction importante de la vitesse qui passe de 140 (tours/min) à 108 (tours/min) pour une variation du diamètre de 3.10 m à 4.10 m. Cette même diminution du diamètre génère une perte énergétique qui dépasse 15 % de production annuelle. Cependant, l'accroissement du rendement varie lentement à partir de 3.50 m. La dérivée montre des points de croissance nulle ou négative à partir de 3.90 m. Une moyenne mobile (5 valeurs) sur la dérivée est utilisée pour éviter les minima locaux. Il suffit alors de poser une limite à cette moyenne mobile pour choisir un diamètre. La valeur de 0.2 % pour ce seuil semble raisonnable et en même temps correspondre au dimensionnement statistiquement effectué par les constructeurs de turbine. L'application de cette règle sur la figure 5.40 définit un diamètre de 3.47 m correspondant à une vitesse de 127 (tours/min). La perte de rendement mesurée est inférieure à 2.5 % de la production maximale du groupe principal.

La troisième analyse de sensibilité porte sur la profondeur d'implantation des machines hydrauliques. Sur la base de trois différents diamètres, dont le diamètre optimal, et de leur vitesse optimale, la figure 5.41 donne la perte de production en fonction de la profondeur d'implantation. La profondeur est mesurée à partir du fond du lit de la rivière. L'énergie annuelle, exprimée sous forme de rendement global, est calculée avec le critère de Thoma enfreint pendant 100 heures. L'énergie maximale obtenue correspond, pour le diamètre optimal, à un rendement global de 87.12 %. Pour une très faible diminution du rendement, le diamètre peut être sensiblement réduit à condition de garder une profondeur suffisante (diamètre 3.40 m avec une profondeur de 5.0 m et un rendement de 85.4 %). Il convient toutefois de ne pas trop réduire le diamètre sous peine de voir chuter très sensiblement le rendement (diamètre de 3.00 m et rendement maximal de 60 %). Les pertes de rendement

calculé avec la sensibilité sur le diamètre sont réduites. Ceci provient, dans le cas de cette troisième analyse, de la considération des deux groupes simultanément ainsi que du rendement global.

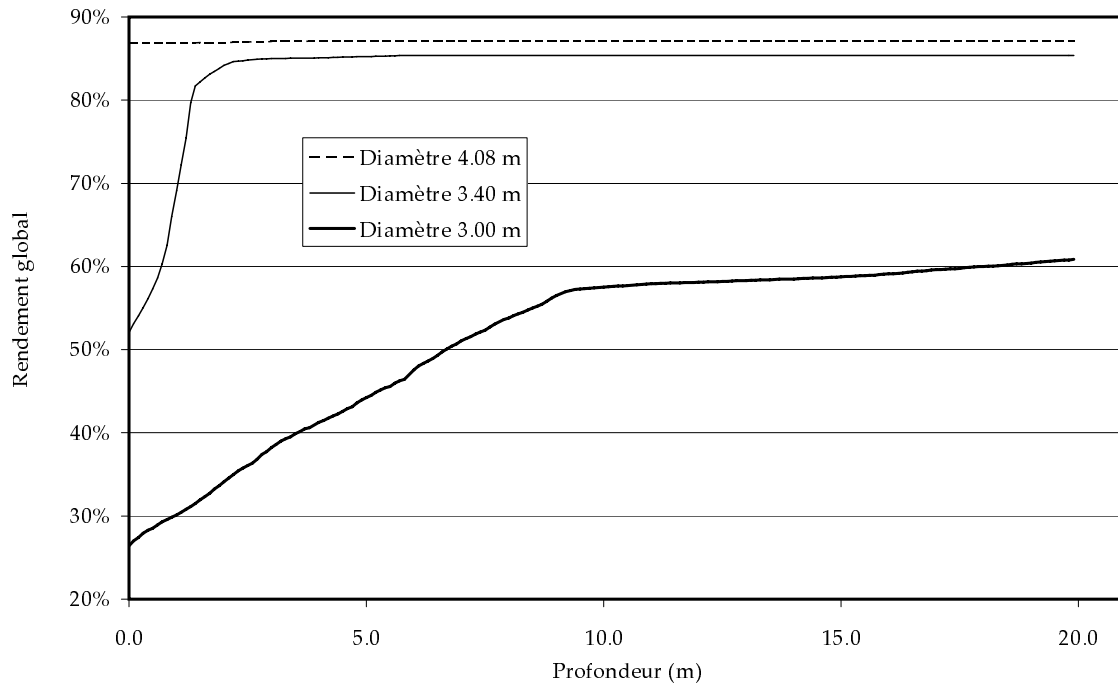


FIG. 5.41: Sensibilité du rendement global en fonction de la profondeur d'implantation des machines

5.8.5 Variables internes d'entrée et sortie du modèle de dimensionnement

Hormis la colline des rendements, les débits et les hauteurs de chute produits par le modèle de gestion couplé au modèle hydraulique, la seule variable d'entrée de ce modèle se résume au débit de dimensionnement des machines (Q_{dim}).

De manière secondaire, les variables d'entrée contiennent également le nombre de groupes pour déterminer la règle de répartition du débit, le seuil sur la moyenne mobile de la dérivée de rendement pour fixer le diamètre optimal et le seuil sur la profondeur d'implantation pour fixer la perte de rendement liée à la cavitation.

Les variables de sortie du modèle sont le rendement global de l'installation (η) en fonction du diamètre (D) et de la profondeur d'implantation des groupes (H_s). La vitesse optimale (n_t) est donnée pour chaque diamètre.

Le seuil sur la moyenne mobile, s'il est fixé, permet de choisir un diamètre et sa vitesse optimale relative. Le choix de la profondeur d'implantation permet ensuite de fixer le rendement global de l'aménagement.

Par couplage avec le modèle hydraulique, la puissance instantanée électrique (P_{el}) peut être calculée pour chaque heure de fonctionnement. Si cette puissance est associée à un prix de vente (P_{vente}), le produit de la vente d'énergie (V_{el}) est exprimé par l'équation 5.52.

$$V_{el}(t) = P_{el}(t) * P_{vente}(t) \quad (5.52)$$

5.8.6 Rendement global et production des machines hydromécaniques

Basé sur les résultats de la première analyse de sensibilité, le rendement est rendu indépendant de l'aménagement et fixé à 87.5 %. La perte de rendement liée à la profondeur et à la réduction du diamètre conduit à une réduction du rendement global de 2 %. Le rendement global peut ainsi être rendu indépendant des tailles de l'aménagement et réduit à une seule valeur. De manière prudente cette valeur est fixée à 85 %. Cette valeur comprend l'intégralité de la chaîne de transformation énergétique, soit le passage de l'énergie hydraulique brute à l'énergie électrique délivrée.

Avec ce rendement, l'aménagement standard produit 51.1 GWh/an pour une puissance électrique de 9.3 MW. La figure 5.42 illustre l'évolution annuelle de cette production (1993) pour un aménagement standard de 1 km² et une hauteur de 8.68 m. Si l'on applique un prix unitaire à l'énergie de 7.5 ct/kWh, cette production correspond à un chiffre d'affaire annuel de $3.84 \cdot 10^6$ CHF.

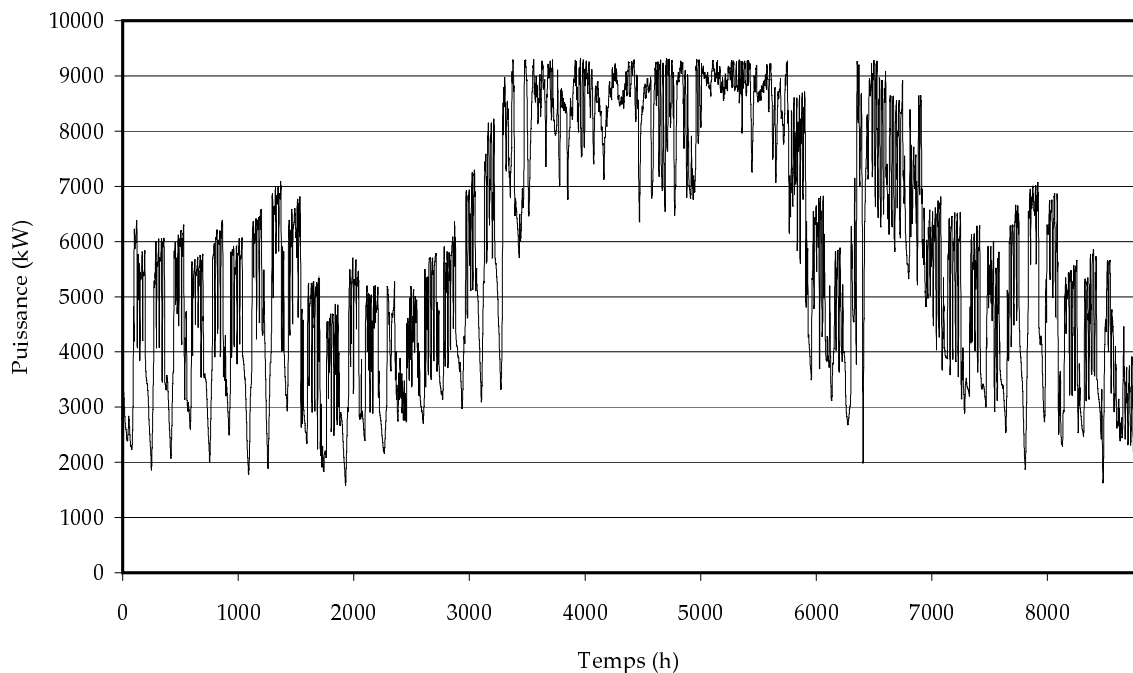


FIG. 5.42: Evolution annuelle de la production d'énergie

Dans les optimisations du chapitre 7^{ème}, la valeur de rendement considérée est réduite à 80 %. Ceci est lié à la dernière évolution de ce chapitre énergétique qui est intervenue seulement après que les optimisations aient été calculées. Les productions du chapitre 7^{ème} sont donc légèrement sous estimées. Cette réduction n'influence cependant pas les résultats obtenus de manière significative (effet croisé neutralisé entre les optimisations partielles et globales).

5.9 Modèles sociaux : attractivité et valeur des loisirs aquatiques

5.9.1 Objectifs des modèles sociaux

Approcher une réalité sociale par le biais d'un modèle de simulation est une opération assez osée. Prédire, par ce biais, une réalité future du même ordre l'est davantage. Cette incertitude est encore plus grande quand l'objet de la modélisation touche aux loisirs. En effet, les motivations liées aux loisirs peuvent être nombreuses et parfois peu rationnelles. Cependant, à cause de la structure choisie dans le cadre de ce travail de recherche, il est nécessaire, pour considérer les impacts sociaux, d'établir un modèle fonctionnel. Un tel modèle doit, d'une part, attribuer une valeur économique au bien généré et, d'autre part, prédire le nombre total d'utilisateurs de ce bien.

L'évaluation économique totale d'un bien différencie généralement la valeur d'usage de la valeur d'existence. La valeur d'usage est elle-même divisée en valeur directe et indirecte. Enfin, la valeur directe distingue la valeur commerciale de la valeur non commerciale (Point, 1999; King, 1995). Le tableau 5.17 illustre chacune de ces valeurs par un exemple.

TAB. 5.17: Subdivision et illustration des différentes valeurs économiques

Valeur d'usage			Valeur d'existence
Valeur directe		Valeur indirecte	
V. commerciale	V. non commerciale		
Prix du kWh	Proximité d'un lac	Ecosystème	Biodiversité

Un aménagement à buts multiples, pour sa valeur sociale, représente un bien d'usage direct dont la valeur est cependant difficilement commerciale. Parmi ces valeurs, on relève les activités liées à l'exploitation commerciale des loisirs autour de l'aménagement (restauration et vente), l'exploitation non commerciale de ces mêmes loisirs (marche, cyclisme, équitation, natation), l'attractivité du site et son impact additionnel sur une région (tourisme, valeur foncière si la demande immobilière se lie au plan d'eau). L'objet du modèle présenté ci-après est limité aux activités de loisirs de type aquatique. Les principales méthodes pour quantifier financièrement la volonté ou la capacité d'une population à acquérir un bien sans valeur commerciale sont passées en revue. Les impacts économiques indirects d'un aménagement à buts multiples (impacts sur la santé des populations adjacentes, sur le prix de l'immobilier, sur le tourisme,...) sortent du cadre de cette étude. Ils mériteraient un travail spécifique à part entière.

5.9.2 Brève revue littéraire sur l'évaluation socio-économique

La première méthode, intitulée *méthode du prix du marché*, consiste à évaluer les conséquences liées aux biens. Ainsi, la pollution d'un système hydrique peut être reliée à son absence d'activité de pêche professionnelle. A condition que le lien physique entre la pollution et la productivité piscicole soit établi, il est possible, par ce biais, de quantifier économiquement la pollution. Rainelli (2003) évalue par cette méthode le coût engendré par la pollution liée au naufrage de l'Erika. Braden and Johnston (2004) estiment la valeur économique liée à des ouvrages de rétention pour gérer les crues.

Lorsque le lien entre le bien non commercial et le bien commercial n'est plus direct ou plus unique, il y a lieu d'utiliser la *méthode de productivité*. Dans le même exemple, si le système hydrique est utilisé pour la génération d'eau potable, l'accroissement de pollution induit un coût supplémentaire pour la potabilisation. Si les gains liés à la pollution (absence de purification à la source) et les coûts supplémentaires engendrés (potabilisation accrue) peuvent être quantifiés, cette méthode permet de trouver des optima économiques. Shirakawa and Tamai (2003) développent un modèle économique basé sur une taxe liée à la pollution aquatique et la perte de productivité pour déterminer le débit résiduel optimal. Bousquet et al. (2003) évaluent par cette méthode les enjeux socio-économiques liés aux étiages de la Seine (France). Strange et al. (1999) appliquent cette méthode pour évaluer la gestion optimale d'une forêt polonaise.

Si les coûts et les gains ne peuvent plus être quantifiés directement, il faut utiliser des méthodes indirectes. La *méthode hédonique* admet que la valeur économique d'un bien vaut la somme de ses caractéristiques (Lancaster, 1966). A condition de pouvoir quantifier économiquement l'ensemble des caractéristiques, il devient possible d'attribuer une valeur au bien. Si toutes les caractéristiques ne sont pas quantifiables économiquement, cette méthode permet encore de calculer des valeurs relatives. La méthode hédonique est couramment utilisée pour calculer la valeur du bien-être d'un logement (bruit, environnement naturel, accès, vue, ...). Cette méthode nécessite beaucoup de données. Loomis and Feldman (2003) appliquent la méthode hédonique pour quantifier la plus-value d'une résidence avec vue sur le lac *Almanor* (California, USA) et les bénéfices liés à la stabilité du niveau d'eau de ce lac.

Lorsque les caractéristiques ne se laissent pas évaluer ou lorsque le bien n'est pas encore présent (prédiction d'une demande future), la *méthode de l'évaluation contingente* permet d'estimer la valeur du bien. Il s'agit, par des questions ciblées, de quantifier en moyenne la volonté de la population à acquérir le bien. Ces méthodes, entre autres, prennent le nom en anglais de *willingness to pay* ou dans le cas contraire *willingness to avoid* ou encore *willingness to accept* (Jones, 2000). Elles sont toutefois limitées par l'absence de réalité lors de l'enquête. Ces méthodes ont souvent tendance à surestimer la valeur. Grelot et al. (2003) estiment par cette méthode la valeur liée à la réduction du risque d'inondation. Hopkins et al. (2004) évaluent par la méthode contingente la faisabilité économique d'un nouveau réseau d'eau potable au Rwanda. Vaughan et al. (2000) comparent différentes évaluations contingentes pour un projet d'amélioration de la qualité de la rivière *Tietê* (Brazil).

Une méthode analogue, limitée aux situations existantes ou similaires, intitulée *méthode du coût des transports*, consiste à prendre ce coût comme valeur minimale attribuée à un bien (Hotelling, 1931; Clawson and Knetsch, 1966). Ainsi, une enquête sur la fréquentation annuelle et la distance parcourue des "consommateurs" permet de calculer la valeur totale du bien. Cette méthode, parmi les différentes méthodes susceptibles d'évaluer un bien non-commercial ou de valeur indirecte, est celle qui s'approche le plus des théories classiques en économie. De ce fait, c'est également celle qui est le plus acceptée par les économistes. Baranzini and Rochette (2006) calculent avec la méthode du coût des transports la valeur récréative du *Bois de Finges* (Valais, Suisse), Buchli et al. (2003) estiment celle d'un débit de base dans la rivière *Tessin* (Tessin, Suisse) et Point (1999) quantifie la perte monétaire liée à la disparition des activités récréatives dans la *Creuse* (Limousin, France). Le taux de fréquentation de la *Creuse* avant transformation est calculé, par une méthode de transfert, à partir de la fréquentation d'une autre rivière (Gorge de la Sioule, France). Shabman and Stephenson (2000) résument les critiques à l'égard des

techniques économétriques et propose une alternative avec le *Free Market Environmentalist*. Loomis (2000) conclut cependant que, malgré leurs faiblesses, ces méthodes constituent un contre-poids équilibré et nécessaire aux objectifs directement évaluables pour la gestion des réseaux hydriques

Il existe encore d'autres méthodes parmi lesquelles la méthode de remplacement, la méthode liée au coût de la maladie associée ou la méthode du choix expérimental. Ces méthodes s'appliquent cependant dans des cas plus spécifiques ou sont des réductions d'une méthode plus générale (Birol et al., 2006).

5.9.3 Modèle développé pour le calcul de la valeur sociale

La valeur sociale de l'aménagement à buts multiples est estimée à partir de la méthode du coût du transport. Cette méthode considère que le coût réel est composé d'un coût kilométrique et d'un coût d'opportunité. Le coût kilométrique est estimé, sur la base d'études effectuées par le *Touring Club Suisse*, à 0.73 CHF/km (Baranzini and Rochette, 2006). Le coût d'opportunité est calculé sur la base du salaire horaire de la personne en déplacement. Le ratio (R_T) utilisé entre ces deux tarifs est un sujet largement discuté dans la littérature (Feather and Shaw, 1999; Hynes et al., 2005; Ward and Loomis, 1986). Les valeurs proposées s'étendent entre 100 % et 25 % du salaire horaire.

Dans la première étape, le coût du transport de la visite de l'individu i (CT_i) est calculé par l'équation 5.53. La distance du trajet ($Dist_i$) est mesurée sur des cartes routières en ligne en utilisant toujours le trajet le plus court (www.finaroute.ch). Le temps nécessaire au trajet ($T_{tr,i}$) est augmenté de 12 minutes pour tenir compte du temps nécessaire au parcage du véhicule (avant et après le trajet). Par hypothèse, les trajets sont toujours effectués en voiture. Enfin le coût kilométrique est divisé par le nombre d'occupants du véhicule ($Occu_i$). Le salaire horaire (Sal_i) est déduit de l'enquête.

$$CT_i = 2 \left(\frac{Dist_i * 0.73}{Occu_i} + R_T * Sal_i * T_{tr,i} \right) \quad (5.53)$$

Dans la seconde étape, le nombre annuel de visites de l'individu i (NV_i) est calculé par un modèle linéaire avec 11 variables explicatives. Le modèle est formulé par l'équation 5.54. Les variables explicatives (Var), multipliées par le vecteur multiplicatif (V_i), sont le coût du transport (CT_i), le salaire horaire (Sal_i), l'âge (Age_i), la qualité de personne sans salaire, c'est-à-dire de retraité ou d'étudiant (R/Etu), le sexe ($Sexe_i$), le nombre d'occupants qui effectuent le trajet dans le même véhicule ($Occu_i$), la distance effectuée ($Dist_i$), le temps de trajet nécessaire ($T_{Tr,i}$), les conditions météorologiques lors de la visite ($Meteo_i$) et enfin la catégorie professionnelle de l'individu ($C_{prof,i}$).

$$\begin{aligned} NV_i = & V_t(1) + V_t(2) * CT_i + V_t(3) * Sal_i + V_t(4) * Age_i + V_t(5) * R/Etu_i \\ & + V_t(6) * Sexe_i + V_t(7) * Occu_i + V_t(8) * Dist_i + V_t(9) * T_{tr,i} \\ & + V_t(10) * Meteo_i + V_t(11) * C_{prof,i} \end{aligned} \quad (5.54)$$

Dans la troisième étape, le même nombre de visites de l'ensemble des individus interrogés est déduit des réponses d'enquêtes. Le vecteur multiplicatif des variables est alors optimisé

de manière à minimiser la différence entre le nombre calculé de visites (V_{calc}) et le nombre mesuré (V_{mes}) ou déduit d'après les enquêtes.

Dans une quatrième étape, le vecteur multiplicatif optimisé est ensuite multiplié par les variables explicatives moyennes de l'échantillon (\overline{Var}). Le coût du transport n'est pas pris en compte dans cette multiplication. Le produit est alors sommé selon l'équation 5.55.

$$Sm = V_t(1) + \sum_{k=3}^{11} V_t(k) * \overline{Var(k)} \quad (5.55)$$

Dans la cinquième étape, l'élasticité du nombre de visites est calculée sur la base de l'élasticité du coût du transport. L'intégrale de cette fonction donne la valeur de l'aménagement pour un individu moyen (Val_{moy}). Cette valeur moyenne est donnée par l'équation 5.56 où x représente le coût du transport. Cette intégrale est bornée, d'une part, par la valeur maximale trouvée dans l'échantillon du nombre annuel de visites (max_v) et, d'autre part, par la valeur maximale trouvée dans l'échantillon du coût des transports (max_c).

$$Val_{moy} = \int_{max_v}^{max_c} Sm + V_t(2) * x dx \quad (5.56)$$

Dans la dernière étape, le prix relatif d'une visite (P_{visite}) est calculé par l'équation 5.57. Il s'agit simplement du ratio entre la valeur moyenne de l'aménagement (Val_{moy}) et le nombre moyen de visites effectuées par les individus de l'échantillon ($\overline{V_{mes}}$).

$$P_{visite} = \frac{Val_{moy}}{\overline{V_{mes}}} \quad (5.57)$$

5.9.4 Modèle développé pour le calcul de fréquentation

Le modèle de fréquentation est basé sur la fréquentation estimée d'un site de référence, les "Iles de Sion". Ce site est situé dans la plaine du Rhône valaisanne, à environ 11 km du site du cas d'étude. Un double modèle de transfert est ensuite appliqué en fonction des activités possibles et en fonction de la proximité de la population. La combinaison donne alors le modèle de fréquentation du site projeté.

5.9.4.1 Modèle de fréquentation du site de référence

Le modèle de fréquentation du site de référence est basé sur le restaurant attenant. Le modèle simule les variations du chiffre d'affaires de ce dernier afin d'en reconstituer la fréquentation. Un facteur final transforme la fréquentation du restaurant en fréquentation du site.

Le modèle distingue, d'une part, les 5 jours ouvrables du week-end. D'autre part, il divise l'année en trois périodes : l'été d'une durée de 8 semaines, la mi-saison d'une durée de 12 semaines (divisée en deux parties égales avant et après l'été) et l'hiver d'une durée de 32 semaines. Différents facteurs permettent le calcul du chiffre d'affaires entre ces périodes.

Le modèle reproduit la division réelle du chiffre d'affaires entre la part issue de la terrasse et celle issue de la salle à manger. La fréquentation du plan d'eau est liée uniquement à la terrasse.

Enfin, avec un facteur de renouvellement de la clientèle par table et par jour et avec une dépense moyenne pour une consommation légère (boissons, glaces, desserts) ou pour un repas complet, le chiffre d'affaires journalier maximal (week-end en été) de la terrasse est calculé en fonction de sa capacité. Les facteurs de la première étape sont utilisés pour le calcul du chiffre d'affaires des autres jours de l'année.

Sur la base de la fréquentation de la terrasse, la fréquentation journalière du plan d'eau est calculée par un facteur multiplicatif.

Le fonctionnement du modèle est calé, en ajoutant le chiffre d'affaires de la salle à manger, sur le chiffre d'affaires annuel total du restaurant. Le modèle est validé par la comparaison de l'évolution du chiffre d'affaires calculé avec celui réellement encaissé.

5.9.4.2 Modèle de transfert

Afin de transposer la fréquentation d'un site à un autre, le modèle de transfert compare, d'une part, les activités des deux sites et leur attractivité relative. D'autre part, il tient compte de la répartition de la population autour de chacun des sites et les distances à parcourir pour s'y rendre. Enfin, dans le cas de l'aménagement à buts multiples, il applique des facteurs de réduction liés à la température du réservoir ainsi qu'à ses battements.

La fréquentation d'un site en fonction des activités qui lui sont liées peut être directement déduite des questionnaires. Pour un site donné, il est donc possible de calculer l'attractivité de chaque activité. Le modèle ajoute par un facteur linéaire l'attractivité des activités supplémentaires. Ce facteur est calculé à partir d'un autre site référant, similaire au premier et qui offre l'activité en question. L'absence d'une activité par rapport au site de référence est directement déduite des questionnaires. Le tableau 5.18 illustre par un exemple le calcul du facteur de transfert lié aux activités.

TAB. 5.18: Facteur de transfert lié aux activités

Activité	Référence	Projet	Facteur
Pêche	oui	oui	100 %
Pêche	oui	non	- 8 %
Voile	non	oui	+ 3 %
Total			95 %

Le modèle de transfert lié à la distribution de la population autour de l'aménagement de loisirs suit la méthode des surfaces isochrones (Brainard et al., 1997; Point, 1999). Cette méthode admet une relation linéaire entre la taille de la population d'une zone et la fréquentation sur le site. A condition de connaître la fréquentation des zones relatives pour un site de référence, la méthode permet de calculer la fréquentation d'un autre site dont la taille de la population des zones est connue. Sur la base du modèle de fréquentation (c.f. paragraphe 5.9.4.1), un facteur global ajuste la fréquentation mesurée par les questionnaires à celle calculée par le modèle. Ce facteur global est également admis constant entre le site de référence et le site étudié.

La température est prise en compte à l'aide de deux bornes inférieures. La première constitue un filtre météorologique avec la température de l'air ambiant. La seconde constitue un filtre aquatique avec la température de l'eau dans le réservoir. Si ces deux températures minimales ne sont pas respectées (14°C pour l'eau et 22°C pour l'air), le modèle ramène le nombre de visites journalières à une valeur nulle. Ces températures sont mesurées à midi.

Le battement du réservoir est également pris en compte comme un facteur réducteur. Mesuré entre 12h00 et 17h00, ce facteur vaut 1 si la différence des niveaux est inférieure à 30 cm ; si elle est supérieure à 1 m, le facteur prend la valeur nulle (nombre de visiteurs journalier réduit à zéro). Entre ces deux valeurs (30 cm et 1 m), la variation est linéaire. Cette réduction, appliquée à l'ensemble du modèle social, est cependant surtout valable pour les activités aquatiques.

5.9.5 Variables internes d'entrée et sortie des modèles sociaux

Les variables d'entrée des modèles sociaux sont liées aux réponses des questionnaires. Toutefois, elles peuvent être résumées comme suit :

Pour le modèle de calcul de la valeur sociale :

- le coût kilométrique ;
- le ratio du coût horaire ;
- pour chaque personne interrogée :
 - le lieu de l'enquête ;
 - la date de l'enquête ;
 - les conditions météorologiques du jour de l'enquête ;
 - le lieu d'origine de la personne interrogée ;
 - la catégorie professionnelle de la personne interrogée ;
 - le nombre de personnes accompagnant la personne interrogée dans son trajet ;
 - pour chaque activité du site étudié, la fréquence d'application de la personne interrogée.

Pour le modèle de fréquentation :

- toutes les données relatives au chiffre d'affaires du restaurant de référence, soit :
 - la capacité de la terrasse ;
 - les dépenses moyennes sur la terrasse (restauration légère ou repas) ;
 - le taux de rotation de la terrasse pour une journée pleine ;
 - la répartition des jours selon la semaine et les saisons ;
 - les facteurs de transfert entre les différents jours ;
 - le facteur multiplicatif entre la terrasse et la fréquentation totale (ce facteur revient à admettre un pourcentage de clients parmi les personnes présentes sur le site) ;
 - dans le cas particulier du restaurant étudié, la capacité de la salle à manger et son taux d'occupation ;
- la population résidante des zones autour du site de référence ;
- la population résidante des zones autour du site étudié ;
- les températures limites de l'air et du réservoir. Les températures effectives de l'air et du réservoir sont respectivement mesurées et calculées par le modèle thermique (c.f. paragraphe 5.7) ;
- les battements limites (inférieurs et supérieurs). Les battements effectifs sont calculés par le modèle hydraulique (c.f. paragraphe 5.6).

La variable de sortie du modèle de calcul de la valeur sociale est le prix unitaire de la visite (P_{visite}). La variable de sortie du modèle de fréquentation est la fréquentation journalière du site étudié, concrétisée par le vecteur F_j .

5.9.6 Application des modèles sociaux au cas d'étude

L'application des deux modèles sociaux est basée sur une enquête réalisée par la *Haute École Valaisanne*, institut *Économie et Tourisme*, auprès de plus de 200 personnes. Les interviews ont été menées durant l'été 2005 sur l'ensemble du territoire valaisan dans les sites de loisirs aquatiques (Déléroz and Chevrier, 2006). L'étude du site de référence est basée sur un ensemble d'informations reçues directement du propriétaire du restaurant des lieux (Luyet, 2006).

5.9.6.1 Calcul de la valeur sociale

L'application du modèle de calcul de la valeur sociale de l'aménagement de référence permet d'aboutir à des prix relativement homogènes. Les différences sont dues au petit nombre de données utiles pour chacun des calculs. Les calculs sont effectués en ne considérant que les activités communes aux sites comparés soit la baignade, la barque ou la pêche.

Le modèle est tout d'abord appliqué au site des Iles de Sion. Le tableau 5.19 résume les principales données.

TAB. 5.19: Principales données du modèle du coût des transports appliqué aux Iles de Sion

No	Distance km	Temps min	Visites effectuées -	Coût CHF	Visites calculées -
1	5	22	13	3	16
2	5	22	13	14	15
3	5	22	18	15	22
4	5	22	33	4	22
5	15	31	26	14	28
6	12	25	22	13	23
7	22	36	22	23	25
8	19	39	12	44	11
9	19	31	23	20	19
10	5	22	6	16	9
11	5	22	9	9	18
12	5	22	9	11	9
13	5	22	43	9	41
14	5	22	16	16	9
Moyenne	9.4	25.7	18.9	15.2	18.9

Les nombres moyens de visites effectuées et calculées sont identiques. La corrélation entre les deux vecteurs, mesurée par r^2 , vaut 0.77. Cette bonne corrélation peut s'expliquer par le faible nombre de données et, relativement, par le grand nombre de variables explicatives.

L'intégrale de la fonction de coût (équation 5.56) conduit à une valeur monétaire de 814 CHF par visiteur et par année. Cette valeur divisée par le nombre annuel moyen de visites ramène le prix de la visite à 43 CHF.

Le même modèle appliqué au site de baignade du *Bouveret* (Lac Léman, Suisse) donne une valeur annuelle par visiteur de 894 CHF ce qui, divisée par le nombre moyen de visites, conduit à un prix unitaire de 43 CHF. Le site étant plus attractif (lac naturel d'envergure supérieure), le nombre de visites par visiteur est également supérieur (environ 21 visites par visiteur). La différence observée sur la valeur est ainsi réduite sur le prix unitaire.

Enfin, le modèle est appliqué sur l'ensemble des données relatives aux plans d'eau en Valais. Les résultats sont encore similaires avec une valeur total de 853 CHF pour un prix de la visite de 46 CHF.

La comparaison de ces prix avec ceux trouvés par Buchli et al. (2003) et par Baranzini and Rochette (2006) appuie les résultats trouvés dans cette application. Les premiers donnent une valeur de 925 CHF pour les activités de loisirs sur la rivière *Tessin*. Les seconds estiment la valeur touristique du *Bois de Finges* entre 1'135 et 1'540 CHF. Les prix calculés ici, compris entre 800 et 900 CHF, semblent raisonnables.

Il convient de rappeler que le prix calculé de la visite (46 CHF) correspond au coût théorique que le visiteur consent à payer pour se déplacer. S'il s'agit d'une valeur minimale, il est cependant difficile d'en déduire une valeur de revenu économique pour l'aménagement comme par exemple un prix d'entrée (Baranzini and Rochette, 2006). Il s'agit plutôt pour les utilisateurs de la valeur associée à l'aménagement.

La méthode utilisée ne permet pas de prendre en considération l'existence de sites de substitution. Elle ignore également l'existence des utilisateurs éloignés. Ces deux effets, antagonistes, sont estimés par Point (1999) comme étant du même ordre de grandeur (environ 30 %) et n'ont donc conjointement pas d'effet.

5.9.6.2 Calcul de la fréquentation

Le modèle de fréquentation du restaurant des Iles de Sion présente les caractéristiques données au tableau 5.20. Les informations obtenues sur l'évolution du chiffre d'affaires sont données dans le tableau 5.21. Les chiffres donnés dans ces deux tableaux sont directement tirés de Luyet (2006).

Sur la base des tableaux 5.20 et 5.21, l'évolution calculée du chiffre d'affaires est donnée au tableau 5.22.

La comparaison entre l'évolution du chiffre d'affaires calculé et du chiffre d'affaires mesuré est donnée au tableau 5.23. Les résultats concordants de cette comparaison font donc office de validation des chiffres donnés dans les tableaux 5.20 et 5.21.

Moyennant un ratio de 3 entre les clients du restaurant et les visites du site, le taux journalier de fréquentation est calculé sur la base du tableau 5.20. Il est donné, par jour type, au tableau 5.24. Le ratio de 3, probablement trop faible (pris comme un facteur multiplicatif pour calculer le nombre de visites à partir du nombre de clients), place le modèle du côté de la sécurité. Il est estimé entre 4 à 5 par Luyet (2006). La multiplication entre la fréquentation du site et le nombre de jours conduit à 146'200 visites par années.

TAB. 5.20: Principales caractéristiques du restaurant des Iles de Sion

Capacité d'accueil du site	4'000	personnes
Capacité de la terrasse	200	places
Taux rotation été pour consommation légère	5	
Dépense consommation légère	6	CHF
Taux rotation été pour repas	1.5	
Dépense repas	30	CHF
Facteur week-end - semaine	4	
Durée été	8	semaines
Facteur été - mi saison	4	
Durée mi-saison	12	semaines
Facteur été - hiver	60	
Durée hiver	32	semaines
Capacité de la salle à manger	400	places
Nombre annuel de couverts	30'000	repas
Facteur été - reste année, pour la salle	2	
Taux d'occupation salle	85	%

TAB. 5.21: Principales caractéristiques du chiffre d'affaires du restaurant des Iles de Sion

Chiffre d'affaires annuel	1.5	10 ⁶ CHF
Chiffre d'affaires de la terrasse	40	%
Chiffre d'affaires de la salle	60	%
Pourcentage du chiffre sur l'hiver	30	%
Pourcentage du chiffre été+mi-saison	70	%

TAB. 5.22: Evolution calculée du chiffre d'affaires du restaurant des Iles de Sion

Saison	Terrasse		Salle à manger		Total	
Eté	390'000 CHF	69 %	294'100 CHF	31 %	684'100 CHF	45 %
Mi-saison	146'250 CHF	26 %	220'570 CHF	23 %	366'820 CHF	24 %
Hiver	26'000 CHF	5 %	441'150 CHF	46 %	467'150 CHF	31 %
Total	562'250 CHF	37 %	955'825 CHF	63 %	1'518'075 CHF	100 %

TAB. 5.23: Comparaison du chiffre d'affaires mesuré et calculé du restaurant des Iles de Sion

Elément	Mesuré		Calculé		Différence
Chiffre affaire annuel	1'500'000	CHF	1'518'075	CHF	1.2 %
Pourcentage terrasse	40	%	37	%	7.5 %
Pourcentage hiver	30	%	31	%	3.3 %

TAB. 5.24: Fréquentation du site des Iles de Sion

Eté week-end	3900	visites/jour
Eté semaine	975	visites/jour
Mi-saison week-end	975	visites/jour
Mi-saison semaine	244	visites/jour
Hiver week-end	65	visites/jour
Hiver semaine	16	visites/jour

Le modèle de transfert lié aux activités ajoute, pour le site du cas d'étude par rapport au site des Iles de Sion, un pourcentage lié à l'activité des barques (pédalo, petite barque à voile et à rame). Ce pourcentage, calculé sur la base des questionnaires, vaut 8 %.

Le modèle de transfert lié à la distribution de la population autour de l'aménagement divise l'espace en trois zones concentriques. Ces zones sont définies par équidistance à l'aménagement. Les distances utilisées pour le découpage sont 5, 15 et 25 km. Le tableau 5.25 répartit le nombre total de visites par personne interrogée des Iles de Sion sur les trois zones (160, 48, 57). Le nombre total de visites par zone est admis proportionnel au produit du nombre de visites mesurées multiplié par la population. Le facteur d'ajustement, d'une valeur de 77, permet de réduire la somme des visites calculées des trois zones. Cette somme est ajustée avec le nombre de visites calculées à partir du restaurant des Iles de Sion.

TAB. 5.25: Provenance des visiteurs du site de référence

Rayon	Visites	Population	Visites calculées	Facteur
0 - 5	160	37'900	78'687	77
10 - 15	48	43'830	27'299	77
15 - 25	57	54'350	40'199	77
Total			146'185	
Restaurant			146'185	

La transposition spatiale est obtenue par application linéaire avec la même discrétisation en trois zones concentriques autour du site étudié. Le tableau 5.26 aboutit au facteur de transfert.

TAB. 5.26: Provenance des visiteurs du site étudié

Rayon	Visites	Population	Visites calculées	Facteur
5	160	12'520	25'994	77
15	48	61'800	38'492	77
25	57	38'100	28'180	77
Somme		100 %	92'666	
Voile		+8 %	100'080	
Facteur de transfert			68.5 %	

Finalement, l'application du facteur de transfert (tableau 5.26) sur le tableau 5.24 permet de calculer pour chaque jour-type le nombre de visiteurs attendus. Ces nombres sont donnés au tableau 5.27. La seconde colonne donne les valeurs considérées pour la suite du calcul. Elles sont un peu plus prudentes, notamment pour les jours de forte affluence.

TAB. 5.27: Fréquentation du site étudié (calculé, arrondi)

Été week-end	2'670	2'500	visiteurs/jour
Été semaine	667	670	visiteurs/jour
Mi-saison week-end	667	670	visiteurs/jour
Mi-saison semaine	167	160	visiteurs/jour
Hiver week-end	44	45	visiteurs/jour
Hiver semaine	11	11	visiteurs/jour

L'application de ces valeurs sur le modèle de simulation, avec les limites de température (air et eau) ainsi que celles imposées par le battement du niveau d'eau, diminue le nombre total

de visiteurs (initialement 100'000 visites annuelles réduit environ de moitié). La figure 5.43 illustre la fréquentation du site avec les températures mesurées de l'air et les températures calculées de l'eau dans le réservoir.

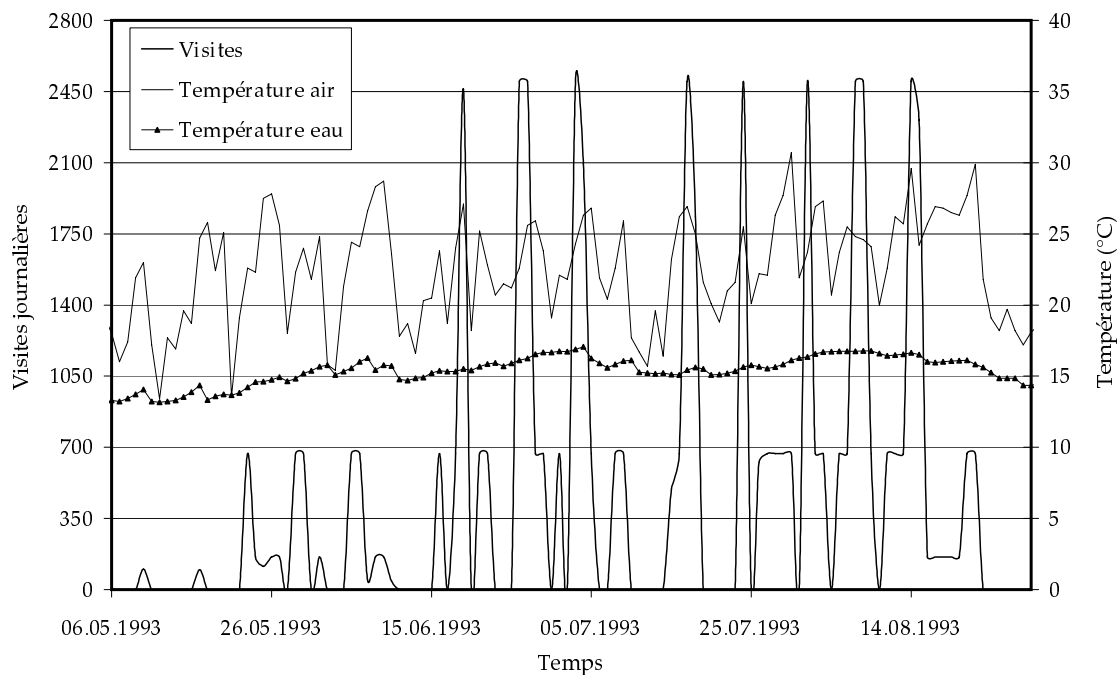


FIG. 5.43: Evolution calculée de la fréquentation du site au cours de l'été 1993

Les températures limites de fréquentation sont 22°C pour l'air et 14°C pour l'eau. Le nombre total de visites, calculé sur la base de l'année 1993, est de 54'500. Avec le prix unitaire de la visite calculé à 46 CHF, l'aménagement représente une valeur annuelle de $2.5 \cdot 10^6$ CHF. Ce montant est d'un ordre de grandeur comparable aux revenus annuels de la production d'énergie ($3.8 \cdot 10^6$ CHF).

Les pointes estivales de forte fréquentation se démarquent facilement sur la figure 5.43. L'absence de l'une d'entre elles (week-end du 10-11 juillet) est due à la faible température de l'air. Les battements du réservoir ont un faible impact sur le taux de fréquentation. Pendant la période estivale, ils sont en effet peu marqués.

5.10 Modèles financiers : Estimation de l'investissement et des revenus

5.10.1 Objectifs des modèles financiers

La faisabilité de tout projet requiert, comme première condition nécessaire, sa viabilité économique. Celle-ci dépend directement des coûts d'investissement nécessaires à la réalisation du projet ainsi que des revenus annuels qu'il dégage.

La comparaison de ces montants financiers n'est pas directement possible. Il faut soit transformer le coût d'investissement initial en un coût financier annuel, soit transformer les revenus annuels de l'ensemble des années de fonctionnement en une seule valeur actualisée à la date de l'investissement.

La première transformation nécessite un modèle de financement dont les paramètres sont :

- le mode de financement ;
- le taux d'emprunt ;
- la durée de l'emprunt ;
- la part de fonds propres.

La seconde transformation nécessite un modèle d'actualisation dont les paramètres sont :

- le taux d'actualisation ;
- la durée d'amortissement ;
- la valeur résiduelle de l'aménagement.

Dans les deux transformations, les résultats sont dépendants, pour le calcul des revenus, de l'évolution des prix du marché.

Afin d'éviter ces hypothèses et leurs incertitudes, les coûts ne sont pas comparés aux revenus. L'analyse se focalise sur les coûts d'investissement et les produits délivrés (réduction de marnage, production d'énergie, réduction des crues, ...). Le calcul des revenus est donné à titre indicatif. Le chapitre 6^{ème} présente en détail la méthode développée pour éviter cette comparaison.

5.10.2 Modèle développé d'estimation de l'investissement

Le modèle de calcul de l'investissement est basé sur un ensemble de coûts unitaires. Le coût total est calculé par l'addition des produits entre les coûts unitaires et les quantités relatives requises. Ces quantités sont calculées en fonction des variables de taille de l'aménagement. La procédure admet un prix unitaire indépendant de la quantité. Cette hypothèse est raisonnable puisque des quantités importantes sont nécessaires à la réalisation d'aménagements même de taille réduite.

Les coûts liés à l'intégration dans le paysage, les frais d'étude et les frais administratifs, ainsi que les frais d'installation de chantier sont calculés au prorata du coût total. Les frais d'étude prennent en considération un pourcentage pour les divers et les imprévus. Les frais financiers admettent un investissement constant durant le temps de construction.

Le calcul des coûts est divisé en trois étapes. Il calcule les quantités dans une première étape, il lit dans un fichier les coûts unitaires dans une seconde étape et il effectue le produit dans une troisième étape. Chaque étape est divisée selon les composants de l'aménagement.

La division du calcul du coût de construction selon les parties constitutives de l'aménagement correspond à la manière habituelle de procéder soit des ingénieurs, soit des entrepreneurs. Cette façon donne une grande modularité au calcul. Des aménagements de tailles différentes ou des aménagements partiels sont ainsi aisément calculés.

5.10.2.1 Calcul des quantités

1. Le réservoir est le premier composant de l'aménagement. Ce dernier est admis rectangulaire. La longueur et la largeur sont calculées par addition de :
 - la longueur ou la largeur du fond de la retenue ;
 - la largeur totale des pieds des digues ;
 - une valeur fixe de 10 m pour inclure le contre-canal.

La surface correspond au produit de la longueur par la largeur, soit à l'emprise totale de l'aménagement. L'excavation initiale de la couche végétale et, au besoin, d'une épaisseur supplémentaire est calculée avec cette surface.

2. Le second composant surfacique de l'aménagement est constitué par la zone d'épanchement. Cette dernière est définie par trois variables :
 - la longueur de la zone d'épanchement ;
 - la largeur de la zone d'épanchement ;
 - la hauteur de la zone d'épanchement.

Toutefois, seule la surface occupée par les digues de la zone d'épanchement est achetée et traitée (excavation initiale).

3. Le troisième composant de l'aménagement contient l'ensemble des digues (neuves ou surélevées). Il s'agit des digues autour du réservoir (l'une d'elles est partagée avec le cours d'eau et comptée avec ce dernier), de la surélévation potentielle des digues du cours d'eau à l'amont ainsi que des digues de la zone d'épanchement. Les digues sont toutes définies par une section trapézoïdale.

Les digues du réservoir ont chacune une pente variable (bi-linéaire) du côté de l'eau et une pente fixe du côté opposé. La largeur du couronnement constitue une variable unique pour toutes les digues du réservoir, habituellement fixée à 4 m (valeur mesurée sur le Rhône valaisan). Le réservoir possède une pente naturelle dans le sens du cours d'eau (0.06 % en moyenne dans la plaine valaisanne du Rhône). Les digues en tiennent compte pour le calcul de leur volume. La hauteur des digues tient également compte de la revanche (1 m) ainsi que de la partie en-dessous du niveau de la plaine. Le volume des trois digues du réservoir (la quatrième appartient au cours d'eau) est calculé par le produit de la section émergente par sa longueur respective.

Le volume des digues du cours d'eau amont tient compte de la différence entre l'état existant et l'état futur. Le calcul de la surélévation nécessaire tient compte de la revanche, de la courbe de remous amont (admise horizontale) ainsi que de la pente de la plaine. Le volume de surélévation est calculé par différence sur la base de sections trapézoïdales.

Le volume des digues de la zone d'épanchement suit la même logique que celle du réservoir. Toutefois, ces digues sont uniquement émergentes. Elles considèrent une revanche qui peut être différente de celle des digues du réservoir (0.5 m). La pente

latérale est par ailleurs constante et équivalente des deux côtés de la digue. Le calcul des digues de la zone d'épanchement ne considère que trois côtés. Le quatrième est commun avec le réservoir et compté avec celui-ci.

Un voile d'étanchéité est construit sous les digues du réservoir et du cours d'eau amont. Ce voile est considéré comme un élément linéaire dont l'unique variable correspond à sa longueur cumulée.

4. Les contre-canaux sont juxtaposés au réservoir et sont de la même longueur que les digues de ce dernier. Ils sont conçus comme un élément linéaire ayant une largeur et une profondeur constantes.
5. Le barrage en rivière est constitué de 4 éléments qui sont :
 - le volume de béton nécessaire pour la semelle ;
 - le volume de béton nécessaire pour le barrage lui-même ;
 - le voile d'étanchéité sous ce dernier ;
 - les vannes de fermeture.

Le volume de béton de la semelle est calculé comme un parallélépipède. Il vaut le produit de son épaisseur, de la longueur du barrage augmentée de 60 m (sens longitudinal du cours d'eau) et de la largeur du barrage (sens transversal du cours d'eau).

Le volume de béton du barrage est calculé par différence. Le premier volume calculé est le parallélépipède plein (hauteur, largeur, épaisseur du barrage). Le second volume calculé, soustrait du premier, est le volume de vide des passages vannés. La différence donne le volume de béton nécessaire.

Le voile d'étanchéité sous le barrage est considéré comme un élément linéaire. Sa seule variable est la largeur du barrage.

Les vannes de fermeture sont calculées par leur poids d'acier. Chaque passage vanné est équipé d'une vanne segment et de deux vannes batardeaux. Le poids des vannes est calculé selon les relations données par Erbiste (1984). Dans le cas où la charge est équivalente à la hauteur de l'élément (barrage en rivière) et avec une marge de 20 % pour les parties mécaniques incorporées dans la structure en béton, le poids de la vanne segment (G_{seg}) peut être estimé par l'équation 5.58.

$$G_{seg} = 0.8376 * (W h_v)^{1.346} \quad (5.58)$$

où W est la largeur de la vanne et h_v la hauteur de la vanne. Une relation similaire, tirée du même auteur, est donnée à l'équation 5.59 pour le poids de la vanne batardeau.

$$G_{bat} = 0.5533 * (W h_v)^{1.432} \quad (5.59)$$

Le poids des batardeaux donné à l'équation 5.59 tient déjà compte du doublement nécessaire (vannes amont et aval). Le poids total d'une vanne correspond ainsi à l'addition du poids de la vanne segment et des vannes batardeaux.

Le nombre de vannes considéré est augmenté d'une unité afin de placer un organe de contrôle (la porte du paragraphe 5.5.3.3) entre le cours d'eau et le réservoir.

6. La centrale de production énergétique est divisée en deux parties. La première est constituée des éléments de génie civil et la seconde des éléments électro-mécaniques. La seule variable de ces deux parties est la puissance installée de l'aménagement.

7. La rivière de contournement est constituée d'un cours d'eau et de bassins intermédiaires. La longueur du cours d'eau est calculée avec une pente constante entre le niveau d'eau amont maximal et le niveau d'eau aval. Cette différence correspond la hauteur de l'aménagement diminuée de 1.5 m. Cette diminution correspond à la hauteur d'eau minimale habituellement présente dans le cours d'eau aval.

Les bassins intermédiaires servent de réservoir pour alimenter le cours d'eau lorsque le niveau amont dans le réservoir est trop bas et ne permet plus une connexion directe. Ces bassins sont également des zones de repos pour les animaux aquatiques qui remontent le cours d'eau principal.

5.10.2.2 Prix unitaires

Les coût unitaires sont résumés dans le tableau 5.28. La numérotation du tableau suit celle donnée pour le calcul des quantités.

5.10.2.3 Calcul de l'investissement

Le calcul de l'investissement consiste à multiplier les coûts unitaires par les quantités calculées. Les paragraphes ci-après donnent quelques indications supplémentaires sur ces calculs.

1. Le coût de base du réservoir est obtenu par la multiplication de la surface totale de ce dernier par le prix d'achat de la surface. Le coût du traitement de la surface et de l'excavation s'y ajoute. Cette excavation permet de ramener le niveau du fond du réservoir à celui du fond du cours d'eau. Le traitement de surface représente la pose possible d'une couche d'étanchéité sur le fond du réservoir.
2. Le coût de la zone d'épanchement correspond à l'achat de la surface occupée par ses digues. Le coût de l'excavation de cette surface est calculé avec une hauteur de 2 m (couche de terre végétale).
3. Le calcul du coût des digues est basé sur leur volume fictif. Ce volume additionne les digues du réservoir, les digues de la zone d'épanchement et les digues de la surélévation du cours d'eau. Le volume de surélévation des digues du cours d'eau est majoré (facteur de majoration du tableau 5.28) pour tenir compte de la difficulté liée à la mise en place d'un volume de remblai sur une digue existante.
4. Le coût des contre-canaux est le produit de la longueur par le coût unitaire.
5. Le coût du barrage est constitué de la somme des coûts de ses éléments (semelle, structure, voile, vannes).
6. Le coût de la centrale de production additionne le coût des parties de génie civil et celui des équipements électro-mécaniques. Le coût du génie civil vaut le produit de la puissance installée par le coût unitaire. Le coût des machines est calculé avec la relation statistique développée par Siervo and de Leva (1976).

Les courbes sont calées pour un aménagement de 8 m de chute et de 15 MW de puissance. Sur cette base et avec des fonctions logarithmiques, le coût unitaire électro-mécanique ($C_{em,US}$ en kW) est donné par l'équation 5.60. Il est exprimé en dollars américains de l'année 1974. Les valeurs "200" et "300" résultent du calage sur la relation statistique de Siervo and de Leva (1976).

TAB. 5.28: Prix unitaires en CHF

1	Réservoir	
	Achat de la surface	10.- CHF/m ²
	Excavation	5.- CHF/m ³
	Traitement de la surface	0.- CHF/m ²
2	Zone d'épanchement	
	Achat de la surface	10.- CHF/m ²
	Excavation	5.- CHF/m ³
	Traitement de la surface	0.- CHF/m ²
3	Digues	
	Remblai	50.- CHF/m ³
	Majoration	25 %
	Voile d'étanchéité	6'000.- CHF/m
4	Contre-canaux	
	Contre-canal	500.- CHF/m
5	Barrage en rivière	
	Béton de la semelle	500.- CHF/m ³
	Béton de la structure	800.- CHF/m ³
	Voile d'étanchéité	2'000.- CHF/m
	Acier des vannes	30.- CHF/kg
6	Centrale hydroélectrique	
	Génie civil	1'000.- CHF/kW
7	Rivière de contournement	
	Rivière	10'000.- CHF/m
	Bassin de repos	50'000.- CHF/bassin
8	Installations de chantier	
	Installations	10 % sur total
9	Intégration architecturale et écologique	
	Architecture technique	5 % barrage et centrale
	Architecture digues	5 % digues et contre-canaux
	Ecologie digues	5 % digues et contre-canaux
	Bâtiment loisirs	10 ⁶ CHF
10	Etudes et administration	
	Etude d'impact	3 % sur total
	Etudes GC et divers	15 % sur total
	Imprévus	15 % sur total
11	Finance	
	Taux d'inflation	1 %
	Taux intercalaire	4 %

$$\ln C_{em,US} = \frac{\ln 200 - \ln 300}{\ln 100 - \ln 10} (\ln P_{el} - \ln 10) + \ln 300 \quad (5.60)$$

où P_{el} est la puissance électrique de l'aménagement. La transformation des dollars américains en francs suisses (2003), l'augmentation des coûts de la matière première (environ + 15 %) et la prise en compte des exigences suisses (environ + 50 %) conduit à l'équation 5.61 où C_{em} est le coût électro-mécaniques unitaire en CHF actuel (CHF/kW).

$$C_{em} = 6045 (P_{el})^{\log_{10} \frac{2}{3}} \quad (5.61)$$

Le coût total ($C_{em,tot}$) des machines hydro-mécaniques est donné par l'équation 5.62. Il prend en compte une réduction de 5 % liée à la présence de deux groupes identiques.

$$C_{em,tot} = 5.743 \cdot 10^6 (P_{el})^{1+\log_{10} \frac{2}{3}} \quad (5.62)$$

7. Le coût de la rivière de contournement additionne le coût linéaire à celui des bassins. Pour une chute utile maximale d'environ 7 m, avec une pente de 2 %, la rivière de contournement a une longueur développée de 350 m. Il est prévu de construire sur cette longueur deux bassins de repos.
8. Le coût des installations de chantier est calculé sur l'ensemble des 7 coûts précédents (réservoir, épanchement, digues, contre-canaux, barrage, centrale et rivière de contournement). Il constitue un 8^{ème} coût indépendant.
9. Les coûts d'intégration sont calculés sur leurs objets respectifs sans tenir compte des coûts d'installation de chantier. Le coût de "loisirs" représente un montant fixe pour la construction d'installation de loisirs (place de jeux, banc) ainsi que de détente (buvette, terrasse attenante). Les coûts d'intégration constituent un 9^{ème} coût indépendant.
10. Les coûts d'étude portent sur les 9 coûts précédents. Ils sont calculés comme un premier facteur de majoration global. Ce facteur (F_{etu}) est donné à l'équation 5.63.

$$F_{etu} = (1 + F_{impact} + F_{GC}) * (1 + F_{imprevus}) \quad (5.63)$$

où F_{impact} est le facteur multiplicatif lié aux études d'impact, F_{GC} le facteur multiplicatif lié aux études de génie civil et $F_{imprevus}$ le facteur multiplicatif lié aux imprévus.

11. Les coûts financiers sont liés à l'inflation durant la construction ainsi qu'aux intérêts intercalaires sur cette même période. Ces deux coûts admettent un investissement constant sur la période de construction. Les coûts financiers sont calculés comme un second facteur de majoration global. Le facteur financier (F_{fin}) est donné à l'équation 5.64.

$$F_{fin} = 1 + \frac{D_{constr} T_{int}}{2} + \frac{D_{constr}^2 T_{int} T_{infl}}{4} \quad (5.64)$$

où D_{constr} est la durée de construction de l'aménagement, T_{int} le taux d'intérêt intercalaire et T_{infl} le taux d'inflation.

Finalement, le coût des 9 objets précédemment calculés est multiplié consécutivement par le facteur d'étude et le facteur financier. Le coût d'investissement total est ensuite obtenu par addition de ces 9 coûts de construction majorés.

5.10.3 Variables internes d'entrée et sortie du modèle d'investissement

Les variables d'entrée du modèle de calcul de l'investissement sont nombreuses. Ce sont, d'une part, toutes les variables de taille de l'aménagement (taille du réservoir et de la zone d'épanchement, hauteur du barrage, débit équipé de la centrale) et, d'autre part, toutes les variables données dans le tableau 5.28 sous forme de coûts unitaires.

Les variables de sortie du modèle se résument au coût des 9 éléments constitutifs (réservoir, épanchement, digues, contre-canaux, barrage, centrale, rivière de contournement, installations de chantier et intégration de l'ouvrage). Ces 9 coûts sont finalement intégrés par addition en un seul, le coût total.

5.10.4 Modèles de calcul des revenus

Le modèle de calcul des revenus est basé sur les gains économiques directs de l'aménagement. Ceux-ci sont constitués par les impacts sur les crues, la production d'énergie et l'attractivité sociale. Ces trois aspects sont développés directement dans leur paragraphe respectif (c.f. paragraphes 5.5.5, 5.8.6, 5.9.6.1).

Ces revenus ne sont cependant pas directement comparables. Ceux liés aux crues représentent une économie d'investissement. Ceux liés à la production d'énergie sont un chiffre d'affaire annuel. Enfin, ceux liés à l'attractivité sociale, difficile à chiffrer, représente un prix que les visiteurs sont prêts à dépenser pour un tel aménagement.

Ces trois revenus sont agrégés par la technique de l'actualisation. Avec un taux (T_{act}) et une durée d'actualisation (D_{act}), les revenus peuvent être actualisés à la date d'investissement par l'équation 5.65.

$$R_A = \sum_{a=1}^{D_{act}} \frac{R_t}{(1 + T_{act})^a} \quad (5.65)$$

où R_t est le revenu considéré de l'année a et R_A la somme des revenus actualisés.

5.10.5 Variables internes d'entrée et sortie du modèle des revenus

Les deux variables internes d'entrée du modèle des revenus sont le taux (T_{act}) et la durée d'actualisation (D_{act}).

La seule variable de sortie est la valeur actualisée des revenus (R_A). Cette valeur inclut les revenus liés à la production d'énergie, l'utilisation sociale de l'aménagement et le gain associé à la protection contre les crues.

5.10.6 Application des modèles financiers au cas d'étude

Sur la base de l'aménagement standard dont les dimensions sont rappelées au tableau 5.29, le modèle des coûts donne, au tableau 5.30, les valeurs des différents éléments constitutifs de l'aménagement. Les coûts des neuf éléments constitutifs tiennent compte des majorations liées aux frais d'étude et des imprévus ainsi que des frais financiers. Ces deux facteurs sont cependant rappelés pour mémoire aux positions 10 et 11.

TAB. 5.29: Dimensions de l'aménagement standard

Surface du réservoir	1	km ²
Hauteur utile	8.68	m
Débit équipé de la centrale	200	m ³ /s
Débit de la rivière de contournement	5	m ³ /s
Débit de la digue perméable	5	m ³ /s
Pente de la rivière de contournement	2	%
Nombre de bassins de repos	2	
Surface de la zone d'épanchement	1	km ²
Hauteur de la zone d'épanchement	3	m

TAB. 5.30: Coûts d'investissement de l'aménagement standard en 10⁶CHF, en pourcentage et pourcentage cumulé du coût total

1	Réservoir	50.5	20 %	20 %
2	Epanchement	1.4	1 %	21 %
3	Digues	77.6	31 %	52 %
4	Contre-canaux	3.1	1 %	53 %
5	Barrage	33.9	14 %	67 %
6	Centrale	47.2	19 %	86 %
7	Rivière de contournement	5.4	2 %	88 %
8	Installation de chantier	18.3	7 %	95 %
9	Intégration	11.9	5 %	100 %
10	Facteur d'étude		36 %	
11	Facteur financier		8 %	
	Facteur total		44 %	
	Coût total	249.3		

Les coûts de l'aménagement sont constitués principalement par quatre positions. Ce sont, par ordre d'importance, les coûts liés aux digues (31 %), l'acquisition et le traitement de la surface du réservoir (20 %), la construction de la centrale (19 %) et celle du barrage en rivière (14 %). On retrouve, comme au paragraphe 4.2.5.1, la distinction entre le volume du réservoir lié à la surface et le volume lié à la hauteur. Même si la position des digues comprend celles liées à la zone d'épanchement ($4.96 \cdot 10^6$ CHF, soit 6.4 % des digues), l'augmentation du volume du réservoir est plus économique par un accroissement de surface.

La zone d'épanchement nécessite un investissement faible ($6.32 \cdot 10^6$ CHF, soit 2.5 % du coût total). C'est également une solution qui minimise la place nécessaire (celle liée à ses digues) et qui optimise ainsi l'occupation du sol.

Le calcul des revenus avec le même aménagement et la courbe de tarage du Rhône aval élargi (c.f. figure 5.17) est donné au tableau 5.31. Les revenus liés à la production d'énergie et aux aspects sociaux sont actualisés avec un taux de 4 % sur une période de 50 ans. Ils se répartissent environ à hauteur de 50 % pour l'énergie, 30 % pour le social et 20 % pour les crues. Ces revenus, avant déduction des frais d'exploitation, couvrent 67 % des coûts de l'aménagement. Ceci revient à admettre que les deux objectifs liés à la régulation du marnage aval et à la régulation des battements dans le réservoir doivent couvrir les 33 % restant du coût d'investissement.

TAB. 5.31: Revenus de l'aménagement standard

	Revenu 10 ⁶ CHF	Part du revenu %	Part du coût total %
Electricité annuelle	3.8		
Social annuel	2.5		
Electricité actualisée	82.4	50 %	33 %
Social actualisé	52.8	31 %	21 %
Crues	31.1	19 %	12 %
Total	166.3	100 %	67 %
Ecologie (aval+réservoir)	83.0		33 %
Total	249.3		100 %

5.10.7 Première clé de répartition des coûts

Cette clé de répartition des coûts se base sur une première analyse des coûts et des revenus associés à l'aménagement standard. Elle admet que les frais d'exploitation liés à la production d'énergie (personnel, maintenance et redevance) nécessitent le tiers des revenus énergétiques. La part de l'énergie est ainsi réduite à 23 % (environ $55 \cdot 10^6$ CHF contre $82 \cdot 10^6$ CHF). En conséquence la part de l'écologie augmente à 43 %.

Basée sur les revenus, l'attribution des coûts engendrés forme, pour l'aménagement standard, une première clé de répartition résumée au tableau 5.32. Les positions sont données par ordre croissant.

Cette clé présente trois inconvénients majeurs. Premièrement, elle ne permet pas de distinguer, dans la position "écologie", la part liée au marnage aval de celle liée aux battements du réservoir.

TAB. 5.32: Clé de répartition de l'aménagement standard à Riddes

Crue	12 %
Social	22 %
Energie	23 %
Ecologie	43 %

Deuxièmement, elle est directement liée aux revenus sans tenir compte des coûts engendrés par chacun des objectifs. Il est seulement possible, *a posteriori*, de vérifier que les coûts spécifiques des objectifs ne dépassent pas les revenus qui leur sont liés. Ainsi, les coûts spécifiques liés à la production d'énergie restent inférieurs aux revenus générés malgré les frais d'exploitation (coût de $47 \cdot 10^6$ CHF pour la centrale contre un revenu de $55 \cdot 10^6$ CHF). Le critère de faisabilité économique pour l'objectif énergétique reste donc satisfait. Pour les crues, si les revenus spécifiques sont répartis au prorata du volume, la zone d'épanchement (26 % du volume total) garde également sa faisabilité économique (coût de $6 \cdot 10^6$ CHF pour la zone d'épanchement contre un gain de $8 \cdot 10^6$ CHF).

Troisièmement, une modification des variables de taille génère des revenus ainsi que des coûts différents. Il n'est pas certain que la clé reste constante.

5.11 Modèle écologique

5.11.1 Objectifs du modèle écologique

L'étude qualitative souligne l'importance des impacts écologiques de l'aménagement hydro-électrique à buts multiples. Ces impacts font valoir leurs effets tant au niveau du réservoir que sur la rivière aval. Cette dernière représente toutefois la partie principale où les gains écologiques sont recherchés.

La prise en compte des aspects écologiques dans le modèle de simulation nécessite un modèle écologique fonctionnel. Ce modèle doit, en particulier, être basé sur la même typologie de données (données à base physique avec un pas de temps horaire).

Le modèle écologique fait l'objet d'un développement spécifique. Les résultats obtenus sont synthétisés dans un modèle informatique écrit dans le même langage que les autres modules de simulation (*MatLab*). De la sorte, le module écologique est très facilement intégré dans le schéma global de résolution.

Le modèle écologique est réalisé dans le cadre d'une thèse effectuée parallèlement à ce travail (Pellaud, 2007). Toutefois, pour donner une vue d'ensemble du modèle complet, les traits caractéristiques du modèle écologique sont exposés ci-après. Ce modèle ne s'applique qu'à des systèmes lotiques. Il ne considère donc pas les aspects écologiques du réservoir. Ceux-ci sont résolus, vis-à-vis des battements, par des formes constructives adaptées.

L'application du modèle écologique effectuée ci-après permet de remplacer ce modèle au profit des indicateurs de marnage. La sensibilité est notamment plus fine. Cette finesse est utilisée dans les développements du chapitre 6^{ème}.

5.11.2 Variables internes d'entrée et sortie du modèle écologique

Les variables d'entrée du modèle écologique sont synthétisées par une matrice à 18 colonnes et 8760 lignes. Chaque ligne représente une heure de l'année simulée. Les colonnes donnent, pour chaque heure, les informations sur :

1. le mois de l'année (nombre compris entre 1 et 12) ;
2. le débit dans le cours d'eau (m^3/s) ;
3. la température dans le cours d'eau ($^{\circ}\text{C}$) ;
4. la profondeur moyenne du cours d'eau, en fonction du débit (m) ;
5. la vitesse moyenne dans le cours d'eau (m/s) ;
6. la largeur du lit (m) ;
7. dominance d'enrochement, diamètre supérieur à 200 mm (0 = non, 1 = oui) ;
8. dominance des galets, diamètre compris entre 200 et 20 mm (0 = non, 1 = oui) ;
9. dominance des graviers, diamètre compris entre 20 et 2 mm (0 = non, 1 = oui) ;
10. dominance des sables, diamètre compris entre 2 et 0.02 mm (0 = non, 1 = oui) ;
11. dominance des fines, diamètre inférieur à 0.02 mm (0 = non, 1 = oui) ;
12. la taille moyenne du substrat (m) ;
13. l'index de marnage défini comme la 347^{ème} valeur classée du marnage calculé sur une période de 3 heures (m) ;

14. l'index de marnage de référence ;
15. la variabilité de la largeur du lit (nombre compris entre 1 et 10) ;
16. la variabilité de la profondeur d'eau (nombre compris entre 1 et 10) ;
17. la diversité de la structure du lit (nombre compris entre 1 et 10) ;
18. la distance à la source (km ; nombre compris entre 4 et 160 km).

Le modèle écologique donne, comme résultat, six valeurs d'habitat pour les poissons et un index de richesse prédite pour les macro-invertébrés. Ces sept valeurs sont ensuite agrégées par pondération dans un indicateur global. Cet indicateur représente l'état écologique du cours d'eau.

Les valeurs d'habitat du poisson concernent deux stades de maturation de la truite de rivière (*Salmo trutta fario*) ainsi que quatre guildes. Ces six valeurs sont focalisées sur :

1. la truite juvénile ;
2. la truite adulte ;
3. les mouilles ;
4. les radiers ;
5. les berges ;
6. le cours principal.

Le marnage n'a pas d'impact direct négatif sur les poissons adultes car ils sont normalement doués de la capacité d'apprentissage comportemental. Le phénomène est cependant pris en compte dans le modèle poisson par une réduction de l'habitat potentiel.

Les macro-invertébrés sont synthétisés par les trois classes courantes des milieux lotiques : les Epheméroptères, les Plécoptères et les Trichoptères (*Ephemeroptera*, *Plecoptera* et *Tricoptera*). L'index de richesse prédite EPT intègre directement l'effet du marnage. En particulier, ces trois classes sont choisies en fonction des données faunistiques du Rhône valaisan.

5.11.3 Corrélation avec les indicateurs de marnage

A cause de l'avancement simultané des deux travaux de recherche, l'optimisation, telle que définie dans le chapitre 6^{ème} et appliquée dans le chapitre 7^{ème}, n'a pas pu être effectuée avec le modèle écologique. Ce dernier ne présentait pas, lors de la phase des calculs d'optimisation, un stade d'avancement suffisant pour être utilisé. Les calculs d'optimisation sont donc effectués avec l'indicateur de marnage horaire comme indicateur écologique. Cet indicateur présente l'intérêt d'être applicable à la fois pour la rivière aval et pour le réservoir.

Afin d'assurer la cohérence du travail développé dans les deux recherches, il est nécessaire d'établir la corrélation entre l'indicateur de marnage et l'état écologique prédit par le modèle écologique. Cette corrélation n'est valable que pour la rivière aval (limite d'application du modèle écologique).

L'indicateur hydraulique de marnage utilisé pour l'optimisation du système (c.f. chapitre 7^{ème}) est une simplification de l'indicateur défini par Meile et al. (2005) et présenté au paragraphe 5.4.4 de ce chapitre. L'indicateur utilisé (I_{av}) est défini pour la rivière aval

par l'équation 5.66. Il s'agit de la sommation sur une année entière de toutes les différences horaires du niveau d'eau.

$$I_{av} = \sum_{t=1}^{8760} |h_{av}(t) - h_{av}(t-1)| \quad (5.66)$$

Le marnage fait surtout sentir ses effets sur les macro-invertébrés. Ceux-ci sont limités dans leurs mouvements et ne peuvent pas, à moins d'une variation suffisamment lente, suivre l'oscillation du niveau d'eau. Ils se retrouvent ainsi soit submergés, soit asséchés, ce qui engendre une mortalité importante. Cette mortalité a un effet indirect sur les poissons par le biais de la chaîne alimentaire. Cet effet n'est cependant pas pris en compte par le modèle écologique.

Par itération sur les variables de gestion, le modèle calcule en boucle l'indicateur hydraulique de marnage ainsi que l'index de richesse prédite EPT du modèle écologique. Les deux résultats sont comparés pour l'année 1999 à la figure 5.44. Cette année correspond à un marnage plus marqué (c.f. paragraphe 5.2.6) dû à l'activité temporaire de la centrale de Cleuson-Dixence dotée d'une capacité de turbinage additionnelle de 75 m³/s. Actuellement en réparation, cette installation est appelée à fonctionner de nouveau. Le régime hydraulique de 1999 doit donc devenir, dans un futur proche, le régime ordinaire.

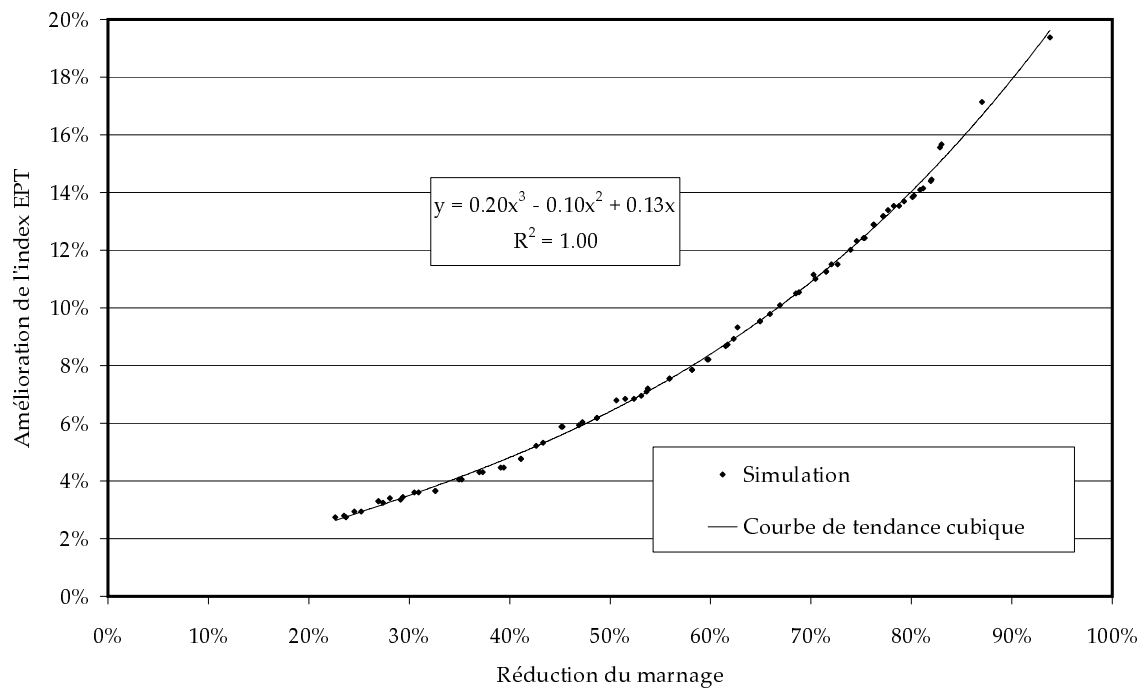


FIG. 5.44: Relation entre le modèle écologique (indicateur EPT) et la réduction du marnage (indicateur de marnage) pour l'année 1999

Avec un indicateur de corrélation supérieur à 99 %, l'indicateur de marnage est représentatif des effets qui lui sont associés. Dans l'espace de réduction de marnage simulé (réduction entre 20 et 90 %), la courbe de tendance est calculée sur la base d'une fonction cubique.

Les mêmes simulations sont effectuées avec une section partiellement élargie (c.f. paragraphe 5.5.2). Les résultats, donnés à la figure 5.45, sont similaires aux précédents. Toutefois pour un degré équivalent de réduction du marnage (environ 90 %), l'augmentation

de l'index EPT atteint environ 14 % contre 19 % pour la section actuelle. Cette différence relative de 5 % correspond à l'amélioration du régime hydraulique liée à l'élargissement de la section.

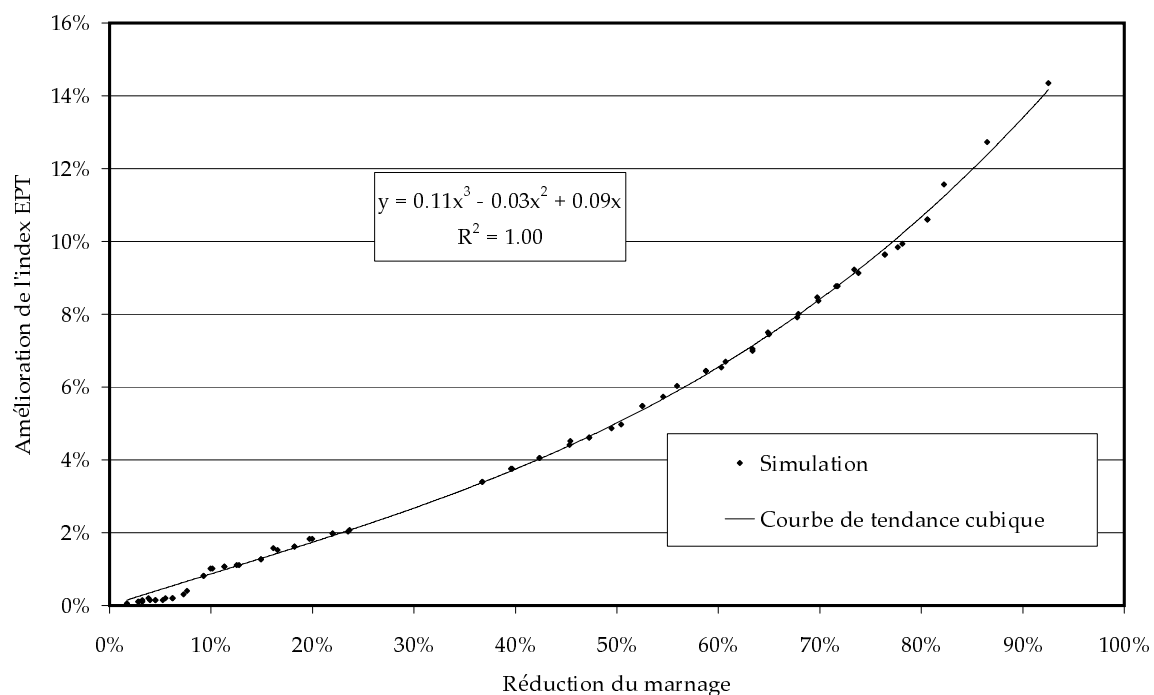


FIG. 5.45: Relation entre le modèle écologique (indicateur EPT) et la réduction du marnage (indicateur de marnage) pour l'année 1999 avec une section aval élargie

5.12 Conclusions

Sur la base des principaux thèmes mis en évidence par les résultats du chapitre 4^{ème}, différents outils de simulation ont été développés. Ce sont, pour mémoire, deux familles de modèles de gestion (gestion ordinaire et gestion des crues) et six modèles de simulation (hydraulique, thermique, énergétique, sociale, financière et écologique). Ces huit modèles, élaborés selon l'architecture proposée à la figure 5.1, permettent de répondre aux exigences posées par les conclusions du chapitre 4^{ème}, à savoir :

- proposer une gestion de l'aménagement qui maximise les indicateurs ;
- quantifier l'impact de l'aménagement sur chaque indicateur ;
- proposer une clé de répartition des coûts de l'aménagement.

Toutefois, les résultats obtenus sont nombreux et difficilement comparables. Malgré un effort important d'agrégation des résultats dans des valeurs uniques (note écologique globale, production annuelle d'énergie, coût total, fréquentation annuelle de l'aménagement, heures supplémentaires de brouillard, ...), la comparaison de variantes reste difficile à effectuer. D'une part, le système obtenu comporte trop d'axes pour se laisser représenter d'une manière conventionnelle. D'autre part, le nombre de variables est suffisamment grand pour que le nombre de combinaisons théoriques possibles explose.

Le modèle des revenus financiers laisse également entrevoir quelques faiblesses. D'une part, il ne permet pas de quantifier le coût ou le revenu de chaque objectif indépendamment. De ce fait, il manque de transparence. D'autre part, la valeur sociale calculée par la méthode du coût des transports est basée sur un nombre restreint de questionnaires. Le montant obtenu nécessite soit des questionnaires supplémentaires, soit une autre justification.

Ce chapitre apporte les réponses aux exigences posées par le précédent. Mais il pose aussi de nouvelles questions. Que vaut chaque objectif ? Et combien rapporte-t-il ? Comment maximiser un objectif ? Quel est le meilleur aménagement parmi les nombreux possibles ? Selon quels critères ? La réponse à ces questions nécessite une approche d'un ordre supérieur à celui de la seule simulation : l'optimisation. C'est l'objet du chapitre 6^{ème}.

6 Méthodologie développée pour la sélection des solutions

La perfection est atteinte non quand il ne reste rien à ajouter, mais quand il ne reste rien à enlever

(A. de Saint-Exupéry)

6.1 Introduction

Les modèles de simulation du chapitre 5^{ème} permettent de relier quantitativement les différentes variables de taille de l'aménagement à buts multiples à ses effets. Selon la terminologie associée à l'optimisation, les outils de simulation permettent de calculer la performance d'un système.

Pour aboutir à une méthode d'aide à la discussion, le seul calcul de la performance ne suffit pas. Le nombre de combinaisons possibles est exponentiel en fonction du nombre de variables et de l'ensemble des valeurs qu'elles peuvent prendre. Une discussion basée sur la seule simulation laissera toujours la possibilité à un interlocuteur de demander une évaluation supplémentaire. Par ailleurs, la seule simulation ne permet pas non plus d'assurer qu'il n'existe pas de meilleure solution par rapport à celle choisie.

Pour éviter ce double problème, il est nécessaire d'avoir recours à une technique d'optimisation. De la sorte, les résultats correspondent forcément à des optima. L'optimisation nécessite cependant une fonction objectif basée sur des indicateurs. Ces indicateurs sont des agrégations des résultats de simulation.

L'optimisation produit habituellement un grand nombre de solutions dites optimales. Cependant, toutes ne correspondent pas à des solutions faisables : soit elles sont trop chères, soit elles ne remplissent pas tous les objectifs. Trois filtres sont développés de sorte à éliminer les solutions non-faisables. Le premier filtre élimine les solutions qui ne sont pas synergiques. Il est appelé ci-après filtre synergique. Le second filtre élimine les solutions qui ne remplissent pas le minimum requis de l'un des objectifs. Enfin, le dernier filtre élimine les solutions qui représentent un investissement trop élevé pour l'un des objectifs. Ces deux filtres sont appelés ci-après filtres des acteurs.

Le premier filtre nécessite d'abord des optimisations partielles du système de sorte à définir la valeur optimale de chacun des objectifs. Ces valeurs sont utilisées comme référence (fonction de transfert) pour calculer le gain synergique de l'aménagement à buts multiples.

Ce chapitre décrit tout d'abord la structure globale développée qui englobe les outils de simulation et aboutit à une structure d'optimisation. L'outil d'optimisation *QMOO* (Leyland, 2002) est décrit brièvement ainsi que le concept de solutions de Pareto auquel il aboutit. Le corps de ce chapitre décrit, avec la définition de la synergie, le filtre synergique développé et les optimisations partielles requises. Ces optimisations introduisent logiquement

les fonctions objectifs partielles et globales ainsi que le concept d'investissement potentiel. Ces résultats aboutissent à une clé de répartition des coûts entre les différents objectifs. Enfin, le chapitre se termine par le développement des deux filtres des acteurs (production minimale requise et investissement maximal). L'illustration de la méthodologie développée est donnée au chapitre 7^{ème}. Une illustration partielle de la méthode appliquée uniquement pour l'optimisation des paramètres de gestion est présentée dans Heller et al. (2006).

6.2 Organisation structurelle de l'optimisation

Lorsqu'elle est basée sur une technique de simulation, l'optimisation nécessite une distinction conceptuelle des quatre parties qui la constituent, à savoir 1) les variables du problème, 2) le calcul des performances, 3) les fonctions objectif et 4) l'outil d'optimisation lui-même. Les filtres développés constituent une cinquième partie indépendante pour aboutir à un ensemble de solutions finales. Ces cinq parties sont représentées schématiquement à la figure 6.1.

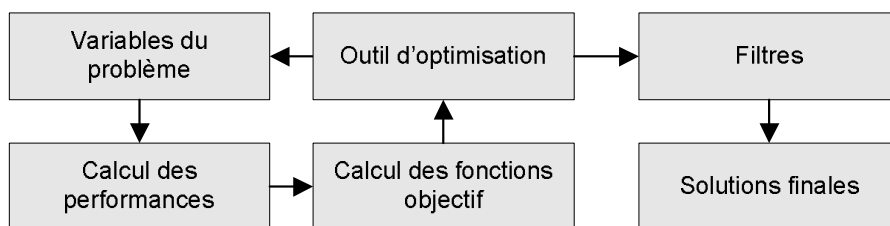


FIG. 6.1: Représentation schématique des cinq parties conceptuelle de l'optimisation

6.2.1 Variables d'optimisation

Il existe de nombreuses terminologies pour répertorier les différentes variables d'un problème. On peut distinguer, entre autres, les variables des constantes (selon le référentiel choisi), les variables internes des variables externes (selon les frontières du système étudié), les variables de flux des variables d'état, les variables dirigeables des variables non-dirigeables (selon l'échelle à laquelle le problème est étudié).

Dans le schéma d'optimisation présenté ici, la seule distinction nécessaire réside dans les variables influencées par les choix de l'outil d'optimisation de celles qui ne le sont pas. Les premières sont appelées variables internes et les secondes, variables externes. A titre d'exemple, le débit amont dans la rivière, la température de l'air ou la répartition des résidents autour de l'aménagement sont des variables externes tandis que la surface du réservoir ou la hauteur du barrage sont des variables internes. Les variables internes, selon les résultats obtenus au chapitre 4^{ème}, sont divisées en variables de conception, variables de taille et variables de gestion.

Les variables de conception modélisent la constitution de l'aménagement. Ce sont des variables binaires qui indiquent la présence ou non d'une partie de l'aménagement ainsi que ses relations avec les autres parties. Ces deux types de variables (présence et connections d'un élément) sont aisément représentés dans une matrice carrée binaire indiquant les relations. La compréhension de la matrice nécessite une clé de lecture. Par convention, cette matrice est lue horizontalement, c'est-à-dire qu'une ligne indique, pour l'élément de la ligne, la présence d'un lien vers l'élément-colonne, lu sur le haut de la matrice. Par défaut un élément

non-connecté est considéré absent. Cette codification permet au besoin de faire varier la conception de l'aménagement par l'outil d'optimisation. Des règles doivent parallèlement être développées pour assurer la cohérence physique de l'aménagement.

Le tableau 6.1 liste l'ensemble des éléments de l'aménagement à buts multiples de la figure 6.2 et le tableau 6.2 en donne la conception sous forme matricielle. Chaque "1" symbolise une flèche de l'élément *ligne* vers l'élément *colonne*.

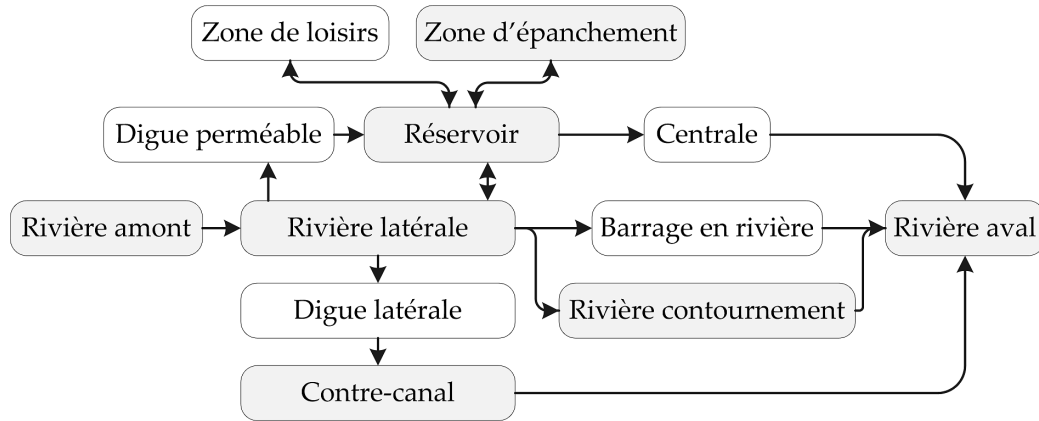


FIG. 6.2: Représentation conceptuelle du projet à buts multiples, rappel de la figure 1.6

TAB. 6.1: Eléments constitutifs de l'aménagement présenté à la figure 1.6

N°1	Rivière amont
N°2	Rivière latérale
N°3	Rivière de contournement
N°4	Rivière aval
N°5	Barrage en rivière
N°6	Centrale hydroélectrique
N°7	Digue perméable
N°8	Réservoir
N°9	Digue latérale
N°10	Contre-canal
N°11	Zone d'épanchement
N°12	Zone de loisirs

Les variables de taille définissent ensuite, pour chaque élément, ses principales extensions géométriques. Ainsi, par exemple, le réservoir est défini par sa surface (longueur et largeur du fond) et sa hauteur utile. Les digues de ce dernier sont définies par leurs pentes latérales (pente des talus). Elles reprennent, pour leurs longueurs, les dimensions du réservoir. L'ensemble des tailles de tous les éléments constitutifs de l'aménagement est matérialisé par un vecteur.

Les variables de gestion permettent finalement, pour un aménagement donné (conception et tailles définies), de simuler en continu son fonctionnement. La gestion distingue l'état ordinaire (gestion optimisée pour la production d'énergie et la réduction du marnage en situation normale) de l'état extraordinaire (gestion des crues). La gestion ordinaire se résume à 6 variables (pour l'hiver et pour l'été : gradient de variation du plan d'eau aval, amplitude de variation du plan d'eau aval, amplitude de variation du plan d'eau du

TAB. 6.2: Matrice des relations entre les éléments conceptuels de l'aménagement présenté à la figure 1.6

	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5	N°6	N°7	N°8	N°9	N°10	N°11	N°12
N°1		1										
N°2			1				1	1	1			
N°3				1								
N°4												
N°5					1							
N°6					1							
N°7								1				
N°8		1				1					1	1
N°9										1		
N°10				1								
N°11								1				
N°12								1				

réservoir). La gestion extraordinaire est réduite à son mode de fonctionnement par une variable polytomique (gestion passive, active, réservoir déconnecté avec ou sans organe de vidange). Les variables de gestion sont également matérialisées par un vecteur.

A cause de la difficulté à établir automatiquement des règles pour la gestion optimale lorsque la topologie du problème varie, les variables de conception ne sont pas optimisées de manière automatique par l'outil d'optimisation d lui-même. La configuration du problème (optimisation partielle ou totale, c.f. paragraphe 6.4.2.3) est imposée manuellement avant l'optimisation et les règles de gestion définies. De la sorte, les variables d'optimisation peuvent être groupées dans un vecteur unique qui contient simultanément les variables de taille et les variables de gestion.

La figure 6.3 illustre la répartition des variables du système.

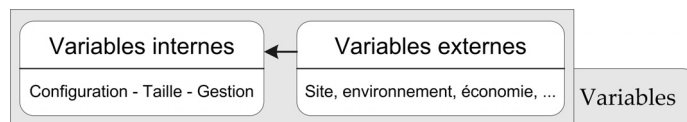


FIG. 6.3: Répartition des variables

Chaque variable interne est associée à un intervalle admissible. Cet intervalle est limité par deux contraintes qui fixent les valeurs minimale et maximale admissibles. La combinaison des intervalles admissibles de chaque variable forme le domaine admissible du problème d'optimisation. Ainsi, les solutions issues de l'outil d'optimisation restent dans l'espace des solutions physiquement réalisables.

6.2.2 Calcul de la performance

Le calcul de la performance est effectué par les modèles de simulation après le calcul du débit aval par les modèles de gestion. Les modèles de simulation font le lien entre les variables du système (taille et gestion) et l'évaluation de la performance. Les modèles de gestion et de simulation font l'objet du chapitre 5^{ème}. La figure 5.1 qui illustre l'articulation entre les

modèles de simulation ou de gestion et les variables, est légèrement modifiée et présentée à la figure 6.4.

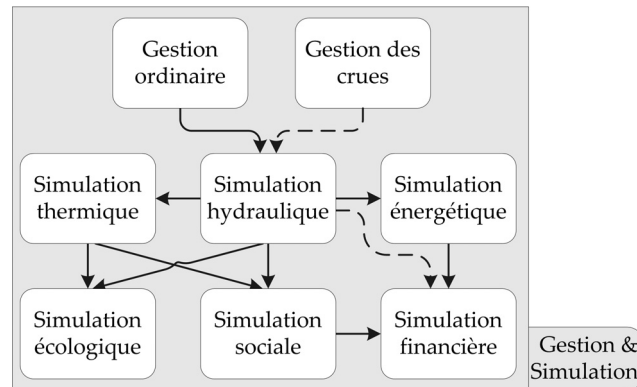


FIG. 6.4: Gestion et simulation

6.2.3 Fonctions objectif

Les résultats des simulations, obtenus par un calcul avec un pas de temps horaire, sont groupés sous forme de vecteurs horaires. Ces vecteurs ne sont pas directement utiles pour l'outil d'optimisation. Ils nécessitent tout d'abord une agrégation. Pour rappel, les différents modules de simulation produisent les résultats suivants qui sont représentés schématiquement à la figure 6.5 :

1. Module de gestion ordinaire
 - Débit aval (en situation ordinaire), $Q_{av}(t)$
2. Module de gestion des crues
 - Débit aval (en période de crue), $Q_{av}(t)$
 - Réduction du coût de protection des crues, ΔC_{crue}
3. Module hydraulique
 - Niveau aval, $h_{av}(t)$
 - Niveau du réservoir, $h_{res}(t)$
4. Module thermique
 - Température du réservoir, $T_{res}(t)$
 - Température aval, $T_{av}(t)$
 - Taux de saturation de l'air, $H_{air}(t)$
5. Module énergétique
 - Diamètre optimal des machines, D_{opt}
 - Vitesse optimale des machines, n_{opt}
 - Rendement global des machines, $\eta(t)$
 - Puissance électrique délivrée, $P_{el}(t)$
 - Vente d'énergie, $V_{el}(t)$
6. Module social
 - Prix de la visite, P_{visite}
 - Fréquentation sociale journalière de l'aménagement, $F_j(t)$
7. Module écologique
 - Augmentation de l'habitat potentiel de la truite juvénile par rapport à l'état de référence, $Ind_{t,juv}$

- Augmentation de l'habitat potentiel de la truite adulte par rapport à l'état de référence, $Ind_{t,ad}$
 - Augmentation de l'habitat potentiel des mouilles, Ind_{mou}
 - Augmentation de l'habitat potentiel des radiers, Ind_{rad}
 - Augmentation de l'habitat potentiel des berges, Ind_{ber}
 - Augmentation de l'habitat potentiel du cours principal, Ind_{cou}
 - Augmentation de l'index de richesse prédite EPT, Ind_{EPT}
 - Index agrégé de l'amélioration écologique aval, $Ind_{eco,av}$
8. Module financier
- Coût par élément
 - Coût total, C_{tot}
 - Valeur actualisée des revenus (crue, électrique et social), R_A

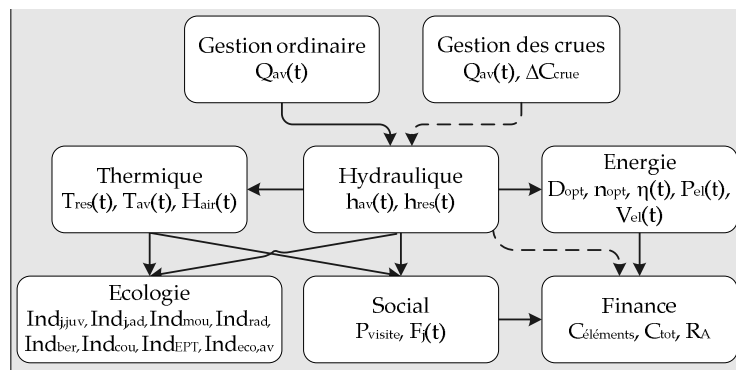


FIG. 6.5: Attribution de l'ensemble des vecteurs résultat aux outils de simulation

Selon les résultats obtenus au paragraphe 4.2.5.3 et synthétisés au paragraphe 5.1, les objectifs principaux de l'aménagement sont :

- réduire le marnage dans la rivière aval ;
- éviter de générer des battements excessifs dans le réservoir ;
- réduire le débit de crue à l'aval ;
- produire de l'énergie ;
- construire un site d'utilité sociale ;
- respecter à un coût total acceptable.

En fonction des objectifs de l'aménagement, certains résultats de simulation deviennent des variables internes du système. Ainsi, l'évolution des différentes températures sont nécessaires au calcul de la fréquentation sociale et de l'écologie aval mais ne constitue par un but en soi. De même, le diamètre optimal et la vitesse optimale des machines hydrauliques sont nécessaires pour le calcul du rendement optimal qui permet ensuite de calculer la puissance électrique instantanée. Les trois premières variables peuvent être abandonnées au profit de la puissance dans l'optimisation du système complet. Par ailleurs, avec les optimisations partielles développées plus loin (c.f. paragraphe 6.4.2.3), le coût de chaque élément peut être intégré dans le coût total. Une réflexion similaire permet d'éliminer les revenus partiels. Enfin, le débit aval qui est la variable pivot du système est nécessaire à tous les autres calculs sans constituer lui-même un résultat.

Ces remarques permettent d'éliminer un certain nombre de vecteurs résultant des simulations. Seuls les suivants sont retenus :

1. Module hydraulique

- Niveau aval, $h_{av}(t)$
 - Niveau du réservoir, $h_{res}(t)$
2. Module énergétique
 - Puissance électrique délivrée, $P_{el}(t)$
 3. Module social
 - Prix de la visite, P_{visite}
 - Fréquentation sociale journalière de l'aménagement, $F_j(t)$
 4. Module écologique
 - Augmentation de l'habitat potentiel de la truite juvénile par rapport à l'état de référence, $Ind_{t,juv}$
 - Augmentation de l'habitat potentiel de la truite adulte par rapport à l'état de référence, $Ind_{t,ad}$
 - Augmentation de l'habitat potentiel des mouilles, Ind_{mou}
 - Augmentation de l'habitat potentiel des radiers, Ind_{rad}
 - Augmentation de l'habitat potentiel des berges, Ind_{ber}
 - Augmentation de l'habitat potentiel du cours principal, Ind_{cou}
 - Augmentation de l'index de richesse prédite EPT, Ind_{EPT}
 - Index agrégé de l'amélioration écologique aval, $Ind_{eco,av}$
 5. Module financier
 - Coût total, C_{tot}
 - Valeur actualisée des revenus (crue, électrique et social), R_A

La méthode développée au paragraphe 5.11.3 établit la relation entre les résultats du modèle écologique et l'indicateur de marnage aval (I_{av}). Les 8 valeurs écologiques, le débit aval et le niveau aval sont ainsi agrégés par cet indicateur de marnage. Il donne une variation totale annuelle du niveau d'eau aval.

Par analogie avec la rivière aval, le réservoir utilise le même indicateur (I_{res}). Le niveau du réservoir est abandonné au profit de son indicateur de marnage. Par ailleurs, la stabilité du réservoir étant implicitement recherchée par le modèle de gestion ordinaire, elle se répercute directement sur la production d'énergie et la fréquentation sociale.

La puissance horaire développée par les machines hydrauliques peut, par intégration, être remplacée par la production annuelle d'énergie (E_{el}). L'aspect lié au revenu est intégré dans les revenus actualisés.

La fréquentation sociale peut également être synthétisée par la fréquentation annuelle de l'aménagement (Fr_{tot}). L'aspect lié au revenu est intégré dans les revenus actualisés.

Par rapport à l'ensemble des résultats de simulation, selon les six objectifs définis, seuls les résultats suivants sont retenus :

1. Modules hydraulique et écologique
 - Indicateur de marnage aval, I_{av}
 - Indicateur de marnage du réservoir, I_{res}
2. Module énergétique
 - Energie annuelle, E_{el}
3. Module social
 - Fréquentation sociale annuelle de l'aménagement, Fr_{tot}
4. Module financier

- Coût total, C_{tot}
- Valeur actualisée des revenus (crue, électrique et social), R_A

Ainsi agrégés, les résultats de simulation sont indépendants de leur valeur temporelle. Ils peuvent être associés aux objectifs de l'aménagement selon le tableau 6.3 et sont représentés à la figure 6.6.

TAB. 6.3: Lien entre les objectifs et les résultats de simulation

Objectif	Indicateur	Unité
Marnage aval	I_{av}	m/an
Battements du réservoir	I_{res}	m/an
Protection contre les crues	V_{disp}	$10^6 m^3$
Production d'énergie	E_{el}	GWh/an
Utilité sociale	Fr_{tot}	Visites/an
Coût total	C_{tot}	CHF
Revenus actualisés	R_A	CHF
Investissement potentiel	I_{pot}	CHF

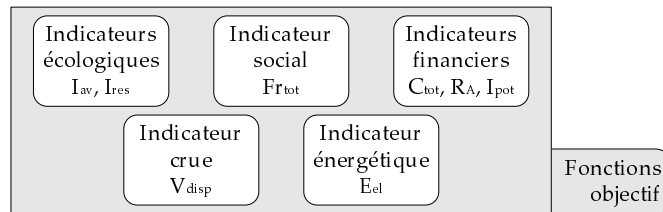


FIG. 6.6: Résultats agrégés de simulation

La méthode pour aboutir au volume disponible (V_{disp}) comme indicateur de protection contre les crues est différente et moins directe. Il est nécessaire d'intégrer l'optimisation partielle du système. Le développement est donné au paragraphe 6.4.2.3. Une analyse similaire, expliquée dans le même paragraphe, permet de calculer l'investissement potentiel d'une solution (I_{pot}).

La fonction objectif pour l'optimisation globale du système est finalement exprimée par l'équation 6.1. Les optimisations partielles n'en considèrent qu'une partie.

$$\min(I_{av}, I_{res}, C_{tot}), \max(R_A, E_{el}, Fr_{tot}, V_{disp}, I_{pot}) \quad (6.1)$$

6.2.4 Outil d'optimisation

L'outil d'optimisation représente le coeur du système. Il peut également être vu comme une superstructure qui englobe la simulation. Son but est de faire évoluer la valeur des variables internes de sorte à optimiser le système par maximisation de la fonction objectif.

L'outil d'optimisation, utilisé dans ce travail, fait l'objet du paragraphe 6.3.2 où ses capacités et son fonctionnement sont décrits en détail. La raison de ce choix est également abordée.

Pour pallier à la lenteur du calcul lors de l'évaluation de la fonction objectif, l'algorithme *QMOO* est légèrement modifié pour permettre le calcul parallèle. Cette particularité est développée en se basant sur une fonctionnalité propre à *MatLab* (Distributed Computing Toolbox). Pour la cas d'étude, les calculs ont pu être ainsi effectués sur six machines en parallèle.

Par ailleurs pour rapatrier des variables d'état qui ne participent pas à la fonction objectif, une nouvelle variable informatique est créée dans la superstructure de *QMOO*. Cette variable permet de reconstituer les résultats atteints par les solutions optimales dans chaque objectif de l'aménagement sans devoir resimuler ces solutions.

6.2.5 Organigramme complet de l'outil de calcul

Construit pas à pas dans les paragraphes précédents, l'organigramme complet de l'outil est donné à la figure 6.7. Il constitue la formalisation quantitative qui permet d'aboutir à une sélection de solutions techniquement réalisables et optimales selon les objectifs choisis. Ces solutions représentent les meilleures solutions techniquement réalisables à l'intérieur de l'espace complet des solutions données.

L'outil d'optimisation *QMOO* fait varier les valeurs des variables d'entrée à l'intérieur de son domaine admissible et génère tout d'abord les solutions optimales de Pareto basées sur un objectif partiel. Puis, dans un second temps, il génère les solutions de Pareto basées sur la fonction objectif complète. Enfin, les solutions optimales obtenues sont épurées par filtrage. Les optimisations partielles et les filtres sont expliqués en détail aux paragraphes 6.4, 6.5 et 6.7. Les principales routines de calcul sont données en code *MatLab* dans les annexes A4 à A8.

6.3 Génération de solutions optimales

L'algorithme d'optimisation *QMOO* a été développé par Geoff Leyland et Adam Molyneux dans le cadre de leur doctorat à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne au sein du Laboratoire d'énergétique industrielle (Leyland, 2002; Molyneux, 2002). Programmé sur une plate-forme *MatLab*, il offre une utilisation aisée. Son acronyme *QMOO* signifie *Queueing Multi-Objective Optimiser* traduit en français par *algorithme d'optimisation multi-objectif avec des solutions rangées*. Il produit un vecteur de solutions non-dominées, appelées solutions optimales de Pareto.

6.3.1 Concept de Pareto

Dans le cadre d'une optimisation multi-objective, il est difficile de définir la meilleure solution. La plupart des problèmes multi-objectifs, surtout lorsque ceux-ci sont en conflit, ne possèdent pas de solution optimale unique, c'est-à-dire qui soit optimale en même temps pour l'ensemble de leurs objectifs. Sur cette constatation, Vilfredo Pareto (Pareto, 1896) définit un ensemble de solutions non-dominées et évite ainsi de comparer ou de pondérer les objectifs entre eux.

Par exemple, l'acquisition d'une voiture puissante et bon marché représente un problème à deux objectifs (admis en opposition). Une technique multi-critère, par pondération, aboutit

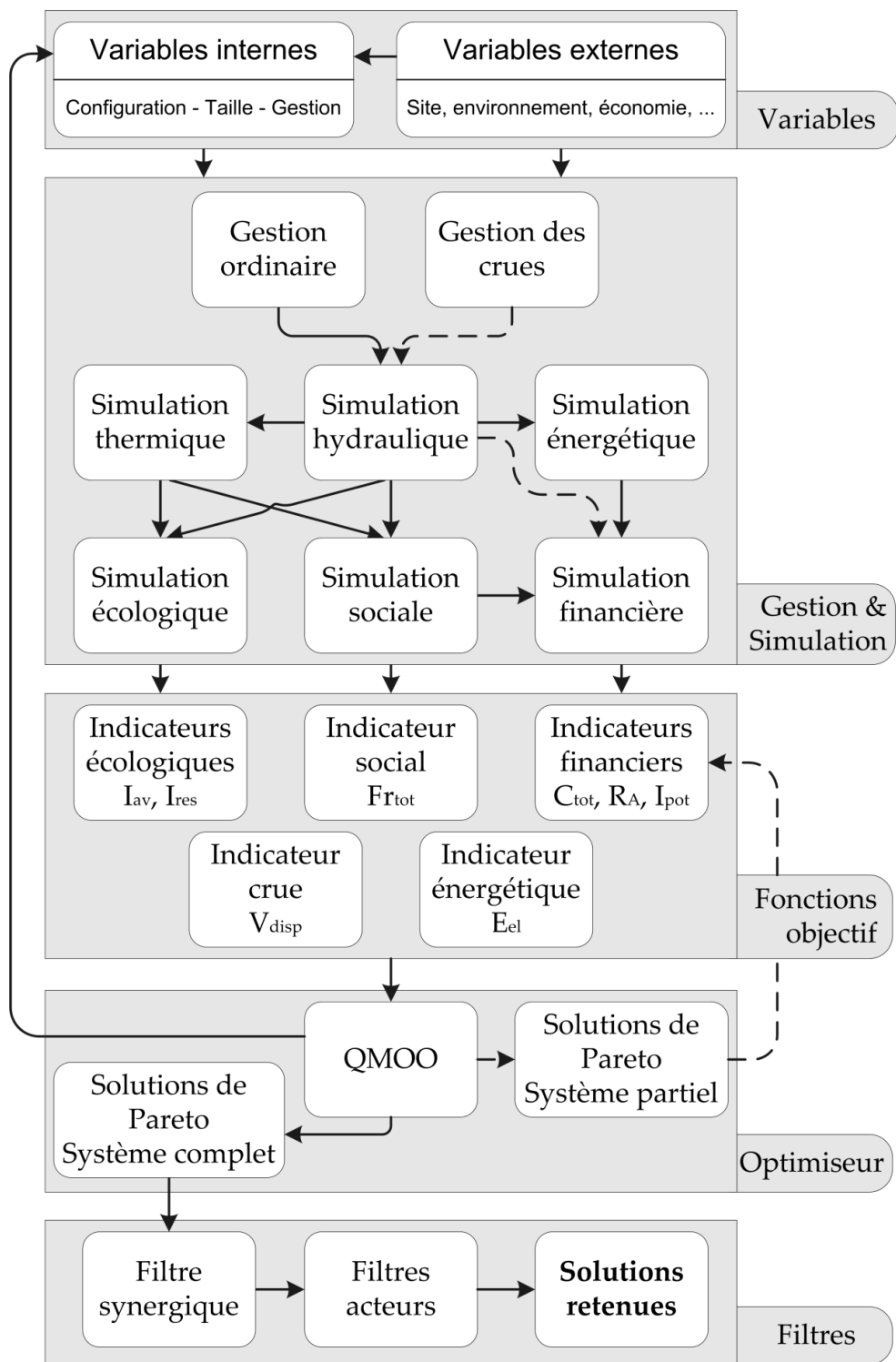


FIG. 6.7: Organigramme complet du système d'optimisation

au véhicule unique optimal. Toutefois, un changement dans la pondération modifie le résultat. Le concept de Pareto permet de donner toutes les solutions qui, pour chaque prix, correspondent au véhicule le plus puissant. Ce même ensemble de solutions peut également être défini par sa réciproque, soit toutes les solutions qui, pour chaque puissance, correspondent au véhicule le moins cher. Le concept est extensible à autant d'objectifs que nécessaires.

Une solution est dite optimale au sens de Pareto s'il n'en existe pas d'autres qui permettent d'accroître le niveau de satisfaction d'un ou plusieurs objectifs sans faire diminuer celle d'au moins un autre objectif. L'espace initial des solutions est ainsi réduit d'au moins une dimension. La définition, initialement donnée par Pareto, s'applique à l'espace des solutions du problème. Elle est toutefois facilement étendue, moyennant une fonction objectif, à l'espace des variables (Leyland, 2002).

Un problème à deux variables indépendantes est matérialisé par un espace de solutions plan (2 dimensions). L'ensemble des solutions de Pareto représente au plus un ensemble curviligne (1 dimension). On parle alors de front de Pareto. La figure 6.8 illustre l'espace des solutions dans un domaine à deux variables avec son front de Pareto et le même espace dans son domaine corrélé à deux objectifs. Le front de Pareto correspond sur cette figure à la minimisation des deux objectifs.

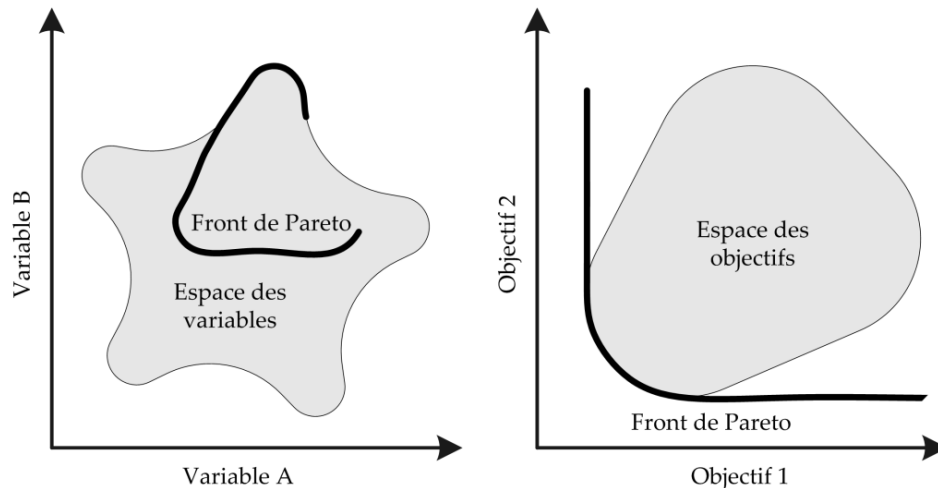


FIG. 6.8: Front de Pareto : à gauche espace lié aux variables ; à droite espace lié aux objectifs

Lorsque les variables du problème sont discrètes, l'espace complet des solutions est exponentiel. Les solutions optimales de Pareto forment alors un front discontinu. Le front reste cependant strictement concave ou convexe. Par rapport à l'espace fini des solutions initiales, les solutions de Pareto en représentent seulement une infime partie. La recherche de solutions de Pareto peut donc être définie comme un filtre extrêmement efficace.

6.3.2 Outil d'optimisation *QMOO*

L'algorithme développé dans le logiciel *QMOO* (Leyland, 2002) est basé sur le principe des algorithmes génétiques. Les principes de fonctionnement de ces derniers sont expliqués au paragraphes 3.3.2.2.

L'algorithme *QMOO* a été développé avec les objectifs suivants :

- traiter des problèmes multi-objectifs ;
- chercher le plus d’optimum locaux et, si possible, l’optimum global ;
- réduire autant que possible les paramètres de contrôle ;
- converger le plus rapidement possible ;
- permettre le calcul parallèle.

Ces objectifs sont atteints par *QMOO* en changeant la référence des algorithmes génétiques. Ceux-ci considèrent la population comme élément fondamental sur lequel sont effectuées, en boucle, des opérations de génération, d’évaluation et de suppression. *QMOO* supprime le concept habituel de population au profit de l’individu. Celui-ci devient un élément indépendant qui peut avoir différents états et la population n’est que le regroupement de ces individus (la queue).

L’individu possède une vie propre :

1. Il commence par être *créé* en occupant une place dans la population.
2. Il se voit alors attribuer ses caractères propres, c’est-à-dire une valeur pour chaque variable du problème. Ces valeurs sont soit choisies au hasard pendant la phase d’initialisation du calcul, soit générées par croisements et mutations à partir de ses *parents* dans la phase normale du calcul.
3. L’individu ainsi formé est ensuite évalué par la fonction de performance. Cette phase nécessite une grande capacité de calcul mais peut être aisément effectuée en parallèle.
4. L’individu évalué est alors attribué à un groupe de la population.
5. L’individu est enfin classé parmi les autres individus du groupe. Il peut alors devenir un membre à part entière, capable de générer d’autres individus. S’il est perçu comme un individu inintéressant (individu déjà existant ou sous-classé), il est éliminé de la population ; il *meurt*.

Par rapport à un algorithme génétique classique, le principe d’individu indépendant offre à *QMOO* une grande flexibilité tant pour l’évaluation en parallèle que pour la répartition des individus dans des groupes. Ces groupes, indépendants entre eux, évoluent librement et permettent d’explorer des zones différentes de l’espace des solutions. Chaque groupe peut ainsi aboutir à un optimum local. Cette diversité dans le calcul se retrouve dans les solutions finales retenues.

Enfin, *QMOO* possède deux caractéristiques qui lui assurent une convergence robuste et diversifiée. Tout d’abord, il utilise une méthode évolutive quant au choix de l’opérateur pour la génération des individus. L’idée est de garder un opérateur lorsque celui s’avère efficace. De cette manière, les opérateurs peuvent évoluer selon le problème traité, voir même évoluer au cours d’une même optimisation. Ensuite, avec la préservation des zones limitrophes de chaque groupe, *QMOO* garde une diversité de solutions sub-optimales.

Finalement, pour améliorer la rapidité de convergence sans pour autant perdre de la diversité, une préférence est accordée aux meilleures solutions pour générer de nouveaux individus. Cette préférence est donnée en fonction du rang que possède chaque solution au sein de son groupe.

Si *QMOO* répond à l’ensemble des objectifs initialement définis, il est toutefois limité dans le nombre d’objectifs qu’il est capable de considérer. Il est totalement *multi-objectif* dans le sens où il traite parfaitement... deux objectifs ! Il est capable d’examiner des problèmes à trois objectifs avec toutefois une limite sur les zones limitrophes ainsi que sur les méthodes

mathématiques utilisées pour limiter la taille de la population. Avec trois objectifs, la taille de la population grandit considérablement. Pour ces raisons techniques, l'optimisation avec plus de trois objectifs n'est pas envisageable.

Une dernière caractéristique de cet algorithme réside dans sa capacité à traiter aussi bien des variables continues que discrètes. Cette capacité permet notamment d'utiliser des variables polytomiques. Elle permet également de s'approcher un peu mieux de la réalité constructive où les grandeurs sont rarement continues.

6.4 Optimisations et clé de répartition des coûts

6.4.1 Difficultés liées au nombre d'objectifs

Le problème défini par l'organigramme, tel que présenté à la figure 6.7, contient au moins 6 objectifs pour être complet (marnage aval, battement réservoir, production d'énergie, utilité sociale, laminage des crues et coût total). Ce nombre dépasse la capacité des algorithmes d'optimisation en général et de *QMOO* en particulier. Si l'optimisation du système complet n'est pas possible, deux possibilités demeurent :

- effectuer des optimisations partielles ;
- effectuer des optimisations avec des fonctions objectifs agrégées qui considèrent plusieurs objectifs indépendants au sein d'une même fonction.

Les optimisations partielles sont... partielles par définition et ne donnent donc qu'une vue limitée du problème. Elles nécessitent pour tenter de pallier à cette partialité un nombre important de simulations dont les résultats sont difficilement comparables. Elles génèrent ainsi une multiplication des solutions retenues pour le décideur sans pour autant lui apporter une vue globale.

Les optimisations complètes avec des objectifs agrégés requièrent une méthode d'agrégation. Les plus connues sont l'addition des objectifs par un système de pondération qui mesure l'importance relative de chacun (Umayal and Kamaraj, 2005) ou la transformation des objectifs dans une unité de comparaison (économétrie). Ces méthodes demeurent discutables puisqu'une modification de la pondération aboutit à des résultats différents.

6.4.2 Combinaison d'optimisations

Optimisations partielles, unité physique, économétrie, unité de comparaison : ces idées sont ici tournées dans tous les sens pour chercher à leur en donner un !

6.4.2.1 Unités de comparaison

Le point de départ de la réflexion est la recherche d'une unité de comparaison. Chacune des simulations physiques produit des solutions qui peuvent être agrégées dans un indicateur. Ces indicateurs conservent de leur origine l'unité physique. Ainsi, le marnage aval ou le battement du réservoir sont exprimés en mètres de variation annuelle, la rétention des crues en mètre cube et la production d'énergie en *GWh* par an. Ces unités sont sûrement incomparables. L'unité de comparaison ne doit donc pas être liée à une grandeur physique.

La suppression des indicateurs exprimés en unité physique ne laisse que les indicateurs exprimés en unité financière. Or, la transformation des biens produits par l'aménagement en unité financière pose également des problèmes. Comme expliqué au paragraphe 5.10.4, les différents revenus ne sont pas directement comparables. L'énergie génère un revenu annuel, la rétention des crues permet une économie potentielle d'investissement et l'utilisation sociale aboutit à une valeur annuelle accordée à l'aménagement. La réduction du marnage qui constitue le but premier, et la maîtrise des battements dans le réservoir ne sont pas facilement quantifiables en terme de revenu. Chiffrer en termes monétaires les conséquences de l'aménagement ne permet donc pas d'en comparer les causes.

Si la comparaison monétaire des conséquences n'est pas possible, il demeure encore celle des causes. Or, la seule cause, à l'exclusion des causes physiques, de tout projet est matérialisée par un investissement. Analysé dans un sens large, l'investissement peut être d'ordre politique, administratif ou financier. Lié à un projet de construction, l'investissement peut également être d'ordre énergétique ou matériel, lié aux ressources naturelles ou la surface nécessaire.

L'investissement politique est matérialisé par la volonté d'une ou de plusieurs personnes politiques (élue ou non) qui oeuvrent pour un projet. La conséquence d'une volonté exprimée au niveau étatique prend corps dans un groupe de fonctionnaires qui travaillent aux différentes étapes de réalisation du projet. C'est l'investissement administratif. Parallèlement, l'investissement peut également être financier par la mise à disposition de moyens pécuniaires. Cet investissement lie, selon les projets, aussi bien les investisseurs privés que publics. L'investissement énergétique représente la quantité d'énergie mise dans un objet pour aboutir à son fonctionnement ou sa réalisation. Lorsqu'il s'agit, par exemple, d'isolation thermique d'un bâtiment, le projet compare l'énergie investie dans l'isolation pour l'énergie économisée dans le chauffage. Une réflexion similaire peut être menée pour l'investissement des matières premières. Enfin, pour un projet qui touche à l'aménagement du territoire, l'investissement en terme de surface nécessaire peut également être analysé.

Ce bref aperçu des différents investissements nécessaires à la réalisation d'un projet n'est assurément pas exhaustif. Il montre cependant le dénominateur commun d'un projet à buts multiples. Cette idée, apparemment triviale, peut être formulée de la manière suivante : toute opération nécessite un investissement. Elle se révèle pourtant très efficace pour les étapes finales de la méthode.

La suite de ce travail est focalisée sur l'investissement financier. Dès lors, pour éviter toute confusion, le mot "investissement" ne couvre dans les pages suivantes que l'aspect financier.

6.4.2.2 Attribution des parties de l'aménagement

Fondue dans un aménagement à buts multiples, la part nécessaire d'investissements de chacun des objectifs ne peut pas toujours être définie de manière univoque. Une première répartition permet de diviser les parties constitutives de l'aménagement en deux groupes : les parties qui ne servent qu'un objectif et les parties à buts multiples.

Les parties mono-objectives peuvent être attribuées totalement à leur objectif. Ainsi, la centrale de production énergétique est directement liée à la production d'énergie. Si l'on néglige l'impact du débit à travers les turbines lors des crues, alors la centrale est même

uniquement liée à cette production. Dans ce cas, cette partie constitue un objet à but unique et la totalité de l'investissement est liée à cet objectif.

Toutefois, le problème demeure pour les parties à but unique dont la cause est liée à plusieurs buts ou plus simplement pour les parties à buts multiples. Ainsi, les contre-canaux, déjà nécessaires pour l'état actuel, sont des parties de l'aménagement à but unique, celui de contenir l'élévation de la nappe phréatique. Toutefois, leur cause réelle est directement liée à l'existence du réservoir et à son niveau d'eau. Or le réservoir permet, en outre et en même temps, de créer la charge pour la production d'énergie, de mettre à disposition un volume pour la réduction du marnage et d'offrir un espace pour les loisirs aquatiques. La part de chacun de ces objectifs dans le même objet est difficile à distinguer. Cette distinction est d'autant plus difficile que ces variables sont également liées. Si le réservoir est réduit au concept de son seul volume, il possède deux variables de taille, sa surface et sa hauteur. L'attribution des variables sur les objectifs permet, par exemple, de relier la hauteur à la production d'énergie, la surface et la hauteur (c'est-à-dire le volume) au laminage du marnage, ce même volume à la rétention contre les crues, la surface pour l'utilisation liée au loisirs. La distinction n'en est pas pour autant facilitée. Si, pour compliquer encore un peu le problème, on cherche à répartir le coût des digues du réservoir (formées par la hauteur requise et le périmètre du réservoir), il devient sinon impossible, du moins très difficile et fortement discutable d'aboutir à une attribution objective.

Il apparaît donc évident que l'investissement des parties à buts multiples ne peut pas être ventilé explicitement sur les objectifs. Il faut donc soit trouver une clé de répartition basée sur un accord de compromis, soit éviter les parties à buts multiples. Si la première idée peut être parfaitement appliquée, notamment par la biais de la politique, elle ne relève pas de la science directement. D'autre part, abandonner les parties à buts multiples revient à abandonner les aménagements du même nom et donc l'objet même de ce travail.

6.4.2.3 Optimisations partielles et fonctions de transfert

Le problème précédent est résolu en insérant une étape intermédiaire dans le processus d'optimisation : les optimisations partielles.

La fonction de ces dernières est de créer le lien optimal entre la production de chaque objectif de l'aménagement et son investissement nécessaire. Pour définir ce lien, le système est réduit à un seul objectif physique en supprimant toutes les parties de l'aménagement qui ne lui sont pas nécessaires (optimisation manuelle de la variable de conception). Les systèmes partiels ainsi définis sont alors optimisés avec une fonction objective double :

- maximiser la production de l'objectif physique recherché ;
- minimiser le coût d'investissement.

L'outil d'optimisation *QMOO* produit alors le front de Pareto entre l'objectif recherché (exprimé dans son unité physique) et l'investissement (exprimé en francs). Le ratio de l'un par l'autre donne, pour chaque quantité annuelle produite, l'investissement unitaire optimal associé. L'investissement unitaire optimal minimal représente ainsi l'"optimum des optima". Il correspond à l'investissement absolument minimal par unité physique annuellement produite. La figure 6.9 illustre ces deux courbes.

Les optimisations partielles effectuées en série produisent, pour les cinq objectifs, l'investissement minimal nécessaire par quantité physique annuellement produite et la quantité

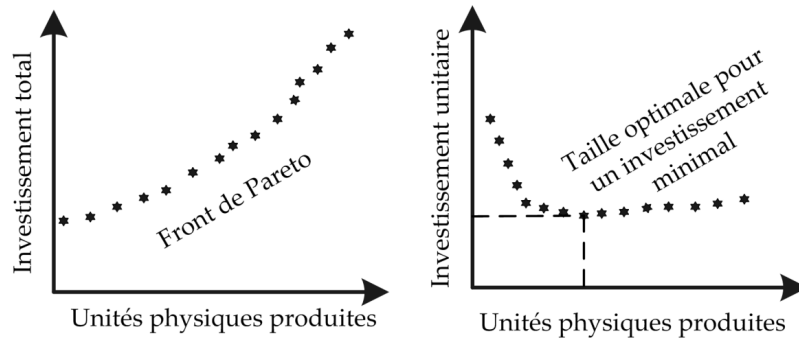


FIG. 6.9: A gauche : Front de Pareto de l'optimisation partielle ; à droite : investissement unitaire corrélé

optimale. Cette quantité correspond à l'aménagement idéal qui conduit à l'investissement unitaire optimal minimal (I_i).

Les cinq unités physiques retenues sont données au tableau 6.3. Ce sont, pour rappel, l'énergie produite (GWh/an), la fréquentation du site ($visites/an$), le volume disponible pour les crues ($10^6 m^3$), le marnage aval (m/an) et les battements du réservoir (m/an).

A cause du lien physique direct qui existe entre le marnage aval et les battements du réservoir, ces deux objectifs ne peuvent pas être dissociés. Ils sont donc optimisés simultanément (système à trois objectifs) pour minimiser, en même temps, le marnage aval, les battements dans le réservoir et le coût total. Les coûts unitaires optimaux portent tout d'abord sur le marnage aval évité. Ce marnage évité est calculé par différence avec le marnage aval sans aménagement. Sans tenir compte du réservoir, l'investissement unitaire minimal pour réduire le marnage aval est retenu. Il conduit naturellement, à cause de la fonction objectif, à la solution qui concentre le marnage dans le réservoir. Dans un second temps, à partir de la solution retenue pour le marnage aval, le meilleur coût d'investissement unitaire est calculé pour la réduction des battements dans le réservoir.

Le front de Pareto exprimé en investissement unitaire (c.f. figure 6.9, partie de droite) définit, pour chaque objectif, la fonction de transfert. Cette fonction permet le passage entre une production exprimée en unité physique et son investissement monétaire équivalent. De la sorte, les productions de différents objectifs, exprimées dans une unité physique propre, peuvent être comparées et additionnées en terme monétaire. Cette addition représente l'investissement potentiel d'un aménagement (I_{pot}).

6.4.2.4 Optimisation globale

Sur la base des résultats obtenus par les optimisations partielles, l'optimisation globale est effectuée avec le concept d'investissement potentiel. La fonction objectif de l'optimisation globale cherche à :

- maximiser l'investissement potentiel ;
- minimiser le coût d'investissement.

L'investissement potentiel (I_{pot}) d'un aménagement est défini par la somme des quantités physiques délivrées (appelées aussi produit Pr_i) multipliées par leur investissement unitaire minimal respectif (I_i). L'expression mathématique est donnée à l'équation 6.2.

$$I_{pot} = \sum_{i=1}^5 Pr_i * I_i \quad (6.2)$$

Une alternative pour l'investissement unitaire minimal consiste à prendre toute la fonction de transfert (et non seulement sa valeur minimale). De la sorte, à chaque quantité correspond un investissement. Cet investissement reste optimal mais implique un lien supplémentaire, dans l'optimisation globale, entre la quantité et le prix. Ce lien peut devenir problématique dans la mesure où la quantité est imposée et peut, même avec son coût optimal, ne pas être rentable.

En assurant l'investissement unitaire optimal minimal (valeur optimale de la fonction de transfert), l'optimisation globale s'affranchit des seuils de rentabilité liés à la quantité, d'où le choix de cette valeur.

6.5 Filtre synergique et définition de la synergie

Dans les équations précédentes, aucun lien direct n'est établi entre le coût total (C_{tot}) et l'investissement potentiel (I_{pot}). Le seul lien indirect entre ces deux valeurs d'investissement est la fonction objectif de l'optimisation globale. *A priori* il n'est pas possible de définir une relation entre ces deux valeurs. Le résultat issu de l'optimisation globale assure seulement d'en trouver le front de Pareto.

Cependant, la mise en commun d'efforts particuliers doit normalement permettre d'aboutir à un résultat meilleur que la somme des efforts fournis individuellement. Cette mise en commun répond au concept de synergie. La définition donnée pour ce mot dans EuroDicauTom (1990) est une *action cumulative de plusieurs facteurs entraînant un effet global qui est supérieur à la somme des effets isolés*. Une définition identique tirée du vocabulaire militaire examine le problème dans le sens inverse et parle plus simplement d'*économie des moyens*. La synergie est donc un procédé qui, par la mise en commun des moyens, permet d'aboutir à un effet plus grand, ou qui, pour le même effet, permet de réduire les moyens.

Appliquée au problème d'optimisation globale, la synergie permet donc, par la mise en commun d'objectifs au sein d'un même aménagement, soit de réduire les moyens (l'investissement nécessaire, c'est-à-dire le coût total), soit d'augmenter les effets (les quantités délivrées, c'est-à-dire l'investissement potentiel). A cause de la définition même du front de Pareto, cette définition est prise dans un sens pour les solutions d'une extrémité de la courbe et dans l'autre pour l'autre extrémité. Toutes les solutions médianes correspondent à une situation intermédiaire.

S'il n'est donc pas possible de distinguer les effets des moyens, il faut définir un indicateur qui exprime le rapport entre ces deux grandeurs. Formellement, l'indicateur synergique d'un aménagement est exprimé par l'équation 6.3.

$$I_{syn} = \frac{I_{pot} - C_{tot}}{C_{tot}} \quad (6.3)$$

Une solution qui aboutit à un coût total supérieur à son investissement potentiel ne répond pas au concept de synergie et doit être abandonnée. Le filtre synergique consiste simplement

à rejeter les solutions dont l'indicateur synergique est négatif. La condition d'une solution synergique est donc :

$$I_{syn} \geq 0 \quad (6.4)$$

Le calcul peut être effectué de manière absolue en considérant les investissements unitaires optimaux minimaux de chaque objectif. Il peut également être effectué de manière relative en considérant les fonctions optimales complètes.

Toutes les solutions qui ont un indicateur synergique positif nécessitent un investissement inférieur à l'investissement potentiel. Pour respecter l'équilibre financier, le coût unitaire de chaque objectif peut donc être réduit proportionnellement. La figure 6.10 délimite graphiquement les solutions synergiques des autres.

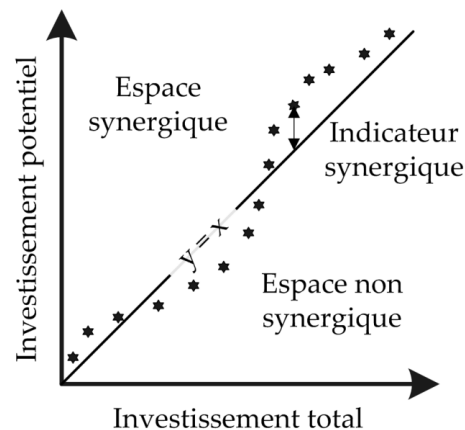


FIG. 6.10: Délimitation graphique des solutions synergiques

6.6 Clé de répartition des coûts

La clé de répartition des coûts avec la double étape *optimisations partielles - optimisation globale* suivie du filtre synergique est implicite. Elle est donnée par l'équation 6.5

$$C_i = C_{tot} \frac{Pr_i * I_i}{I_{pot}}, \forall i \quad (6.5)$$

où C_i représente l'investissement à la charge de l'objectif désigné.

Cette clé considère, d'une part, directement les produits délivrés pour chaque objectif et, d'autre part, indirectement leur coût respectif par leur coût unitaire. De la sorte, il n'est plus nécessaire d'attribuer les parties utiles de l'aménagement à l'un ou l'autre des objectifs. De plus, à cause de l'investissement unitaire optimal minimal chaque objectif est assuré de n'investir que le minimum nécessaire. Avec le filtre synergique, si ce dernier est strictement positif, chaque objectif est même assuré d'investir moins que le minimum et ceci sans même être contraint à la quantité optimale de production.

Tel que proposé, le filtre synergique permet de réduire l'investissement minimal et de s'affranchir des tailles limites. Le gain synergique, compris entre l'investissement unitaire optimal

(calculé pour chaque objectif par une optimisation partielle) et l'investissement nécessaire (calculé par l'optimisation globale), est ventilé linéairement sur chaque objectif.

6.7 Filtres des acteurs

La dernière étape du processus de sélection des solutions nécessite l'intervention des acteurs du système. A ce niveau de décision, comparé au chapitre 4^{ème}, le nombre des acteurs est réduit au nombre des investisseurs (dans le sens de l'investissement défini au paragraphe 6.4.2.1). Pour le problème défini dans le cadre de ce travail, il y a cinq "investisseurs" qui représentent chacun l'un des cinq objectifs.

Ce double filtre (filtre inférieur et filtre supérieur) introduit les exigences des acteurs. Au niveau du choix des solutions, chaque acteur peut souhaiter, pour son objectif :

- d'une part, fixer une quantité minimale en dessous de laquelle son objectif n'est plus respecté. Cette limite prend en considération, d'une manière simplifiée, les effets de seuil de la fonction de transfert ;
- d'autre part, fixer un investissement maximal. Cette limite prend en compte la capacité de financement de chacun des acteurs.

Les exigences des acteurs sont exprimées en unité physique pour la quantité minimale et en terme monétaire pour l'investissement maximal.

Par la quantité minimale requise, le filtre inférieur des acteurs élimine toutes les solutions qui négligent l'un des objectifs (solution dont la quantité obtenue pour l'un des objectifs est nulle). De ce fait, il élimine les solutions qui ne seraient que partiellement synergiques (au sens habituel du terme).

Le filtre des acteurs permet d'orienter les solutions précédemment retenues vers l'un ou l'autre des objectifs. Toutefois, des conditions trop restrictives à ce niveau peuvent également conduire à l'élimination de toutes les solutions.

6.8 Synthèse de la méthodologie développée

Avant d'appliquer la méthodologie développée dans le cadre de ce travail (c.f. chapitre 7^{ème}), ce paragraphe en donne une synthèse complète. Pour ce faire, il passe successivement en revue les étapes abordées. Le but est de formaliser la méthode pour la rendre générale et applicable aux projets complexes. Développée comme une méthode à la fois qualitative et quantitative, cette synthèse en aborde les deux aspects. Les premières étapes sont largement inspirées de la méthode de Gomez and Probst (1995). Les secondes sont une formalisation quantitative du problème selon un schéma classique d'optimisation par simulation. Les dernières étapes sont certainement, à côté de la mise en commun et de l'application, la nouveauté apportée par ce travail.

1. La méthode commence par une analyse du contexte dans lequel se situe le projet. Cette analyse passe principalement par l'établissement de la liste des acteurs et de leurs attentes (ou leurs craintes) à l'égard du projet.
2. Les acteurs et leurs attentes conduisent à la liste des facteurs qui constituent le système dans lequel le projet s'inscrit. La modélisation qualitative du système par un réseau qui inclut l'ensemble des facteurs constitue l'étape centrale de la phase qualitative.

3. L'analyse mathématique du réseau permet d'en comprendre le fonctionnement. La mise en évidence des facteurs-clés conduit à définir les objectifs principaux et secondaires du projet. Ces mêmes facteurs peuvent également montrer les limites du projet et les contraintes auxquelles il est soumis.
4. La quantification des objectifs constitue le passage entre les aspects qualitatifs et les aspects quantitatifs. Cette quantification doit inclure aussi bien les contraintes du projet que ses variables constitutives. Le lien entre, d'une part, les contraintes (variables externes) et les variables constitutives (variables internes) et, d'autre part, les objectifs (variables de sortie) est effectué par un outil de simulation. Si la simulation prend en compte des aspects physiques (considération temporelle), elle devient dynamique.
5. A partir des résultats de simulation, une réflexion est menée pour aboutir à la mise en évidence de quelques indicateurs synthétiques attribués à chaque objectif. Dans le cas idéal, chaque objectif n'a qu'un indicateur.
6. Parallèlement, l'investissement commun à tous les objectifs est recherché. Il s'agit souvent de l'investissement financier. Cet investissement, défini dans son unité physique propre, devient le dénominateur commun du système ainsi que l'unité de comparaison.
7. Pour chaque objectif, le système est optimisé partiellement en maximisant les produits de l'objectif et en minimisant l'investissement nécessaire. Ces optimisations définissent ainsi les fonctions de transfert optimales entre l'unité physique de l'objectif et l'unité de comparaison.
8. Le système est ensuite optimisé globalement en maximisant les produits des objectifs et en minimisant l'investissement nécessaire. Les produits des objectifs peuvent être pris comme un tout par les fonctions de transfert ou former des groupes d'objectifs partiels.
9. Le filtre synergique réduit les solutions issues de l'optimisation à un ensemble de solutions qui permet, par la mise en commun des objectifs, un investissement réduit.
10. Le filtre des acteurs se divise en deux parties. Il élimine les solutions qui ne correspondent pas aux attentes des acteurs. Il est constitué, d'une part, par le filtre inférieur qui supprime les solutions qui n'apportent pas une quantité suffisante pour au moins un des objectifs.
11. D'autre part, le filtre supérieur supprime les solutions qui génèrent une quantité excessive pour un des objectifs. De ce fait, ces solutions deviendraient trop chères pour cet objectif.
12. Finalement, les solutions restantes sont celles qui peuvent être discutées par les instances de décision du projet.

Le résultat final est un set de solutions techniquement réalisables, optimales du point de vue des objectifs, synergiques, acceptables dans le sens où elles respectent les minima demandés et payables. Dans la mesure où ces solutions existent, la méthode développée ci-dessus permet de les mettre en évidence. Le tableau 6.4 fait le parallèle entre les étapes de la méthode et les résultats atteints.

6.9 Conclusions

Selon la citation donnée en en-tête de ce chapitre, l'ensemble de la méthodologie développée peut être définie comme une série de filtres successifs. Après la définition du projet par ses

TAB. 6.4: Lien entre les étapes et les résultats atteints

N°	Etape	Résultat atteint
1	Analyse du contexte	Liste des acteurs
2	Modélisation quantitative	Liste des facteurs
3	Analyse mathématique	Liste des objectifs
4	Modélisation quantitative	Solutions techniquement réalisables
5	Agrégation	Indicateurs agrégés
6	Dénominateur commun	Unité de comparaison
7	Optimisations partielles	Fonctions de transfert
8	Optimisation globale	Solutions optimales
9	Filtre synergique	Solutions synergiques
10	Filtre inférieur	Solutions satisfaisantes
11	Filtre supérieur	Solutions payables
12	Résultat	Solutions viables

objectifs et ses contraintes, la quantification de ce dernier aboutit à un espace de solutions dont la dimension vaut le nombre de ses variables internes. En admettant que toutes les variables sont indépendantes et que l'une d'elles au moins est continue, le nombre de solutions est alors théoriquement infini.

A partir de cet espace infini et à cause des contraintes sur les variables internes, les outils de simulation produisent des solutions qui sont techniquement réalisables. Avec la discrétisation des variables, le nombre de solutions relève alors de la combinatoire. Par exemple, quinze variables internes avec chacune 30 possibilités génèrent $1.4 \cdot 10^{22}$ possibilités. Ce nombre, sans être infini, reste encore très grand.

Les optimisations prennent le relais et ne retiennent que les solutions optimales au sens de leurs objectifs. La combinaison d'optimisations partielles n'est qu'une étape pour comparer des objectifs *a priori* incomparables. Selon que l'optimisation est effectuée avec deux ou trois objectifs, le nombre de solutions optimales varie entre quelques centaines et quelques milliers.

Le filtre synergique supprime les solutions dont la mise en commun des objectifs conduit à un non-sens. Cet indicateur, par les solutions qu'il retient justifie en un même temps la synergie recherchée. Il permet d'éliminer entre 75 et 90 % des solutions de l'étape précédente. A ce stade, le nombre de solutions est ramené à quelques dizaines, éventuellement une centaine.

Le dernier filtre fixe les bornes de l'espace souhaité par chacun des acteurs. Seules les solutions de l'étape précédente qui sont dans cet espace sont retenues. Selon la nature du problème et les exigences imposées par les acteurs, le nombre de solutions retenues est de l'ordre de l'unité à la dizaine.

Le paragraphe 1.6 du chapitre 1^{er} annonce trois buts spécifiques à ce travail de recherche. Ces trois buts sont repris ci-dessous et comparés aux résultats obtenus par la méthode développée.

Le premier but spécifique consiste à quantifier l'impact des décisions techniques sur l'ensemble des acteurs du système. Avec la définition des acteurs et de leur attentes à la première étape, ce but est surtout atteint par la double modélisation qualitative et quantitative. Cette

seconde modélisation permet notamment de chiffrer précisément les performances obtenues par un aménagement donné.

Le deuxième but spécifique vise la répartition des coûts. Par les fonctions de transfert issues des optimisations partielles et surtout avec la suppression des solutions non-synergiques, la clé proposée de répartition des coûts s'oriente vers une distribution objective. Elle est basée implicitement sur les coûts occasionnés et les produits réellement obtenus par chaque objectif.

Enfin, le dernier but spécifique est le développement d'un outil d'aide à la discussion. Par les différents filtres élaborés, les solutions retenues, d'une part, répondent aux attentes des différents objectifs et, d'autre part, assurent d'être les meilleures solutions existantes. Les solutions ainsi proposées devraient constituer un point de départ consensuel.

7 Application de la méthodologie au cas d'étude sur le Rhône valaisan

La sagesse c'est d'avoir des rêves suffisamment grands pour ne pas les perdre de vue quand on les poursuit

(Oscar Wilde)

7.1 Introduction

La méthode développée dans le cadre de ce travail est appliquée successivement à trois variantes quantitatives du projet proposé dans le chapitre d'introduction. Les deux premières variantes sont des cas théoriques. La troisième reprend les dimensions du coude que forme le Rhône à Riddes (Valais, Suisse). Les étapes qualitatives de la méthode sont appliquées tout au long du chapitre 4^{ème} et restent valables pour les trois variantes. Seul un bref rappel de ces dernières est donné ci-dessous avec leurs principaux résultats.

Ce chapitre s'étend plus amplement sur les résultats quantitatifs obtenus pour chacune des variantes. Les optimisations partielles et leurs fronts de Pareto ainsi que les optimisations globales suivies des différents filtres sont exposées et commentées en détail. Les solutions finales retenues pour les trois variantes font l'objet d'un commentaire final commun.

Les deux variantes hypothétiques sont étudiées pour deux années représentatives. La référence, comme analysée au paragraphe 5.2, reste l'année 1993. Toutefois, pour le marnage, l'année 1999 représente un état futur probable (remise en marche de la centrale de Cleuson-Dixence). C'est pourquoi elle est également étudiée.

La variante Riddes est globalement étudiée avec ces deux années. Toutefois, pour la définition des courbes de transfert de l'énergie et du social, elle considère directement les années moyennes de ces domaines (2000 et 2001 respectivement).

7.2 Etapes qualitatives de l'analyse du projet

Les trois premières étapes de la méthode (liste des acteurs, liste des facteurs, analyse du réseau qualitatif) sont effectuées au chapitre 4^{ème} aux paragraphes 4.2.3 et 4.2.5. Les résultats permettent de définir les principales contraintes du système ainsi que ses objectifs.

Les objectifs retenus sont :

- L'état écologique du cours d'eau aval. Il constitue l'objectif principal de l'aménagement. Son but est de restaurer, autant que physiquement possible, un régime hydraulique naturel.

- L'état écologique du réservoir lui-même. Cet objectif, bien que classé à un niveau relativement inférieur par la méthode qualitative, constitue un contre-poids nécessaire à la réduction du marnage aval pour obtenir une solution équilibrée. Il est soutenu par les objectifs liés à la production d'énergie, l'utilisation du réservoir pour les loisirs et l'intégration paysagère (stabilité du niveau recherchée).
- L'impact sur les crues. Cet objectif secondaire utilise le réservoir de façon opportuniste. Toutefois, pour qu'il puisse être pris en compte dans l'optimisation, il doit constituer un objectif indépendant.
- La production d'énergie. Un raisonnement identique à celui suivi pour les crues justifie la production d'énergie comme un objectif indépendant.
- L'utilisation du réservoir pour les loisirs. Un raisonnement identique à celui des crues justifie l'utilisation du réservoir pour les loisirs comme un objectif indépendant.
- Le coût total de l'aménagement. Cet objectif constitue de fait une contrainte du système. Toutefois, il est transformé en un objectif pour assurer, au niveau des résultats d'optimisation, un coût minimal de l'aménagement.

Les contraintes, hormis celles liées au système lui-même (limites physiques pour le fonctionnement du système ainsi que sa faisabilité constructive), sont principalement liées aux aspects politiques pour la faisabilité de l'aménagement ainsi qu'à ses impacts sur la nappe phréatique.

Les impacts du réservoir sur la nappe phréatique sont étudiés par Filliez (2006). Les résultats montrent la nécessité de construire un voile d'étanchéité sur l'ensemble du périmètre du réservoir ainsi qu'un contre-canal en pied de digue. Cette étude montre également le peu d'impact d'une couche d'étanchéité sur le fond du réservoir. Les simulations numériques effectuées montrent que, avec un contre-canal et un voile d'étanchéité, les infiltrations du réservoir ajoutent un débit supplémentaire de 1 % à 3 % à celui qui s'écoule actuellement dans la nappe.

Les contraintes d'ordre politiques sont considérées de deux manières. D'une part, avec la mise en commun de différents objectifs qui répondent à un maximum d'attentes, le projet final doit s'approcher au mieux de la faisabilité. D'autre part, avec les limites imposées sur les différentes tailles admissibles (contraintes sur les variables internes du système), le projet final se situe dans un espace de solutions théoriquement admissibles.

7.3 Etapes quantitatives communes de l'analyse du projet

La quatrième étape de la méthode, la quantification des objectifs, est de loin la plus longue à réaliser. La définition, puis la programmation et finalement la mise en commun des différents outils de simulation quantitative font l'objet du chapitre 5^{ème}.

Les différents résultats de simulation sont agrégés à la cinquième étape. Les indicateurs sont donnés, pour rappel, dans le tableau 7.1, en ne retenant que ceux utilisés par les étapes ultérieures.

La recherche du dénominateur commun à l'ensemble des objectifs du système constitue la sixième étape. Pour l'aménagement à buts multiples, le dénominateur commun est l'investissement nécessaire à chaque objectif. Il est calculé sur la base d'un aménagement à but unique.

TAB. 7.1: Liens entre les objectifs et les résultats de simulation

Objectif	Indicateur	Unité
Marnage aval	I_{av}	m/an
Battements du réservoir	I_{res}	m/an
Protection contre les crues	V_{disp}	10^6m^3
Production d'énergie	E_{el}	GWh/an
Utilité de loisirs	Fr_{tot}	Visites/an
Coût total	C_{tot}	CHF

7.4 Etapes quantitatives propres à la variante théorique large

7.4.1 Objectifs de la variante large

La variante large constitue la première application quantitative de la méthode. Pour tester la solidité de la méthode sans imposer des conditions trop restrictives, les contraintes sur les variables internes sont intentionnellement laissées larges. Le but recherché par cette application est surtout de montrer la capacité de la méthode à mettre en évidence les solutions optimales.

Cette variante a également permis de trouver la forme la plus appropriée pour l'optimisation globale. Le premier calcul est effectué avec comme objectifs le coût total, le marnage aval et les revenus actualisés de l'aménagement. Le second calcul a seulement deux objectifs : le coût total et l'investissement potentiel. Le premier calcul est effectué deux fois, soit avec un espace de variables continues ou soit avec un espace de variables discrètes. Les résultats sont comparables. Les calculs avec deux objectifs ont surtout l'avantage d'être indépendants du calcul d'actualisation des revenus.

7.4.2 Définition et contraintes de la variante large

Le tableau 7.2 énumère les différentes variables internes sur lesquelles agit l'outil d'optimisation avec leur espace admissible. Ce tableau constitue la définition de la variante large, à savoir un ensemble de solutions qui respectent ces contraintes. Le réservoir et la zone d'épanchement sont de forme rectangulaire.

Les valeurs estivales de gradient et d'amplitude s'ajoutent à celles hivernales. De la sorte, le modèle assure une plus grande liberté estivale malgré un choix aléatoire des valeurs. Les niveaux minimaux admissibles dans le réservoir sont calculés à partir des valeurs de battements déduites de la hauteur utile. La hauteur utile nulle possible pour la zone d'épanchement permet de supprimer cette zone du système.

7.4.3 Optimisation partielle pour l'énergie de la variante large

L'optimisation partielle énergétique nécessite tout d'abord d'adapter la variable de configuration du système. Ainsi, le réservoir, la zone d'épanchement et les infrastructures de loisirs sont supprimés. La gestion rejoint également celle d'un aménagement au fil de l'eau, c'est-à-dire l'exploitation avec le niveau amont constant. De cette manière, l'exploitation maximise la production énergétique.

TAB. 7.2: Variables internes et leur domaine admissible de la variante large

Variable	Unité	Limite inf	Limite sup
Gradient aval hivernal	cm/h	1	25
Gradient aval estival	cm/h	1	45
Amplitude aval hivernale	cm	10	80
Amplitude aval estivale	cm	10	150
Battements rés hivernal	cm	100	500
Battements rés estival	cm	10	200
Hauteur utile	cm	768	1518
Débit équipé	m ³ /s	180	350
Digue perméable	m ³ /s	1	5
Longueur réservoir	m	200	3000
Largeur réservoir	m	200	3000
Longueur épanchement	m	200	3000
Largeur épanchement	m	200	1500
Hauteur utile épanchement	cm	0	400

L'optimisation partielle est effectuée à partir de l'année 1993 avec les objectifs suivants :

- minimiser le coût total ;
- maximiser la production d'énergie ;
- maximiser la puissance installée.

La figure 7.1 donne le front de Pareto pour les deux objectifs principaux, le coût total et l'énergie produite. Les points qui s'écartent du front correspondent à des solutions optimales pour l'objectif de puissance. Les énergies annuelles possibles varient entre 40 et 120 *GWh/an* pour un coût total compris entre 75 et $980 \cdot 10^6$ CHF. Ce prix de $980 \cdot 10^6$ CHF est lié à un aménagement dont la hauteur utile vaut 15.18 m. Techniquement, cet aménagement est difficilement réalisable en regard des impacts qu'il aurait sur la nappe phréatique.

Un résultat comparable qui exprime le coût unitaire par énergie annuelle produite est donné à la figure 7.2. Cette courbe, issue du front de Pareto, constitue la fonction de transfert entre la production annuelle d'énergie exprimée en *kWh* et l'investissement donné en CHF. Le coût optimal se situe pour des faibles productions annuelles. La puissance électrique installée correspondante se situe aux alentours de 8 *MW*.

Les résultats optimaux sont résumés dans le tableau 7.3. Sur la base de ces résultats, deux conclusions sont tirées :

- 1.79 CHF d'investissement par unité énergétique produite annuellement (*kWh/an*) constitue le minimum nécessaire pour inclure une production d'énergie dans l'aménagement à buts multiples.
- 75 10^6 CHF constituent également un minimum pour l'investissement total nécessaire de cet objectif.

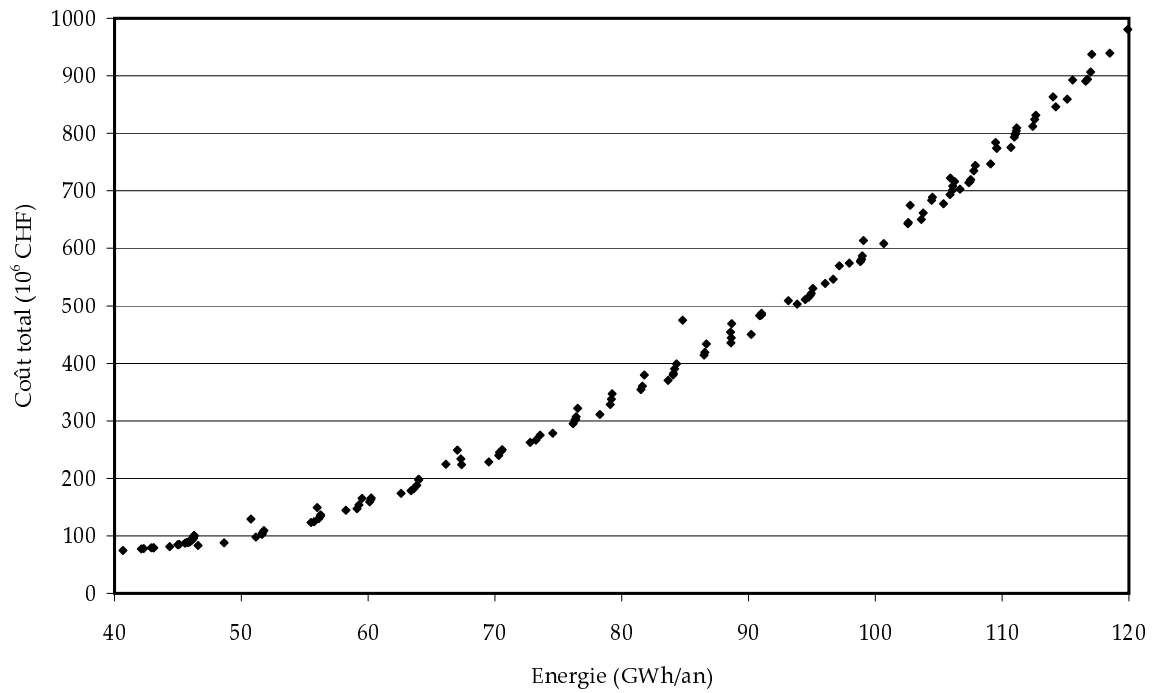


FIG. 7.1: Coût total de l'aménagement énergétique en fonction de l'énergie produite de la variante large

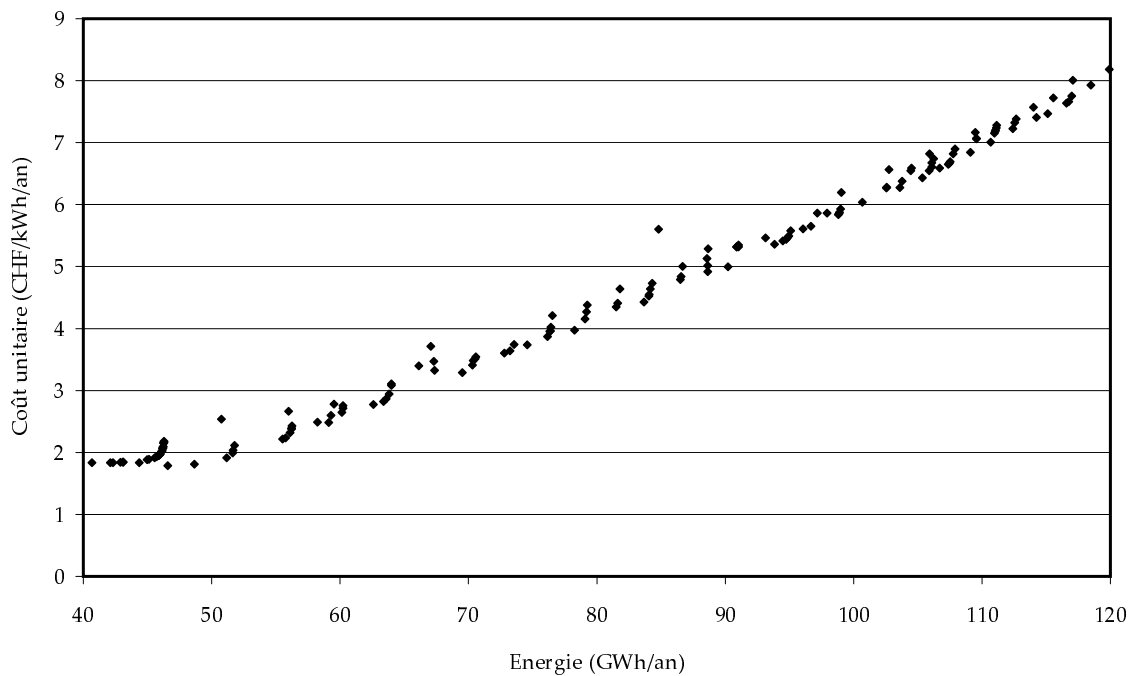


FIG. 7.2: Coût unitaire de l'aménagement énergétique en fonction de l'énergie produite de la variante large

TAB. 7.3: Résultats de l'optimisation partielle énergétique de la variante large

Variable	Investissement minimal	Unité
Coût total	74'695'000	CHF
Coût unitaire puissance	8'306	CHF/kW
Coût unitaire énergie	1.79	CHF/kWh/an

7.4.4 Optimisation partielle pour la protection contre les crues de la variante large

L'optimisation partielle pour le calcul de la fonction de transfert entre le volume disponible en cas de crue et l'investissement relatif modifie également le système initial. Il modifie le réservoir en une grande zone d'épanchement. Le barrage en rivière est supprimé au profit d'un déversoir vanné qui effectue la gestion de la zone.

L'optimisation partielle, à partir des résultats obtenus par simulation des crues de l'étude CONSECRU 2 (Hingray et al., 2006), est effectuée avec les objectifs suivants :

- minimiser le coût total ;
- maximiser le volume de rétention ;
- maximiser le bénéfice. Ce dernier est calculé comme étant la différence entre le coût total pour la construction de l'aménagement de rétention et le coût total pour la construction de digues aval. Il s'agit donc d'une économie réelle.

La figure 7.3 donne le front de Pareto pour les deux objectifs principaux, soit le coût total et le volume de rétention. Les volumes sont compris entre 0 et $20 \cdot 10^6 \text{m}^3$ pour un coût total compris entre 4 et $39 \cdot 10^6 \text{CHF}$.

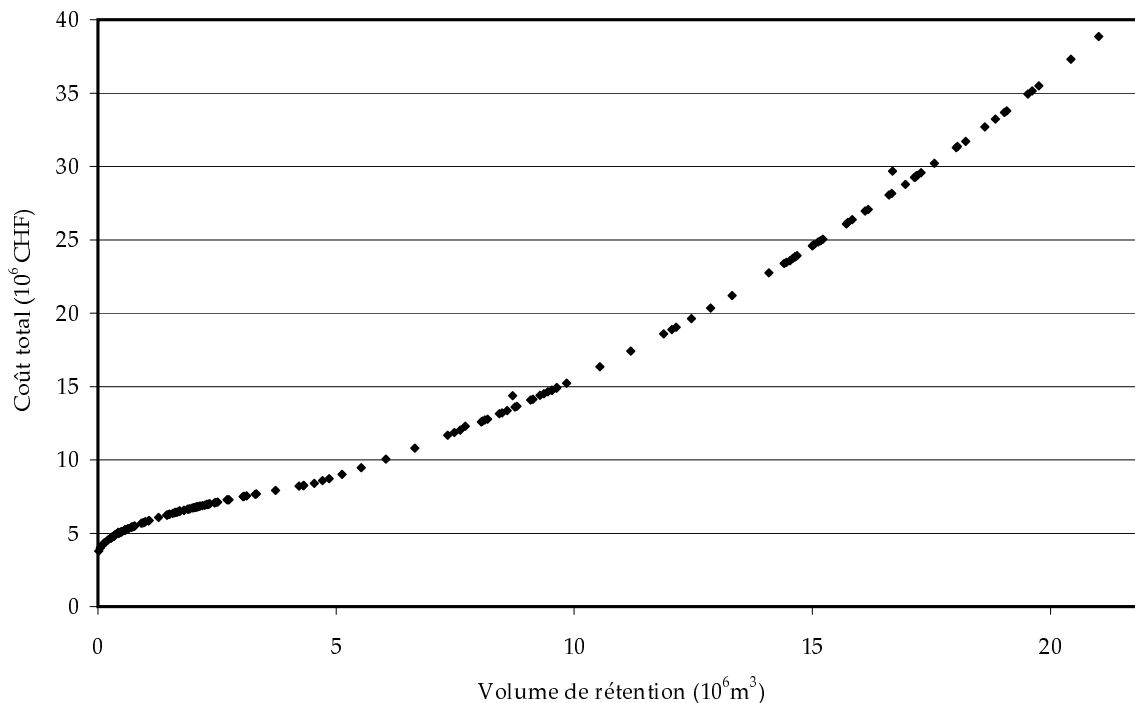


FIG. 7.3: Coût total de l'aménagement de rétention des crues en fonction du volume disponible de la variante large

Un résultat comparable exprimant le coût unitaire par volume disponible est donné à la figure 7.4. Cette courbe, issue du front de Pareto, constitue la fonction de transfert entre le volume disponible exprimé en 10^6m^3 et l'investissement donné en CHF. Le prix unitaire optimal se situe pour un volume aux environs de $10 \cdot 10^6\text{m}^3$. La courbe reste assez plate pour des valeurs comprises entre 7 et $17 \cdot 10^6\text{m}^3$.

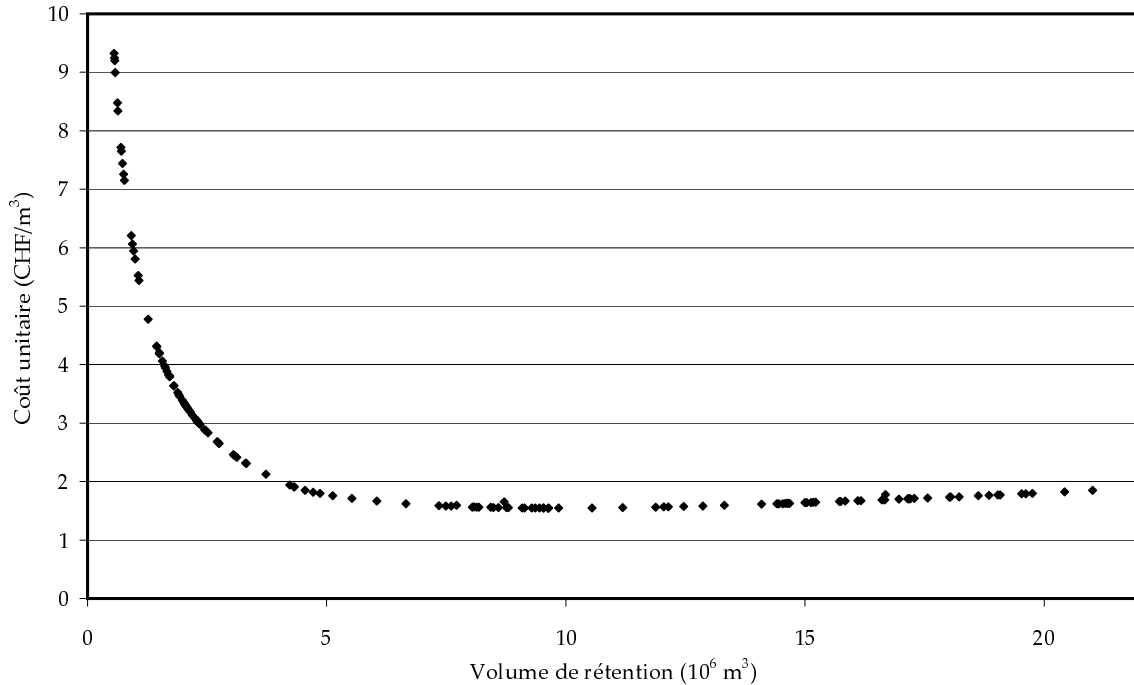


FIG. 7.4: Coût unitaire de l'aménagement de rétention des crues en fonction du volume disponible de la variante large

La comparaison entre le coût total de l'aménagement et l'économie réalisée sur les digues aval génère la figure 7.5. La courbe en cloche obtenue fixe la borne inférieure en dessous de laquelle le bénéfice est négatif (limite inférieure à $1.5 \cdot 10^6\text{m}^3$). Les limites imposées aux variables internes ne permettent pas d'atteindre la limite supérieure. Une simulation similaire avec ces contraintes relâchées montre une limite supérieure à $35 \cdot 10^6\text{m}^3$. Un tel volume dépasse largement les volumes visés par l'aménagement à buts multiples.

Pour des volumes compris entre 4 et $12 \cdot 10^6\text{m}^3$, les bénéfices oscillent entre 80 et 100 % de l'investissement. Une économie de 100 % signifie que 1 CHF investi dans l'aménagement de rétention permet d'économiser 2 CHF dans la construction de digues aval. L'économie maximale possible s'approche des $14 \cdot 10^6\text{CHF}$ avec un tronçon aval de 50 km.

Les résultats optimaux sont résumés dans le tableau 7.4. Sur la base de ceux-ci, trois conclusions sont tirées :

- La valeur de 1.55 CHF d'investissement par volume unitaire disponible (m^3) constitue le minimum nécessaire pour inclure la protection contre les crues dans l'aménagement à buts multiples.
- Un montant de $14 \cdot 10^6\text{CHF}$ constitue l'économie maximale possible.
- Il est difficile d'estimer *a priori* l'investissement minimal car celui-ci est dépendant du volume réalisé. $6 \cdot 10^6\text{CHF}$ semblent toutefois constituer un investissement minimal nécessaire pour obtenir un bénéfice positif lié à la rétention.

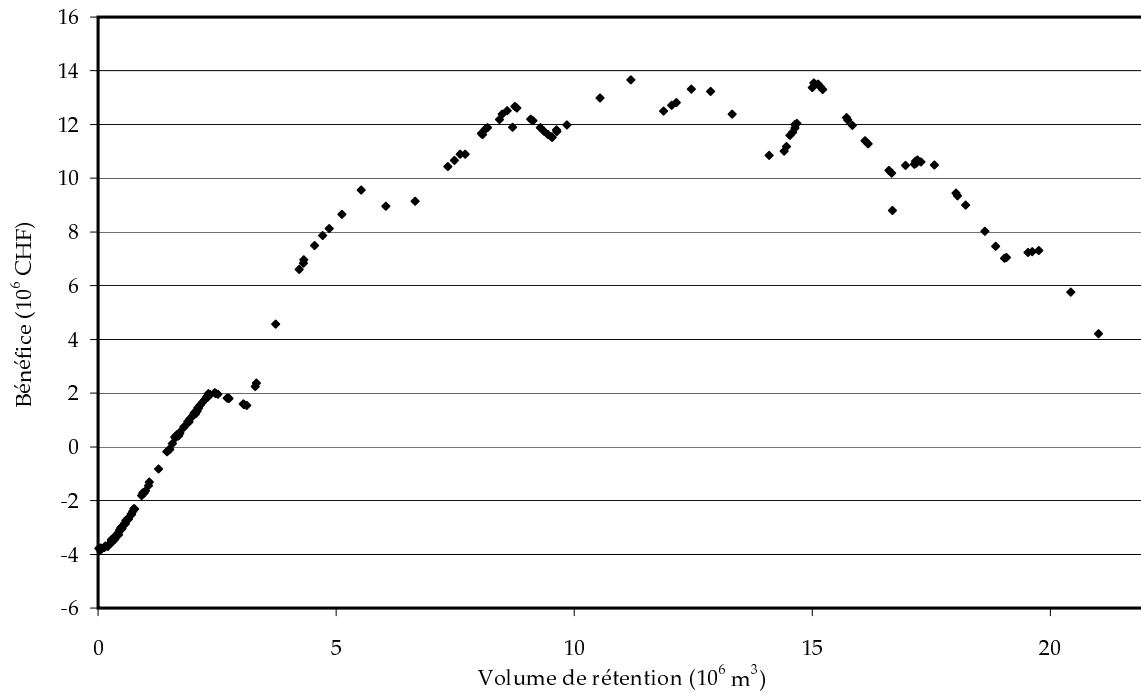


FIG. 7.5: Bénéfice de l'objectif crue en fonction du volume de rétention de la variante large

TAB. 7.4: Résultats de l'optimisation partielle liée à la protection contre les crues de la variante large

Variable	Investissement minimal	Unité
Coût total	6'000'000	CHF
Coût unitaire du volume	1.55	CHF/m ³

7.4.5 Optimisation partielle pour la réduction du marnage de la variante large

Le marnage aval ne peut pas être séparé de la gestion du réservoir. Pour cette raison, les deux objectifs, réduction du marnage aval et limitation des battements dans le réservoir sont optimisés simultanément. A cause de la hiérarchie établie entre ces deux objectifs (primauté de l'aval sur le réservoir) et également à cause d'une référence existante pour le marnage aval (marnage sans aménagement), ce dernier est pris en premier pour définir un coût unitaire. Le coût unitaire de réduction des battements dans le réservoir devient ainsi relatif à la solution de référence choisie pour le marnage aval. Un calcul similaire en inversant l'ordre des priorités (battements dans le réservoir et marnage aval relatif à la solution de référence pour le réservoir) conduit à des coûts unitaires sensiblement équivalents.

L'aménagement est réduit à un réservoir géré de manière optimale par un barrage en rivière (gestion optimisée telle que présentée au paragraphe 5.4). La production d'énergie, la zone d'épanchement ainsi que les infrastructures de loisirs sont absentes.

L'optimisation partielle est effectuée, à partir de l'année de référence 1993, avec les objectifs suivants :

- minimiser le coût total ;
- minimiser le marnage aval ;
- minimiser les battements dans le réservoir.

Réalisé avec trois objectifs directement antagonistes, le front de Pareto constitue une surface dans l'espace tridimensionnel des solutions possibles. Les résultats montrés ci-dessous ne sont que les projections dans les plans d'intérêt.

La figure 7.6 illustre, directement avec les coûts unitaires, le front de Pareto obtenu pour la réduction du marnage aval. La référence est le marnage existant de l'année 1993, soit 302 m de variation annuelle mesurée dans le cours d'eau.

Cette figure montre une courbe enveloppe inférieure assez nette avec une zone optimale comprise entre 100 et 150 m/an de réduction de marnage. Le coût associé s'élève à 528'000 CHF par mètre évité de variation annuelle. La solution optimale retenue conserve dans le cours d'eau aval un marnage de 173 m/an (soit 129 m/an évité sur 302 m). A cause du premier objectif (minimiser les coûts), cette solution concentre au maximum le marnage dans un petit réservoir. En conséquence, les battements dans le réservoir associé prennent une valeur quasi maximale avec 665 m/an (troisième plus grande valeur).

A partir de cette solution, la projection des mêmes solutions sur le plan des battements dans le réservoir génère la figure 7.7.

Si la frontière des 665 m/an est bien visible sur la figure 7.7, la courbe enveloppe inférieure l'est un peu moins. La solution optimale se situe aux environs des 100 m de réduction annuelle. La valeur associée vaut 80'000 CHF. Cette valeur semble indépendante de la réduction des battements (courbe enveloppe inférieure horizontale).

Un second calcul effectué en commençant par les battements dans le réservoir (la valeur maximale des battements constitue alors la valeur de référence) conduit aux valeurs données dans le tableau 7.5. La légère différence vient de la valeur de référence prise pour le réservoir. Ce dernier a un battement maximal observé de 770 m/an (contre 665 m/an pour la solution de référence retenue). Cette différence montre les limites des solutions obtenues

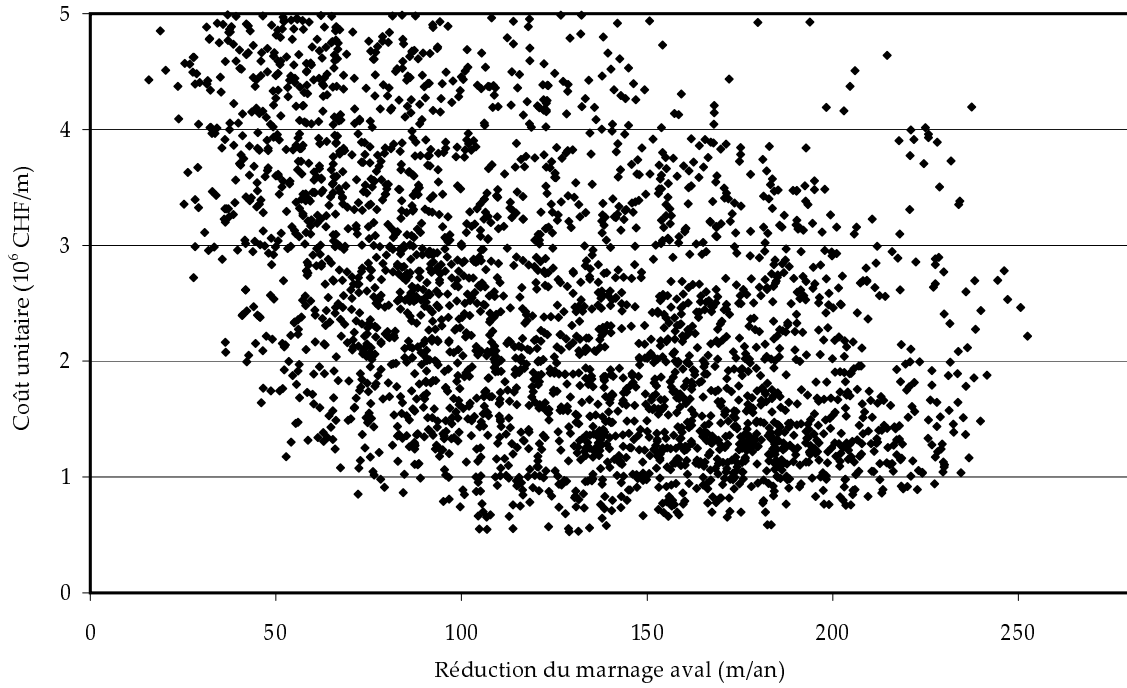


FIG. 7.6: Coût unitaire de l'aménagement écologique en fonction de la réduction du marnage aval de la variante large

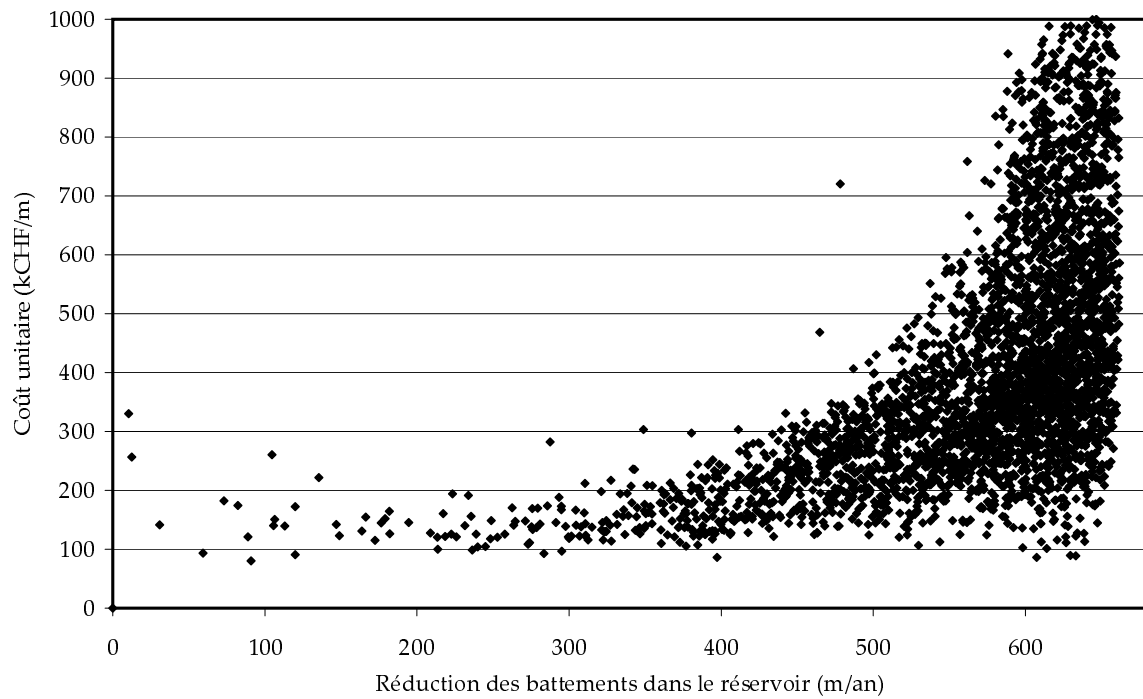


FIG. 7.7: Coût unitaire de l'aménagement écologique en fonction des battements dans le réservoir de la variante large

par l'outil d'optimisation et certainement le nombre un peu trop faible d'itérations effectuées (15'000).

TAB. 7.5: Résultats de l'optimisation partielle liée à la réduction du marnage aval et des battements dans le réservoir de la variante large pour 1993 (CHF/m/an)

Ordre du calcul	Aval	Réservoir
Premier calcul		
Aval puis réservoir	528'000	80'000
Second calcul		
Réservoir puis aval	467'000	79'000

Pour l'optimisation globale, ce sont les valeurs obtenues par le premier calcul qui sont retenues. Cette logique suit la hiérarchie établie entre les deux objectifs.

7.4.6 Optimisation partielle pour l'utilisation liée aux loisirs de la variante large

L'optimisation de l'aménagement dans le seul but d'une utilité sociale conduit à réduire le projet à un réservoir déconnecté du cours d'eau. Avec la suppression du barrage en rivière, de la centrale et de la passe à poisson, les coûts sont fortement réduits. Positionnée pour être alimentée directement par la nappe phréatique, cette solution supprime également toutes les digues ainsi que les problèmes liés à l'élévation du niveau d'eau. L'aménagement retenu s'apparente à celui des îles de Sion ou de Martigny (anciennes gravières dont les rives sont réaménagées dans un but d'utilité sociale et touristique). L'aménagement à but social uniquement est constitué d'un réservoir, de petite digues l'entourant ainsi que d'une surface additionnelle de 10 m² par visiteur. La surface additionnelle totale est calculée sur le jour de plus forte fréquentation.

L'optimisation partielle est effectuée à partir de l'année 1993 avec les objectifs suivants :

- minimiser le coût total ;
- maximiser le nombre annuel de visites.

Selon le modèle de fréquentation élaboré au paragraphe 5.9, la fréquentation est dépendante des températures de l'air et de l'eau du réservoir. Ce dernier étant déconnecté du cours d'eau pour cette optimisation, l'effet de la nappe phréatique devient prépondérante. Sur la base de Schürch and Vuataz (2000) et des vitesses mesurées dans la nappe phréatique, le réservoir admet un débit constant de la nappe calculé par l'équation 7.1.

$$Q_{nappe} = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot S_{perp} \quad (7.1)$$

où S_{perp} est la section perpendiculaire du réservoir par rapport à l'écoulement de la nappe.

La figure 7.8 donne le front de Pareto pour les deux objectifs, le coût total et le nombre de visites. L'optimisation produit deux grappes de résultats. La première se situe aux environs de 2·10⁶CHF pour un nombre très faible de visites. La seconde grappe atteint le maximum de visites pour un coût proche des 3·10⁶CHF. Le nombre maximal de visites se situe juste en dessous des 60'000 visites par année.

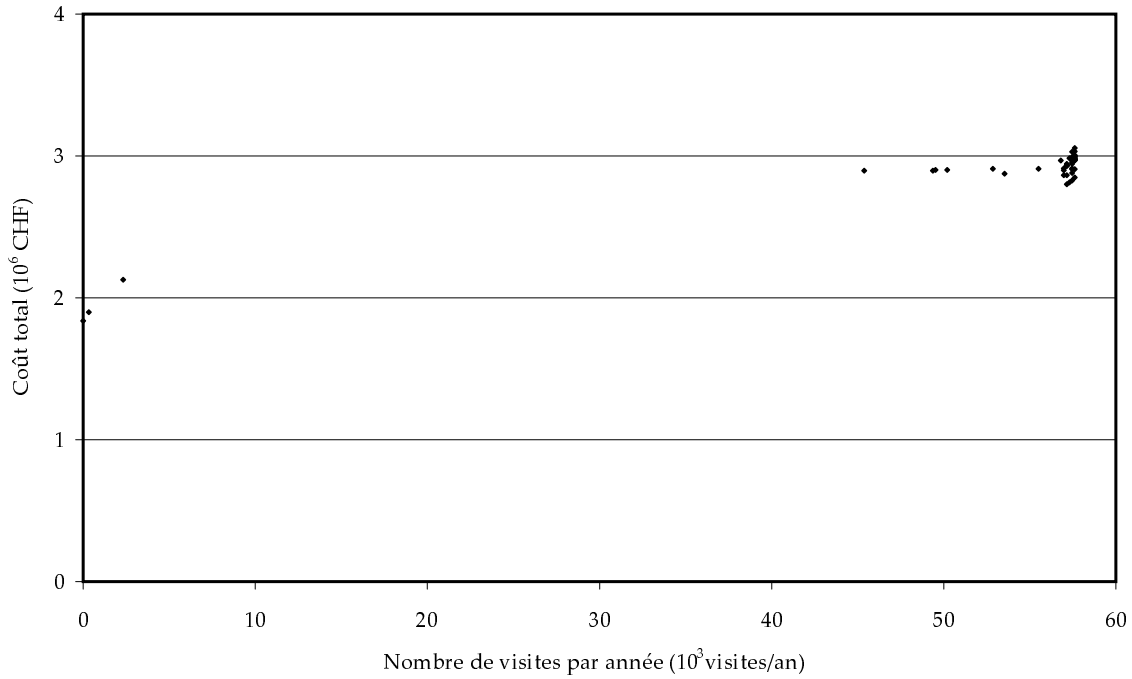


FIG. 7.8: Coût de l'aménagement de loisirs en fonction du nombre de visites de la variante large

Le coût unitaire par visite est donné à la figure 7.9. Pour permettre la visualisation complète des résultats, ces derniers sont représentés dans une échelle de coût unitaire logarithmique. Malgré le manque de solutions intermédiaires entre 5'000 et 45'000 visites, la transformation du front de Pareto apparaît visiblement avec une fonction du type $1/x$. Un agrandissement de la zone d'intérêt est donné dans le cadre supérieur droit de la figure 7.9 pour un nombre de visites compris entre 45'000 et 60'000 et un coût unitaire compris entre 45 et 65 CHF.

Les résultats optimaux sont résumés dans le tableau 7.6. Sur la base de ces résultats, deux conclusions sont tirées :

- le coût minimal de la visite est de 49 CHF. Ce montant vient confirmer celui de 46 CHF par visite calculé avec le modèle du coût des transports calé sur les enquêtes effectuées en Valais (c.f. paragraphe 5.9.6.1).
- la variabilité de l'investissement total nécessaire pour inclure dans l'aménagement à buts multiples une composante sociale est faible. L'investissement oscille entre 2 et $3 \cdot 10^6$ CHF.

TAB. 7.6: Résultats de l'optimisation partielle liée aux loisirs de la variante large

Variable	Investissement minimal	Unité
Coût total	1'900'000	CHF
Coût unitaire de la visite	49.03	CHF/visite

7.4.7 Optimisation globale de la variante large

Sur la base des coûts unitaires optimaux calculés par les optimisations partielles, les quantités produites par chaque objectif peuvent être transformées en un investissement potentiel. Pour rappel, ces coût unitaires sont donnés dans le tableau 7.7. Les fortes différences entre les coûts unitaires ne signifient pas pour autant que l'investissement des

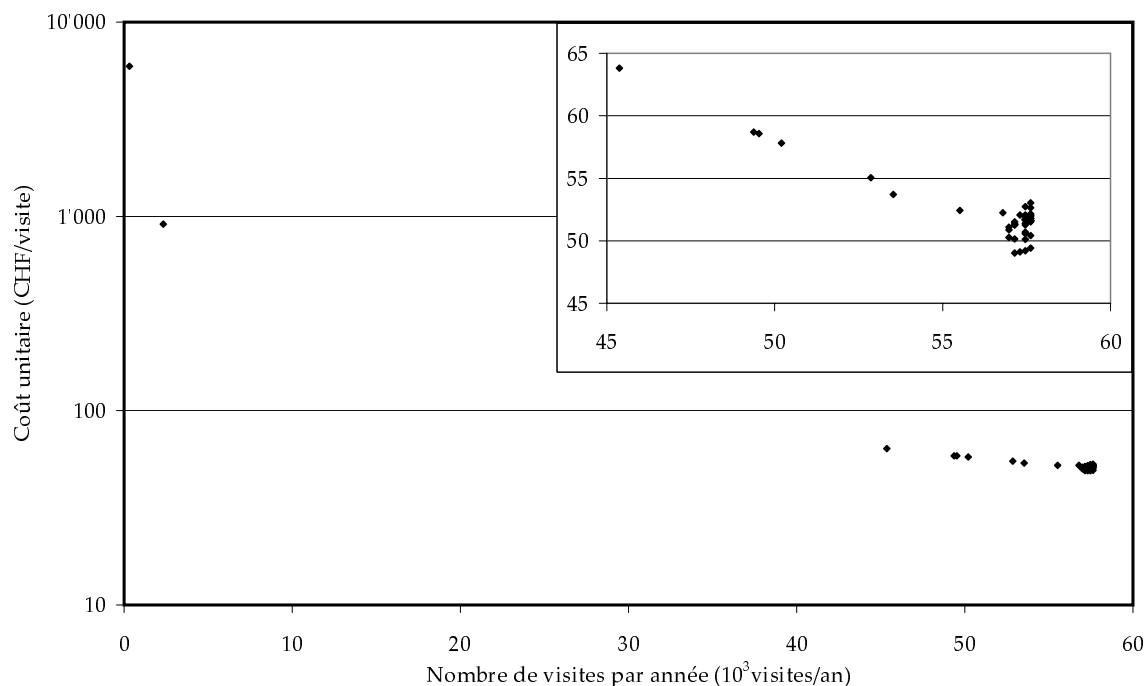


FIG. 7.9: Coût unitaire de l'aménagement de loisirs en fonction du nombre de visites de la variante large

objectifs reste identique. Ceux-ci sont encore multipliés par les quantités produites de chaque objectif. Ces quantités se situent dans des ordres de grandeur également très différents : des centaines de mètres pour le marnage contre des millions de kWh pour l'énergie. Ces différences dans les ordres de grandeur nécessitent également une précision adaptée pour les coûts unitaires.

TAB. 7.7: Résumé des résultats obtenus par les optimisations partielles de la variante large

Objectif	Coût unitaire	Unité
Laminage du marnage aval	528'000	CHF/m
Réduction des battements du réservoir	80'000	CHF/m
Utilité de loisirs	49.03	CHF/visite
Production d'énergie	1.79	CHF/kWh
Rétention des crues	1.55	CHF/m ³

L'optimisation globale du système est effectuée avec les objectifs suivants :

- minimiser le coût global ;
- maximiser l'investissement potentiel.

Les résultats bruts de l'optimisation globale sont donnés à la figure 7.10. La diagonale principale partage l'espace des solutions synergiques des solutions non-synergiques. Les 219 solutions retenues par l'optimisation forment un front de Pareto très distinct.

Les solutions présentées ont des coûts d'investissement qui oscillent entre 98 et $1'796 \cdot 10^6$ CHF. Les investissements potentiels sont compris entre 121 et $603 \cdot 10^6$ CHF. Ces quatre valeurs indiquent déjà que la zone d'intérêt se situe vers les solutions les moins chères. Une autre raison est peut-être liée à l'investissement nécessaire difficile à trouver pour des solutions trop onéreuses.

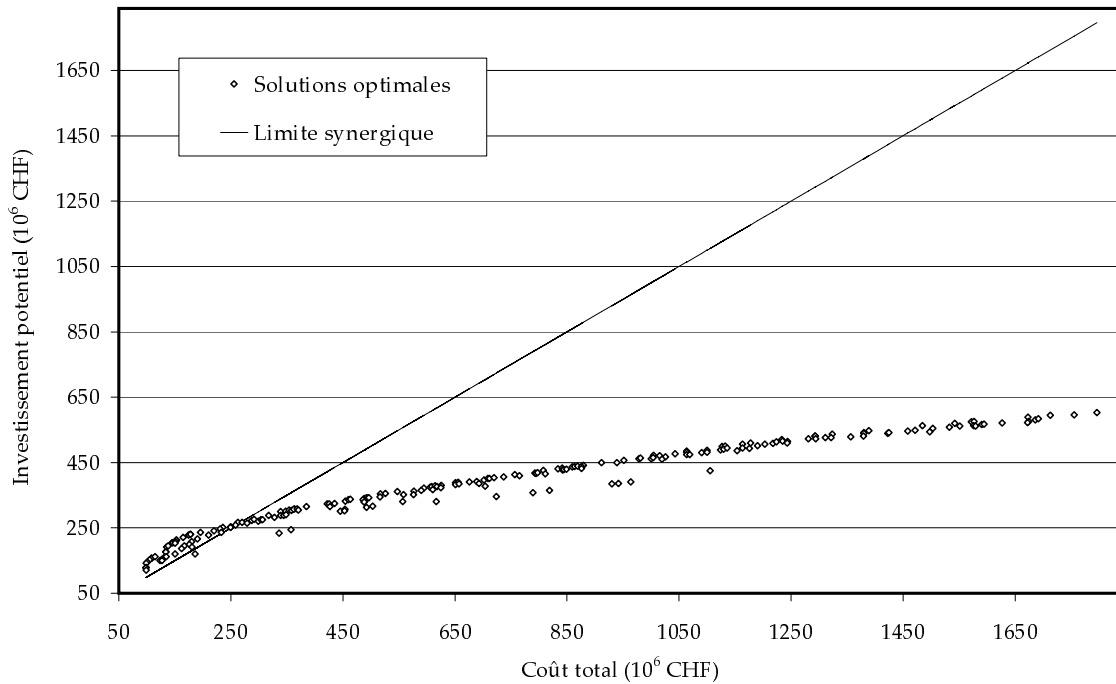


FIG. 7.10: Résultats bruts de l'optimisation globale de la variante large

7.4.8 Filtre synergique de la variante large

Le filtre synergique élimine toutes les solutions dont le coût dépasse l'investissement potentiel. La figure 7.10 indique clairement que les solutions dont le coût dépasse $250 \cdot 10^6$ CHF sont supprimées. La figure 7.11 donne un agrandissement de la zone d'intérêt. Le filtre synergique ne retient que 45 solutions sur les 219 optimales (élimination de 79 % des solutions).

Les résultats synergiques offrent une différence entre les coûts et les investissements potentiels comprise entre 0.4 et $60 \cdot 10^6$ CHF. Cette différence correspond à un indicateur de synergie (selon l'équation 6.3 donnée au paragraphe 6.5) compris entre 0.4 et 45 %. La solution la plus chère retenue avoisine les $265 \cdot 10^6$ CHF tandis que la moins chère vaut encore $98 \cdot 10^6$ CHF.

7.4.9 Filtres des acteurs de la variante large

Les filtres des acteurs interviennent comme dernière étape. En effet, les solutions synergiques les plus intéressantes (celles dont l'indicateur est élevé) ne respectent souvent que trois des cinq objectifs. Pour atteindre un faible coût, ces solutions réduisent la taille du réservoir. Les battements qu'elles génèrent suppriment toute utilisation ludique du réservoir. L'intérêt écologique du réservoir est également anéanti.

Le filtre inférieur supprime les solutions dont la quantité minimale ne respecte pas les exigences voulues. De ce fait, les solutions partiellement synergiques sont éliminées. Le filtre supérieur élimine les solutions trop chères.

Les bornes des deux filtres des acteurs sont données au tableau 7.8. Les quantités minimales associées au marnage et aux battements dans le réservoir sont prises comme des réductions par rapport à l'état existant (302 m de variation pour le marnage) ou par rapport à la

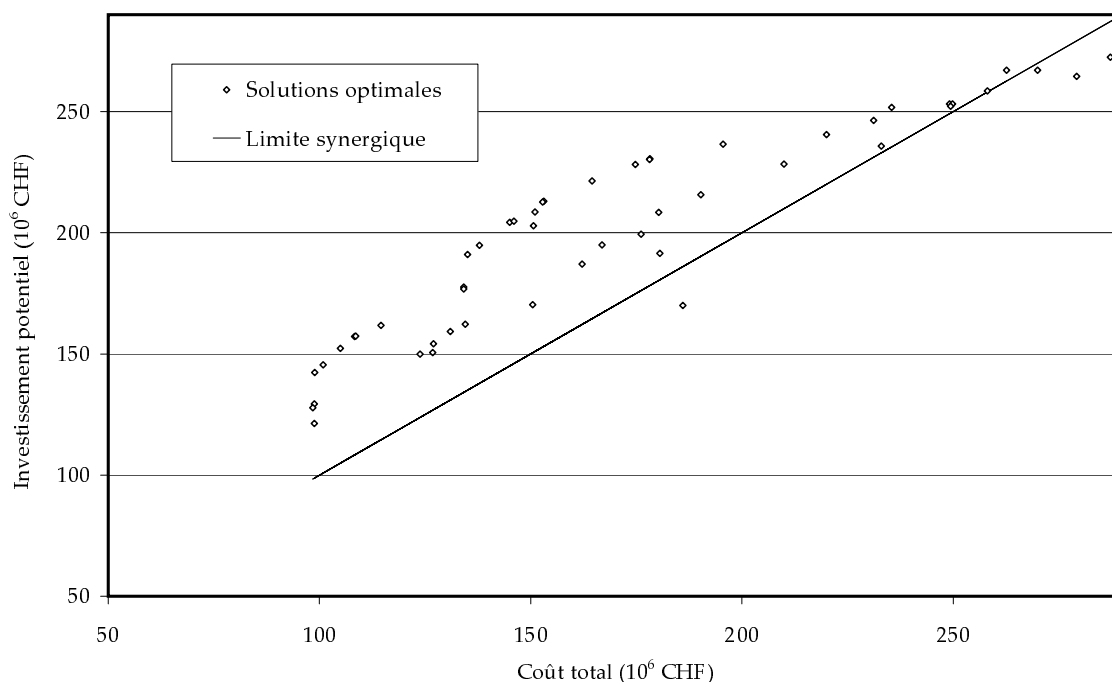


FIG. 7.11: Résultats synergiques de la variante large pour 1993

solution optimale choisie (665 m de battement). Les deux quantités minimales choisies imposent environ un quart de réduction.

TAB. 7.8: Bornes inférieures et supérieures du filtre des acteurs de la variante large

Objectif	Maximum		Minimum	
	Coût	Unité	Quantité	Unité
Marnage	125	10 ⁶ CHF	75	m/an
Battements	30	10 ⁶ CHF	150	m/an
Loisirs	3	10 ⁶ CHF	10'000	visites/an
Energie	100	10 ⁶ CHF	30	GWh/an
Crues	40	10 ⁶ CHF	3	10 ⁶ m ³

Les quantités minimales et les investissement maximaux sont choisis de manière large pour obtenir, dans un premier temps, un maximum de solutions. Ce premier filtre des acteurs retient 12 solutions sur les 45 solutions synergiques. Le tableau 7.9 donne un aperçu des solutions obtenues.

Sur la base de ces premiers résultats les bornes maximales des acteurs sont réduites. Le tableau 7.10 donne les nouvelles valeurs. Les bornes inférieures sont laissées aux mêmes valeurs.

Avec ce nouveau vecteur plus restrictif, le filtre des acteurs ne retient que deux solutions. Elles sont données au tableau 7.11. Ces solutions enfreignent *a priori* chacune l'une des bornes imposées. La première solution nécessite un investissement de l'objectif crues de 32 millions alors que la limite est de 30. De même, la seconde solution dépasse les limites imposées pour la production d'énergie. Ce léger débordement provient de la prise en compte, lors du calcul de sélection des solutions, du pourcentage synergique. C'est ainsi le coût réel et non le potentiel de chaque objectif qui est considéré.

TAB. 7.9: Solutions retenues avec les bornes du tableau 7.8 de la variante large (10⁶CHF)

Coût	Investissement potentiel						Synergie
	Total	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues	
190	215.7	94.2	14.5	1.3	73.7	32.0	13.4 %
220	240.5	110.0	20.3	2.6	79.3	28.3	9.3 %
210	228.4	94.6	18.5	0.9	84.0	30.4	8.7 %
235	251.8	109.2	22.2	2.4	84.0	34.0	6.9 %
263	267.0	120.2	22.5	2.6	83.5	38.2	1.7 %
249	253.2	104.9	23.0	2.3	87.0	36.0	1.7 %
233	235.7	99.2	16.4	2.5	90.8	26.8	1.2 %
258	258.4	111.7	27.5	2.7	85.8	30.7	0.1 %

TAB. 7.10: Bornes inférieures et supérieures réduites du filtre des acteurs de la variante large

Objectif	Maximum		Minimum	
	Coût	Unité	Quantité	Unité
Marnage	100	10 ⁶ CHF	100	m/an
Battements	20	10 ⁶ CHF	200	m/an
Loisirs	2.5	10 ⁶ CHF	10'000	visites/an
Energie	80	10 ⁶ CHF	30	GWh/an
Crues	30	10 ⁶ CHF	3	10 ⁶ m ³

TAB. 7.11: Solutions finales avec les bornes du tableau 7.10 de la variante large (10⁶CHF)

Coût	Investissement potentiel						Synergie
	Total	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues	
190	215.7	94.2	14.5	1.3	73.7	32.0	13.4 %
210	228.4	94.6	18.5	0.9	84.0	30.4	8.7 %

7.4.10 Résultats obtenus pour la variante large avec l'année 1993

Les caractéristiques géométriques brutes des deux solutions finales (c.f. tableau 7.11) sont données au tableau 7.12.

TAB. 7.12: Données géométriques brutes des solutions finales de la variante large pour 1993

Réservoir			Epanchement			Débit équipé m^3/s
Long.	Larg.	Haut.	Long.	Larg.	Haut.	
m	m	m	m	m	m	
938	493	8.17	2992	1496	3.98	185
777	647	8.33	2940	1493	3.74	257

A partir de ces données, les surfaces et les volumes du réservoir et de la zone d'épanchement sont recalculés. Le tableau 7.13 synthétise ces résultats. Les deux variantes sont géométriquement très proches l'une de l'autre. Par rapport à la solution standard, la taille du réservoir est largement réduite (environ de moitié).

TAB. 7.13: Surfaces et volumes des solutions finales de la variante large pour 1993

Réservoir		Epanchement		Total
Surface	Volume	Surface	Volume	Volume
km^2	$10^6 m^3$	km^2	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$
0.46	3.78	4.48	17.81	21.59
0.50	4.19	4.39	16.42	20.60

Les quantités produites pour chaque objectif sont résumées dans le tableau 7.14. Les valeurs du marnage et du battement sont des mètres de réduction à comparer aux valeurs initiales (302 et 665 m pour la rivière aval et le réservoir respectivement).

TAB. 7.14: Quantités produites par objectif de la variante large pour 1993

Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues
m/an	m/an	Visites/an	GWh/an	$10^6 m^3$
178	181	26'448	41.2	20.7
179	232	17'466	46.9	19.6

Les deux variantes sont très proches d'un point de vue géométrique. Les résultats diffèrent pour trois objectifs : les battements dans le réservoir, le nombre annuel de visites ainsi que la production d'énergie. La différence pour les deux premiers objectifs s'explique par les paramètres de gestion ainsi que par le débit à la digue perméable. La production d'énergie se différencie surtout par le débit équipé de la centrale. Le tableau 7.15 donne les paramètres de gestion des deux variantes ainsi que le débit à la digue perméable.

TAB. 7.15: Paramètres de gestion de la variante large pour 1993

Gradient max		Amplitude max		Battement max		Digue perméable m^3/s
Hiver	Ete	Hiver	Ete	Hiver	Ete	
cm/h	cm/h	cm	cm	cm	cm	
1	14	10	10	304	53	4
1	1	12	19	164	152	3

7.4.11 Résultats obtenus pour la variante large avec l'année 1999 (Bieudron)

Les fonctions de transfert pour l'énergie, l'utilité de loisirs ainsi que les crues ne sont pas dépendantes directement de l'année 1999. Comme l'année 1993 correspond à une année plus représentative, les fonctions de transfert pour ces trois objectifs sont reprises des analyses précédentes.

L'intérêt de cette analyse-ci réside dans le calcul d'une nouvelle fonction de transfert pour les objectifs liés au marnage et à la stabilité du niveau d'eau du réservoir. Sur la base d'une optimisation partielle similaire à celle du paragraphe 7.4.5 mais avec les débits de 1999, les fonctions de transfert pour ces deux objectifs sont calculées.

Cette année, avec le fonctionnement de l'aménagement de Cleuson-Dixence (centrale de Bieudron), a un marnage nettement supérieur à celui de 1993 (550 contre 302 m/an mesuré à Branson, Valais, Suisse). La valeur d'investissement unitaire pour limiter le marnage est moins élevée. Le produit (coût unitaire multiplié par la quantité) reste cependant équivalent. Cette stabilité montre la relative indépendance de l'année de référence. Les valeurs obtenues (marnage et battements) sont données dans le tableau 7.16. La valeur relativement faible pour limiter les battements dans le réservoir est surprenante malgré l'augmentation du battement (1180 contre 660 m/an). Il s'agit presque d'une " exception ". En effet, les valeurs suivantes trouvées par l'optimisation sont plus élevées. Toutefois, pour respecter la méthode établie, cette valeur est gardée ainsi. Ces valeurs sont calculées d'abord pour le marnage aval puis pour les battements dans le réservoir.

TAB. 7.16: Résultats de l'optimisation partielle liée à la réduction du marnage aval et des battements dans le réservoir de la variante large pour 1999 (CHF/m/an)

Aval	181'000
Réservoir	11'000

Avec ces deux nouvelles fonctions de transfert, l'optimisation globale est reconduite. Elle génère 212 solutions optimales représentées à la figure 7.12.

Les solutions dont l'indicateur synergique est positif sont limitées à un coût d'environ $200 \cdot 10^6$ CHF. Le filtre synergique réduit le nombre de solutions à 24 unités.

L'analyse de ces 24 solutions montre des limitations pour deux objectifs. Tout d'abord, la réduction des coûts conduit à des solutions dont le réservoir est minimisé. De ce fait, les variations importantes dans ce dernier lui enlèvent tout intérêt d'utilité sociale. Par ailleurs, le volume pour la rétention des crues devient négligeable. Enfin, pour les solutions dont le réservoir est suffisamment grand pour réduire les battements, la température de l'eau peut devenir problématique. L'année 1999 affiche une température de l'eau inférieure de 0.4°C à la moyenne. Si le débit à la digue perméable dépasse 1 ou 2 m^3/s , la température du réservoir descend trop et le rend inutilisable pour les loisirs aquatiques.

Les bornes inférieures et supérieures sont reprises du tableau 7.10. Quelques modifications sont apportées notamment pour les limites minimales du marnage et des battements. Les minima sont recalculés pour correspondre au quart des valeurs physiques maximales. Ces bornes sont données au tableau 7.17

Les deux filtres des acteurs réduisent le nombre de solutions de 24 à 1 seule. Toutes les caractéristiques géométriques, les paramètres de gestion ainsi que les objectifs atteints sont résumés dans le tableau 7.18. Les valeurs de marnage et de battements, données

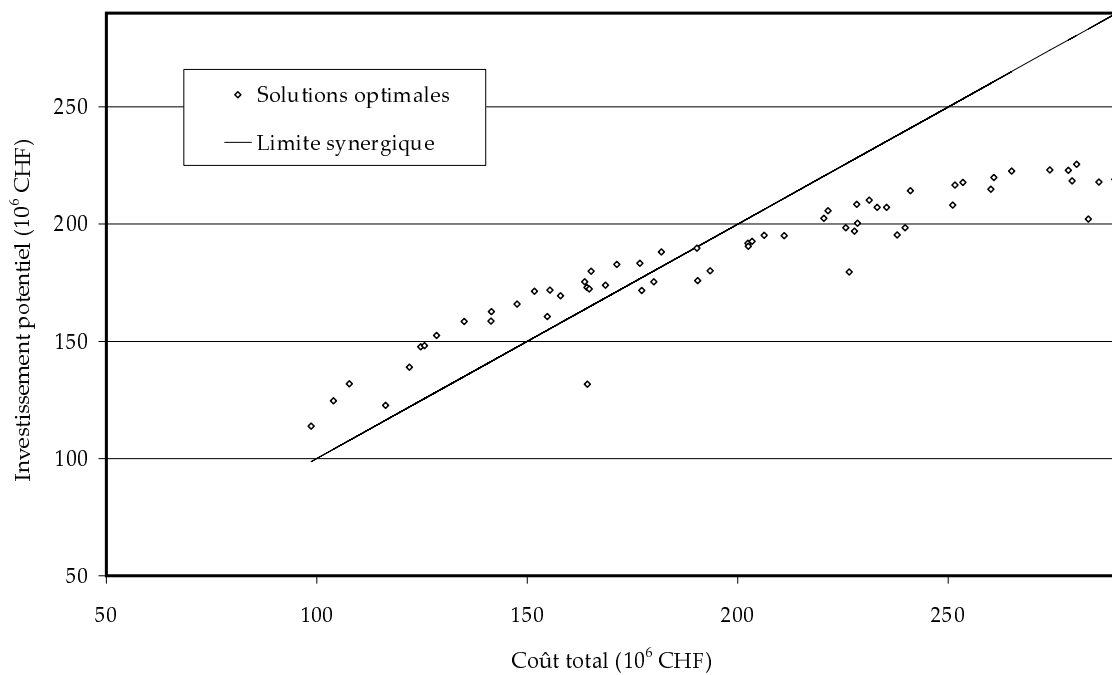


FIG. 7.12: Résultats synergiques de la variante large pour 1999

TAB. 7.17: Bornes inférieures et supérieures du filtre des acteurs de la variante large pour 1999

Objectif	Maximum		Minimum	
	Coût	Unité	Quantité	Unité
Marnage	80	10 ⁶ CHF	140	m
Battelements	20	10 ⁶ CHF	300	m
Loisirs	3	10 ⁶ CHF	10'000	visites
Energie	85	10 ⁶ CHF	30	GWh
Crues	30	10 ⁶ CHF	3	10 ⁶ m ³

tout en bas du tableau, sont à comparer aux valeurs initiales de 1999 (550 m et 1176 m respectivement).

TAB. 7.18: Données de la solution finale de la variante large pour 1999

Réservoir			Epanchement			Débit équipé
Long.	Larg.	Haut.	Long.	Larg.	Haut.	
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ³ / <i>s</i>
520	613	7.92	2627	629	0.42	273
Réservoir		Epanchement		Total		
Surface	Volume	Surface	Volume	Volume		
<i>km</i> ²	<i>10</i> ⁶ <i>m</i> ³	<i>km</i> ²	<i>10</i> ⁶ <i>m</i> ³	<i>10</i> ⁶ <i>m</i> ³		
0.32	3.78	2.52	0.69	4.47		
Gradient max		Amplitude max		Battement max		Digue perméable
Hiver	Ete	Hiver	Ete	Hiver	Ete	
<i>cm/h</i>	<i>cm/h</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>m</i> ³ / <i>s</i>
2	18	15	45	243	71	1
Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues		
<i>m/an</i>	<i>m/an</i>	<i>Visites/an</i>	<i>GWh/an</i>	<i>10</i> ⁶ <i>m</i> ³		
344	656	59'394	47.0	2.6		
Coût		Investissement potentiel				Synergie
Total	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues	
155.6	160.5	62.3	7.2	2.9	84.1	4.0
						3.8%

Comparée à l'année 1993, la solution retenue pour l'année 1999 est légèrement inférieure en surface de réservoir. La hauteur reste cependant du même ordre de grandeur ainsi que le débit équipé de la centrale. La zone d'épanchement est totalement différente. Elle est divisée par un facteur 30. Ce résultat est d'autant plus étonnant que le débit annuel n'influence pas les débits de crue considérés. Il faut donc certainement y voir une limite de l'optimisation.

7.4.12 Agrégation des résultats obtenus pour la variante large

A partir des solutions retenues pour les deux années 1993 et 1999, une itération manuelle est effectuée pour approcher une solution qui respecte le filtre synergique et les exigences minimales et maximales des deux années. La solution retenue est présentée dans le tableau 7.19. Sous forme graphique, les résultats (1993, 1999 et solution agrégée) de cette variante sont présentés à la figure 7.13. La solution agrégée est représentée soit par rapport à 1993, soit par rapport à 1999. Les différents axes du graphe sont normés par rapport à la variante qui offre la plus grande valeur.

L'ensemble des solutions complètes (données et résultats) de la variante "Large" (années 1993, 1999 et solutions agrégées) est donné à l'annexe A1.

La solution agrégée conduit pour les deux années représentatives à de légères différences tant dans les quantités obtenues pour chaque objectif que dans l'investissement potentiel relatif. Le tableau 7.20 synthétise ces résultats. Les deux années conduisent pour la même solution à des indicateurs synergiques intéressants (13% et 8%). L'année 1999, à cause du marnage mesuré largement supérieur à celui de 1993, ne permet pas d'atteindre les mêmes améliorations écologiques et donc les mêmes investissements potentiels pour ces

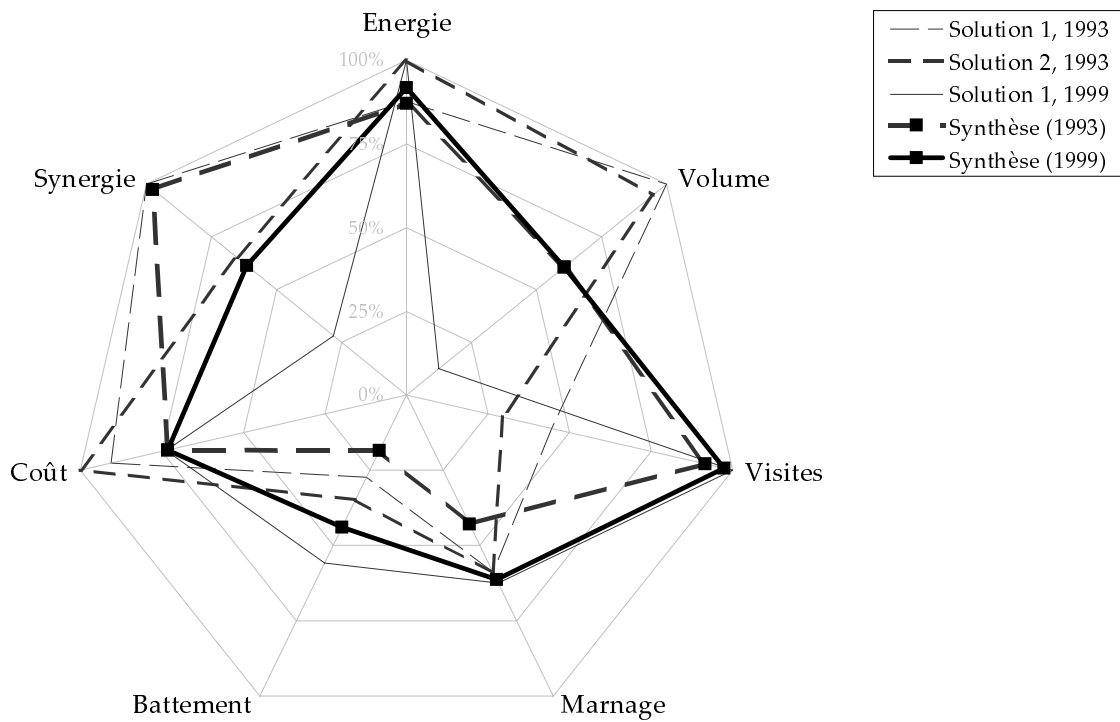


FIG. 7.13: Résultats graphique de la variante large

TAB. 7.19: Données de la solution agrégée de la variante large

Réservoir			Epanchement			Débit équipé
Long.	Larg.	Haut.	Long.	Larg.	Haut.	
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	m^3/s
550	450	7.68	2990	1490	2.5	270
Réservoir		Epanchement		Total		
Surface	Volume	Surface	Volume	Volume		
km^2	$10^6 m^3$	km^2	$10^6 m^3$	$10^6 m^3$		
0.25	1.90	4.46	11.14	13.04		
Gradient max		Amplitude max		Battement max		Digue perméable
Hiver	Ete	Hiver	Ete	Hiver	Ete	
cm/h	cm/h	cm	cm	cm	cm	m^3/s
5	15	20	70	450	75	1

les deux objectifs liés à l'écologie (marnage aval et battement dans le réservoir, réduction sur l'investissement potentiel de 11 % et 42 % respectivement entre les années 1993 et 1999).

TAB. 7.20: Quantités et investissements potentiels par objectif de la variante large pour les années 1993 et 1999 (10⁶CHF)

Année	Marnage <i>m/an</i>	Battements <i>m/an</i>	Loisirs <i>Visites/an</i>	Energie <i>GWh/an</i>	Crues <i>10⁶m³</i>
1993	130	123	54'400	40.9	12.5
1999	337	517	57'800	43.1	12.5

Année	Coût	Investissement potentiel					Synergie	
		Total	Marnage	Battements	Loisirs	Energie		Crues
1993	153.8	173.8	68.7	9.8	2.7	73.2	19.4	13.1 %
1999	153.8	166.3	61.2	5.7	2.8	77.2	19.4	8.2 %
	Différence	-4 %	-11 %	-42 %	+6 %	+5 %	0 %	

Il est difficile de choisir, entre ces deux années représentatives, laquelle doit servir de base pour calculer la répartition de l'investissement total. Pour éviter cette difficulté, il est proposé de :

- choisir, pour chaque objectif, l'investissement minimal ;
- répartir le gain synergique résiduel linéairement sur chaque objectif.

L'application de cette règle donne les investissements potentiels de chaque objectif, le surplus à répartir et finalement l'investissement nécessaire pour chaque objectif. Ces valeurs sont résumées dans le tableau 7.21.

TAB. 7.21: Investissements minimaux potentiels retenus et effectifs de la variante large (10⁶CHF)

Année	Total	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues	Synergie
Potentiel	162.2	61.2	5.7	2.7	73.2	19.4	5.5 %
Effectif	153.8	58.0	5.4	2.5	69.4	18.4	-

De la sorte, chaque objectif est assuré de n'investir que le montant minimum calculé sur lequel il bénéficie encore d'une réduction de 5 % environ.

Finalement, le calcul inverse permet de recalculer le coût unitaire pour chaque objectif. L'année 1993 est utilisée comme référence. Les valeurs des coûts unitaires effectifs sont comparées dans le tableau 7.22 aux valeurs optimales issues des optimisations partielles.

TAB. 7.22: Coûts unitaires optimaux et effectifs de la variante large calculés selon l'année 1993

	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues
Potentiel	528'050	79'982	49.03	1.55	1.79
Effectif	445'823	44'092	46.48	1.47	1.70
Différence	15.6 %	44.8 %	5.2 %	5.2 %	5.2 %

Les gains synergiques pour les loisirs, l'énergie et la protection contre les crues suivent la valeur globale de 5.2 %. Les gains supérieurs pour les deux objectifs écologiques viennent des valeurs minimales retenues correspondant à celles de l'année 1999.

En conclusion pour cette première analyse effectuée sur une variante théorique, la méthode développée permet de :

- quantifier les coûts unitaires minimaux pour chaque objectif (optimisations partielles) ;
- satisfaire à toutes les exigences imposées (filtre des acteurs) ;
- rester indépendant des tailles optimales relatives à chaque objectif ;
- générer des solutions moins chères que l'addition des coûts de chaque objectif indépendamment (filtre synergique) ;
- répartir les coûts entre les objectifs.

Cette première analyse montre, d'une part, que la solution retenue possède un réservoir de dimension modeste (0.25 km^2) et donc une quantité importante de battements. Cette condition sur la taille du réservoir est nécessaire pour aboutir à un coût total supportable. D'autre part, la zone d'épanchement possède des dimensions relativement importantes au niveau surfacique (4.46 km^2). Ces tailles semblent peu réalistes dans le contexte particulier du Valais.

7.5 Etapes quantitatives propres à la variante théorique réduite

7.5.1 Objectif de la variante réduite

La variante théorique réduite constitue une étape intermédiaire entre la variante large et le site de Riddes. L'objectif principal est identique à la variante précédente, c'est-à-dire de constituer une validation supplémentaire de la méthode élaborée. Les restrictions apportées sur les contraintes augmentent la difficulté à trouver les solutions qui respectent l'ensemble des filtres.

7.5.2 Définition et contraintes de la variante réduite

Cette variante est toujours constituée d'un réservoir rectangulaire et d'une zone d'épanchement de la même forme. Toutefois, les dimensions maximales possibles sont réduites.

La hauteur maximale du réservoir est également réduite. Cette réduction est liée aux résultats précédents. Ces derniers montrent que de trop grandes hauteurs conduisent à des solutions non-synergiques. La hauteur maximale de la zone d'épanchement est légèrement augmentée. Cette augmentation tend à compenser la perte de volume liée à la réduction surfacique.

Le tableau 7.23 donne les valeurs du nouveau vecteur de contraintes. Les valeurs modifiées sont **en gras**. Ces valeurs sont à comparer au tableau 7.2. Les valeurs données entre parenthèse sont celles de la variante large.

De manière similaire à la variante large, la variante réduite peut se définir comme un ensemble de solutions qui respectent le tableau des contraintes 7.23.

TAB. 7.23: Variables internes et leur domaine admissible de la variante réduite

Variable	Unité	Limite inf	Limite sup
Gradient aval hivernal	cm/h	1	25
Gradient aval estival	cm/h	1	45
Amplitude aval hivernale	cm	10	80
Amplitude aval estivale	cm	10	150
Battements hivernal	cm	100	500
Battements estival	cm	10	200
Hauteur utile	cm	768	1218 (1518)
Débit équipé	m ³ /s	180	350
Digue perméable	m ³ /s	1	5
Longueur réservoir	m	200	1500 (3000)
Largeur réservoir	m	200	750 (3000)
Longueur épanchement	m	200	1500 (3000)
Largeur épanchement	m	200	750 (1500)
Hauteur utile épanchement	cm	0	450 (400)

7.5.3 Optimisation partielle pour l'énergie de la variante réduite

La production d'énergie optimisée pour elle-même est indépendante soit du réservoir, soit de la zone d'épanchement. La valeur minimale de même que le front de Pareto obtenus dans le paragraphe 7.4.3 sont donc valables. Pour mémoire, la valeur minimale est redonnée au tableau 7.24.

TAB. 7.24: Résultat de l'optimisation partielle énergétique de la variante réduite

Variable	Investissement minimal	Unité
Coût unitaire	1.79	CHF/kWh/an

7.5.4 Optimisation partielle pour la protection contre les crues de la variante réduite

Avec les dimensions réduites pour la zone d'épanchement, l'optimisation partielle pour la protection contre les crues doit être recalculée. Le tableau 7.25 donne pour différentes tailles d'épanchement maximales la valeur optimale du coût volumique. Les tailles (longueur et largeur) minimales sont fixées pour les quatre optimisations à 200 m. La hauteur maximale est toujours comprise entre 4 et 5 m. Les valeurs optimales sont cependant inférieures (comprise entre 1 et 3 m). Ces simulations sont basées sur une géométrie rectangulaire de la zone d'épanchement.

TAB. 7.25: Coûts volumiques minimaux pour différentes dimensions de rétention

Dimensions	Unité	Coût	Unité
10'000 * 10'000	m	0.49	CHF/m ³
3'000 * 3'000	m	1.06	CHF/m ³
3'000 * 1'500	m	1.55	CHF/m ³
1'500 * 750	m	3.71	CHF/m ³

La réduction du volume maximal possible génère une augmentation du coût unitaire. Cette augmentation du coût unitaire réduit la marge bénéficiaire de la rétention. Toutefois, pour conserver une marge positive, l'investissement pour l'objectif lié aux crues doit être limité, avec le coût unitaire de 3.71 CHF/m³, à $2.39 \cdot 10^6 \text{m}^3$. Le montant maximal pour les crues, avec ce coût, vaut donc $8.87 \cdot 10^6 \text{CHF}$. Si le coût volumétrique est laissé à 1.55 CHF/m³, alors le volume maximal est donné par la figure 7.5. Il se situe au-delà du volume maximal imposé par les contraintes (environ $20 \cdot 10^6 \text{m}^3$).

7.5.5 Optimisation partielle pour la réduction du marnage de la variante réduite

Les solutions optimales, trouvées avec la variante large, pour la réduction du marnage aval et des battements possèdent des réservoirs de dimension modeste. Les tailles de ces derniers sont comprises entre 200 et 550 m pour la longueur et entre 200 et 350 m pour la largeur. Ces dimensions respectent les contraintes de la variante réduite. De ce fait, il n'est pas nécessaire de procéder à une nouvelle optimisation partielle pour les aspects écologiques.

Pour rappel, les valeurs trouvées au paragraphe 7.4.5 sont données dans le tableau 7.26.

TAB. 7.26: Résultats de l'optimisation partielle liée à la réduction du marnage aval et des battements dans le réservoir de la variante réduite pour 1993 et 1999 (CHF/m/an)

Année	Aval	Réservoir
1993	528'000 CHF/m	80'000 CHF/m
1999	181'000 CHF/m	11'000 CHF/m

7.5.6 Optimisation partielle pour l'utilisation liée au loisirs de la variante réduite

Le modèle de fréquentation sociale, lorsqu'il est optimisé pour lui-même, conduit à des tailles de réservoir largement inférieure à celles nécessaires pour d'autres objectifs. De ce fait, il devient indépendant des contraintes imposées au système global. La valeur optimale calculée au paragraphe 7.4.6 reste valable. Elle est rappelée au tableau 7.27.

TAB. 7.27: Résultats de l'optimisation partielle liée aux loisirs de la variante réduite

Variable	Montant minimal	Unité
Coût unitaire de la visite	49.03	CHF/visite

7.5.7 Optimisation globale de la variante réduite

Sur la base des nouvelles valeurs optimales pour les fonctions de transfert, avec les mêmes objectifs que pour la variante large (minimiser le coût, maximiser l'investissement potentiel), le système est optimisé globalement pour les deux années de référence (1993 et 1999).

Le filtre synergique permet de réduire les solutions optimales au tiers de leur nombre initial. Pour les deux années, les coûts totaux ne dépassent pas $250 \cdot 10^6$ CHF.

Les deux filtres des acteurs réduisent ensuite les solutions à deux unités seulement par année. Le tableau 7.28 donne les bornes minimales et maximales imposées.

TAB. 7.28: Bornes inférieures et supérieures du filtre des acteurs de la variante réduite

Objectif	Maximum		Minimum	
	Coût	Unité	Quantité	Unité
Marnage	110	10^6 CHF	100	m
Battements	20	10^6 CHF	200	m
Loisirs	3	10^6 CHF	10'000	visites
Energie	80	10^6 CHF	30	GWh
Crues	20	10^6 CHF	3	10^6 m ³

7.5.8 Résultats obtenus pour la variante réduite

Avec le coût unitaire calculé au paragraphe 7.5.4 pour l'objectif de protection contre les crues, aucune solution ne réussit le filtre des acteurs. La limite de $8.87 \cdot 10^6$ CHF pour cet objectif élimine toute possibilité, soit parce que le volume est trop grand et conduit ainsi à un coût déficitaire pour cet objectif, soit parce que le volume est trop faible et ne respecte plus les autres critères.

Pour éviter cette difficulté, le coût unitaire de protection est remis à sa valeur précédente de 1.55 CHF/m³. De la sorte, la limitation sur le volume disparaît.

Les deux solutions retenues pour l'année 1993, très similaires entre elles, ont un réservoir sensiblement plus grand que la variante large. Les débits équipés oscillent entre 200 et 250 m³/s. La hauteur est dans les deux cas de 8.42 m. Les principales caractéristiques géométriques sont résumées dans le tableau 7.29. La gestion retenue offre également très peu de différence. Le gain synergique est compris entre 5 et 6 %. Le coût est compris entre 210 et 220·10⁶CHF.

TAB. 7.29: Données géométriques brutes des solutions de la variante réduite pour 1993

Réservoir			Epanchement			Débit équipé
Long.	Larg.	Haut.	Long.	Larg.	Haut.	
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ³ / <i>s</i>
1218	743	8.42	1499	746	1.60	202
1218	743	8.42	1499	746	1.60	245

Les deux variantes retenues pour l'année 1999 s'approchent sensiblement des solutions de la variantes large. La surface des réservoirs est réduite par rapport à l'année 1993. La hauteur est comprise entre celle de la variante large et celle réduite de l'année 1993. Le gain synergique, très faible, est proche de 0 %. Ces deux variantes sont également très faibles pour l'utilisation sociale du réservoir. A cause de la faible taille de ce dernier, les battements sont importants et la température reste basse même en été. Les débits équipés de la centrale sont légèrement supérieurs à ceux retenus de l'année 1993. Ils rejoignent ceux de la variante large. Les principales caractéristiques géométriques sont résumées dans le tableau 7.30. Le coût est compris entre 160 et 170·10⁶CHF.

TAB. 7.30: Données géométriques brutes des solutions de la variante réduite pour 1999

Réservoir			Epanchement			Débit équipé
Long.	Larg.	Haut.	Long.	Larg.	Haut.	
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ³ / <i>s</i>
780	501	8.13	864	574	0.70	251
680	604	8.10	1407	655	1.3	271

7.5.9 Agrégation des résultats obtenus pour la variante réduite

L'optimisation liée à la définition de variantes communes aux deux années est effectuée manuellement. Le point de départ est la seconde solution retenue de l'année 1999. Les trois autres solutions conduisent en effet à un gain synergique négatif pour l'année réciproque. Par itérations successives, la solution finale trouvée permet de conserver un gain synergique positif pour les deux années. Les grandeurs géométriques de cette solution sont présentées au tableau 7.31. Sous forme graphique, les résultats (1993, 1999 et solution agrégée) de cette variante sont présentés à la figure 7.14. La solution agrégée est représentée soit par rapport à 1993, soit par rapport à 1999. Les différents axes du graphe sont normés par rapport à la variante qui offre la plus grande valeur.

L'ensemble des solutions (données et résultats) de la variante "Réduite" (années 1993, 1999 et solutions agrégées) est donné à l'annexe A2.

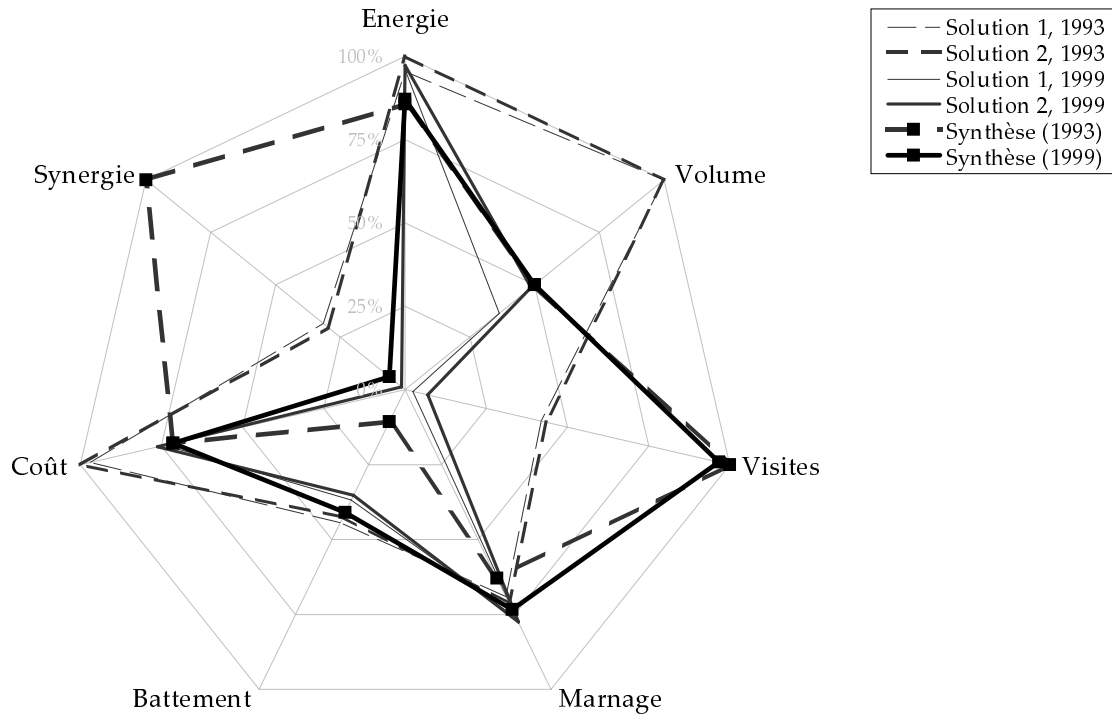


FIG. 7.14: Résultats graphique de la variante réduite

TAB. 7.31: Données de la solution agrégée pour la variante réduite

Réservoir			Epanchement			Débit équipé
Long.	Larg.	Haut.	Long.	Larg.	Haut.	
<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i> ³ / <i>s</i>
680	600	7.88	1400	660	1.7	220
Réservoir		Epanchement		Total		
Surface	Volume	Surface	Volume	Volume		
<i>km</i> ²	<i>10</i> ⁶ <i>m</i> ³	<i>km</i> ²	<i>10</i> ⁶ <i>m</i> ³	<i>10</i> ⁶ <i>m</i> ³		
0.41	3.22	0.92	1.57	4.79		
Gradient max		Amplitude max		Battement max		Digue perméable
Hiver	Ete	Hiver	Ete	Hiver	Ete	
<i>cm/h</i>	<i>cm/h</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>m</i> ³ / <i>s</i>
2	2	15	45	465	75	1

A cause des limites imposées sur la zone d'épanchement, cette dernière perd beaucoup de son importance. Pour compenser cette réduction de volume, la taille du réservoir est légèrement agrandie. Toutefois, le coût engendré limite cette augmentation.

Le coût total de l'aménagement est similaire à celui de la variante large. Les investissements sont réduits pour la zone d'épanchement tandis qu'ils sont augmentés pour la construction des digues (taille du réservoir). La légère augmentation de la hauteur du réservoir permet de réduire le débit équipé de la centrale sans perte de production d'énergie (270 contre 220 m³/s). En conséquence, les investissements potentiels de protection contre les crues sont réduits. Ces réductions sont compensées, avec l'augmentation de la taille du réservoir, par une diminution du marnage aval (augmentation de la qualité écologique aval). Le tableau 7.32 donne, pour les deux années, les quantités produites pour chaque objectif et les investissements potentiels corrélés.

TAB. 7.32: Quantités et investissements potentiels par objectif de la variante réduite pour les années 1993 et 1999 (10⁶CHF)

Année	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues
	<i>m/an</i>	<i>m/an</i>	<i>Visites/an</i>	<i>GWh/an</i>	10 ⁶ m ³
1993	191	71	46'900	40.1	4.0
1999	403	482	45'300	40.8	4.0

Année	Coût	Investissement potentiel					Synergie	
		Total	Marnage	Battements	Loisirs	Energie		Crues
1993	158.3	186.5	100.6	5.7	2.3	71.7	6.2	17.8 %
1999	158.3	159.9	73.2	5.3	2.2	73.0	6.2	1.0 %

Pour éviter de choisir une année de référence, la règle de l'investissement minimal par objectif est reprise du paragraphe 7.4.12. La somme des investissements minimaux est à peine supérieure au coût de l'aménagement (+0.2%). Il est donc possible de ne retenir, pour le financement nécessaire de chaque objectif, que la valeur minimale calculée. Une réduction proportionnelle est encore juste possible sur l'investissement de chaque objectif. Le tableau 7.33 donne les valeurs des investissements potentiels et effectifs pour chaque objectif.

TAB. 7.33: Investissements minimaux potentiels retenus et effectifs de la variante réduite (10⁶CHF)

Année	Total	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues	Synergie
Potentiel	158.6	73.2	5.3	2.2	71.7	6.2	0.2 %
Effectif	158.3	73.1	5.3	2.2	71.6	6.1	-

Le calcul inverse permet de définir les coûts unitaires effectifs. Chaque objectif profite de la réduction de 0.2%. Les réductions supplémentaires sont liées à la considération du coût minimal entre les deux années étudiées. Le tableau 7.34 illustre ce calcul.

TAB. 7.34: Coûts unitaires optimaux et effectifs de la variante réduite calculés selon l'année 1993 (10⁶CHF)

	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues
Potentiel	528'050	79'982	49.03	1.79	1.55
Effectif	383'344	74'779	47.29	1.79	1.55
Différence	27.4 %	6.51 %	3.55 %	0.2 %	0.2 %

L'étude de la variante réduite montre encore une fois la performance de la méthode développée. Elle est capable de trouver une solution optimale dont la mise en commun des objectifs permet d'être indépendante des limites de taille. La réduction additionnelle liée au gain synergique est surtout reportée sur trois objectifs (marnage, battements et loisirs) au détriment des deux autres (énergie et crue). Cette remarque appelle des modifications de la méthode.

7.6 Modifications liées à la comparaison des années et des objectifs

La première modification est de choisir une référence indépendante pour chaque objectif lors de l'optimisation partielle. De la sorte, l'année qui correspond le mieux à une année moyenne pour l'objectif concerné est choisie pour cette optimisation. Les coûts unitaires, bien que calculés avec une seule année, correspondent ainsi à une valeur moyenne.

La seconde modification est liée au coût volumétrique pour la rétention contre les crues. Le coût minimal calculé par l'optimisation partielle de la variante réduite est trop élevé pour être considéré (bénéfice négatif entre le coût de protection aval et le coût de rétention). Le coût retenu correspond à celui de la variante large. Il ne permet toutefois pas de couvrir les frais qui lui sont liés. D'un autre côté, il permet à cet objectif de réaliser des bénéfices (d'un ordre de grandeur similaire à celui investi). La modification élaborée consiste à trouver une valeur unitaire comprise entre le minimum de la variante large et le coût réel. Ce coût unitaire correspond au coût maximal qui laisse une marge bénéficiaire pour toutes les tailles raisonnables.

La dernière modification apportée est de rendre indépendants les objectifs naturellement dépendants des variations annuelles (énergie, loisirs, marnage, battements). Cette remarque est déjà partiellement mise en oeuvre (marnage et battements). Elle doit l'être également pour l'énergie et les loisirs. L'investissement potentiel de chaque objectif est donc calculé, pour un aménagement et une gestion donnés, non avec l'année simulée mais en fonction de l'année moyenne de cet objectif. Pour simplifier les calculs, un ratio de transfert unique entre les quantités produites pour l'année de référence et pour l'année simulée est calculé sur la base d'un aménagement optimal pour l'objectif étudié. Cette modification est synthétisée par l'algorithme suivant :

- sélectionner un objectif ;
- calculer la quantité produite de cet objectif par un aménagement à but unique avec l'année de référence de cet objectif ;
- calculer sur la base du même aménagement la quantité produite avec l'année habituellement simulée (par exemple 1993) ;
- calculer le ratio entre les deux quantités (ratio de transfert annuel) ;
- recommencer avec l'objectif suivant et ce jusqu'au dernier ;
- utiliser, pour les optimisations globales, l'année de référence (par exemple 1993) en appliquant sur les coûts unitaires de chaque objectif les ratios de transfert annuel ;
- vérifier, par après, les investissements potentiels de chaque objectif en simulant, pour chaque aménagement optimal, les quantités réellement produites avec l'année moyenne idoine.

7.7 Etapes quantitatives propres à la variante étudiée de Riddes

7.7.1 Objectifs de la variante Riddes

L'objectif lié à l'étude de la variante de Riddes est double. Il s'agit, d'une part, de mettre en oeuvre les modifications de la méthode énoncées au paragraphe 7.6. D'autre part, les restrictions supplémentaires apportées aux contraintes font correspondre les solutions optimisées aux solutions techniquement réalisables sur le site de Riddes.

7.7.2 Définition et contraintes de la variante Riddes

Le site de Riddes est formé par un coude du Rhône qui génère une surface d'environ 1 km² en forme de lentille. Cette surface, située sur le rive gauche du cours d'eau est limitée longitudinalement d'un côté par le Rhône lui-même et de l'autre côté par l'autoroute de la plaine valaisanne. Sur le côté transversal amont (est), le site est fermé par la route cantonale constituée en cet endroit d'un pont. La figure 7.15 illustre le site de Riddes qui porte le nom de la commune sur laquelle il est situé.

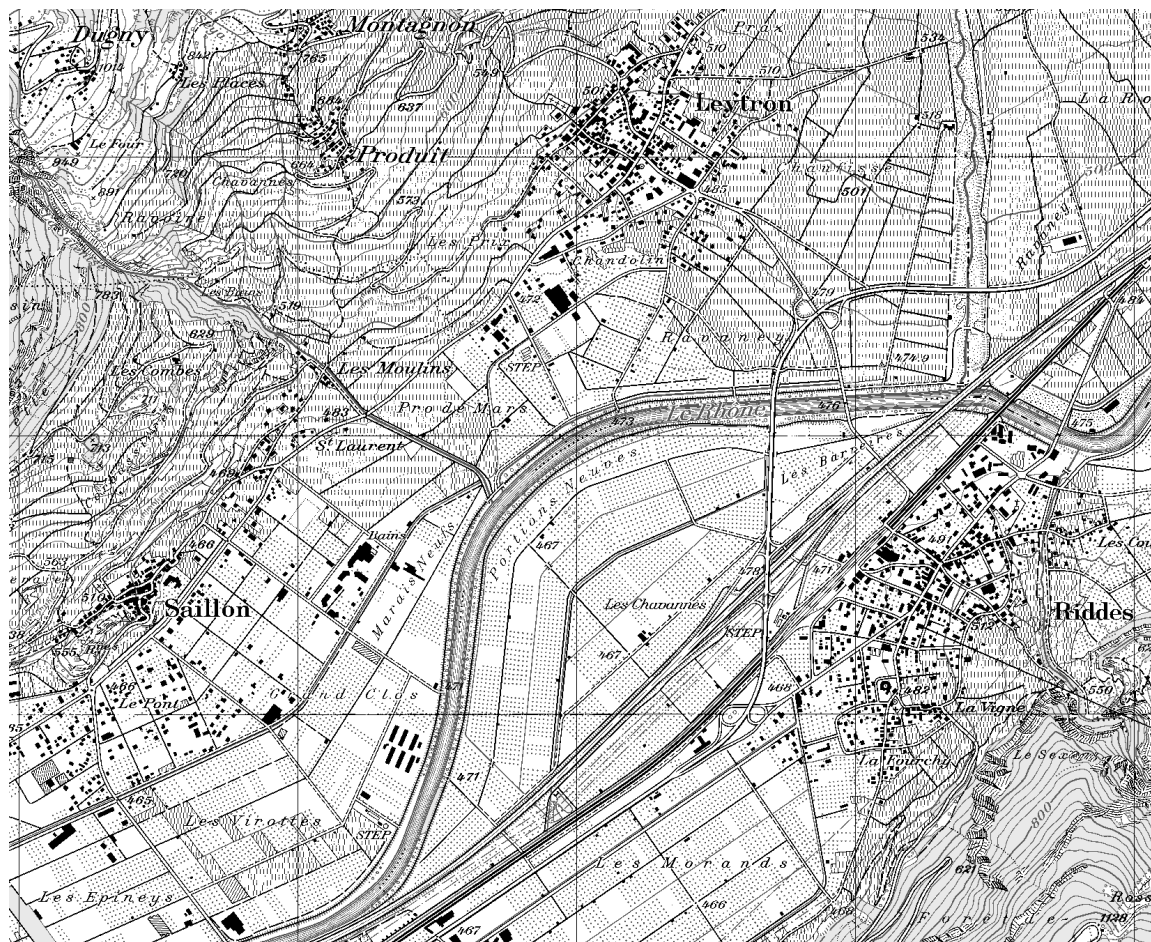


FIG. 7.15: Site de Riddes dans la plaine valaisanne

Ce site est situé à proximité de trois villages, Riddes, Saillon et Leytron. Les données relatives à la population sont utilisées pour la fonction de transfert dans le modèle social.

Le réservoir est divisé en casiers juxtaposés de manière à remplir l'intégralité de la zone définie ci-dessus. Ces formes géométriques élémentaires permettent d'en calculer par une relation mathématique simple la surface. La longueur est mesurée parallèlement à l'autoroute puis au pont de la route cantonale. La longueur total vaut 2 km. La largeur est définie de manière univoque par la ligne perpendiculaire qui rejoint le Rhône. Ainsi, le système est réduit à une seule variable surfacique. La figure 7.16 illustre les casiers qui composent le réservoir.

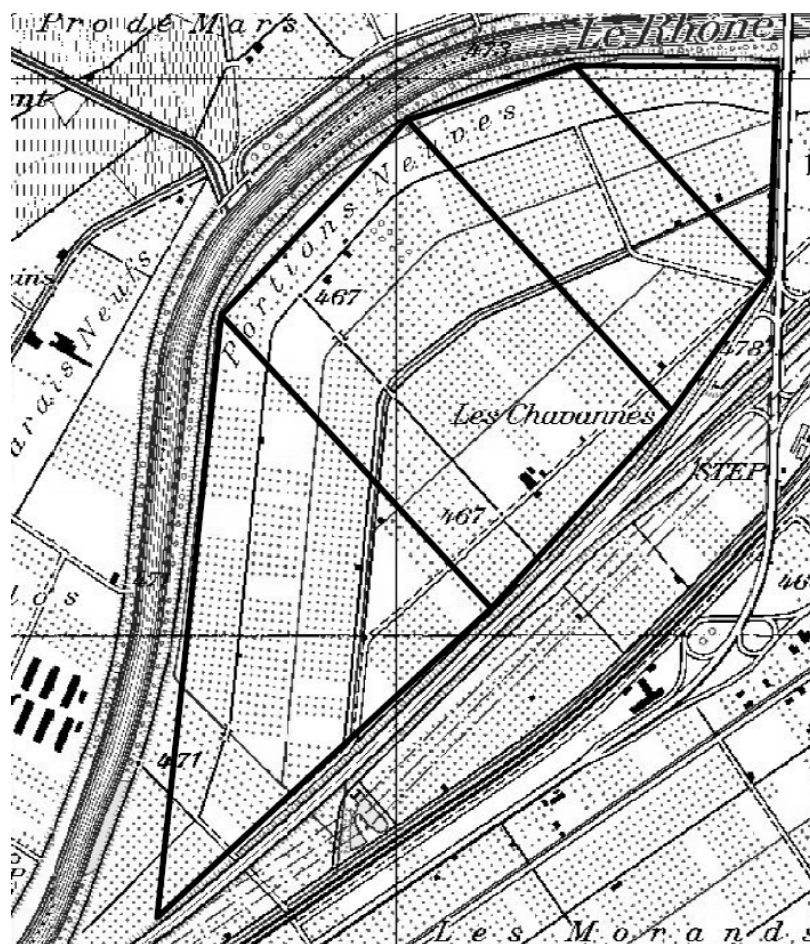


FIG. 7.16: Site du réservoir de la variante étudiée de Riddes dans la plaine valaisanne

La zone d'épanchement, si elle est retenue par l'optimisation globale, se situe sur l'autre rive du Rhône, parallèlement à ce dernier. Elle est située dans les anciens marais situés au bas de Saillon. A cause de la configuration du terrain, cette zone est répartie en cinq casiers indépendants. La combinaison de ces derniers conduit à neuf combinaisons raisonnables. Une dernière possibilité est rajoutée pour la suppression de la zone. Les deux variables surfaciques de la zone d'épanchement (longueur et largeur) sont réduites à une seule variable polytomique numérotée de 1 à 10. La hauteur possible de la zone est légèrement augmentée par rapport aux variantes précédentes (500 cm contre 450 précédemment). Les cinq casiers sont représentés à la figure 7.17. La valeur "9" de la variable polytomique correspond à la totalité de la zone (5 casiers) tandis que la valeur "10" correspond à la suppression de la zone (aucun casier).

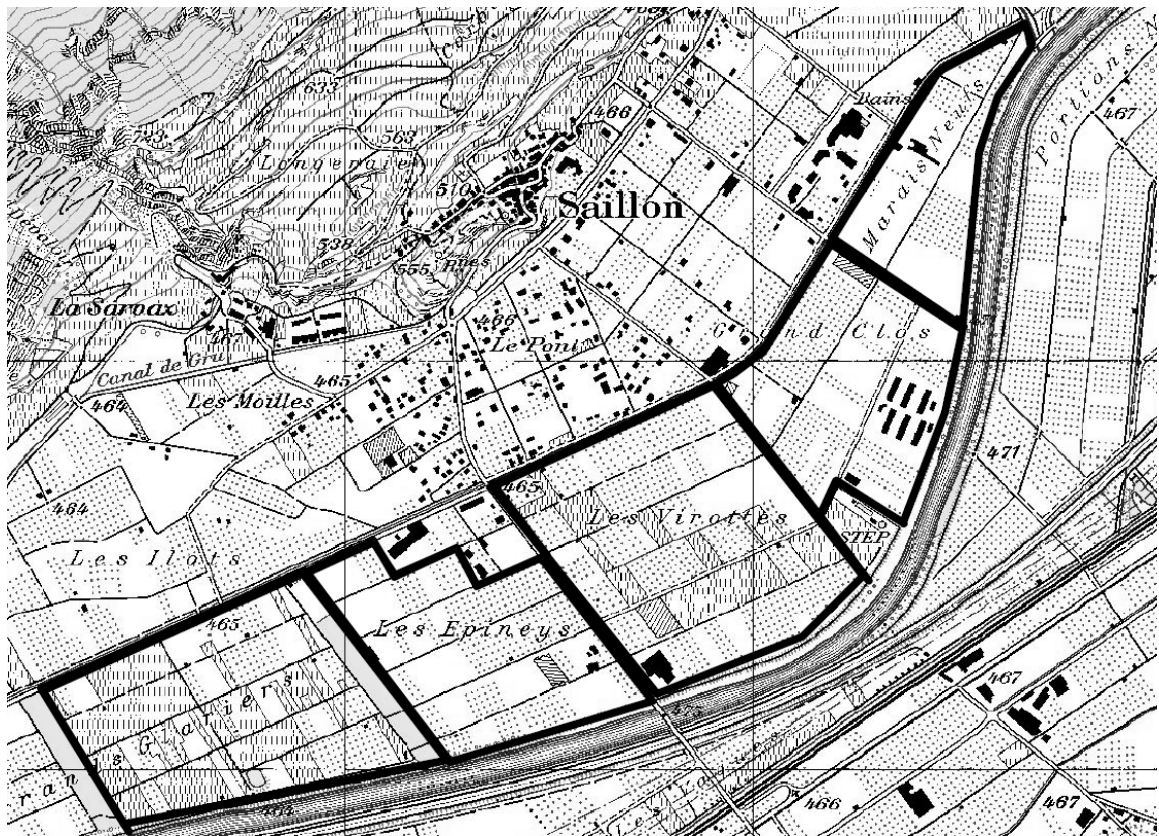


FIG. 7.17: Casiers d'épanchement du site de Riddes

Le vecteur des contraintes pour le site de Riddes est donné au tableau 7.35. Les valeurs liées à la gestion de l'aménagement ne sont pas modifiées.

7.7.3 Optimisation partielle pour l'énergie de la variante Riddes

L'optimisation partielle énergétique pour le site de Riddes est basée sur la même station de mesure des débits que pour les variantes précédentes (station de mesure de Branson). Toutefois, selon le tableau 5.6 du paragraphe 5.2.6, l'année la plus proche de la valeur moyenne relativement au volume annuel écoulé est l'année 2000.

Sur la base des débits de 2000 et avec un aménagement à but énergétique, les valeurs optimales trouvées sont données au tableau 7.36. L'allure du front de Pareto est tout à fait similaire à celle trouvée à la figure 7.1 pour la variante large.

Les simulations énergétiques basées sur un aménagement avec un débit équipé de $240 \text{ m}^3/\text{s}$ et une hauteur utile de 7.68 m sont utilisées pour calculer les ratios de transfert entre les années. Ces différentes valeurs sont données au tableau 7.37.

La présentation du coût énergétique en investissement nécessaire par unité de production annuelle est peu courante. Moyennant quelques hypothèses financières, il est possible de calculer, à partir de ce coût d'investissement, le prix de revient de l'énergie. Ce calcul est présenté au tableau 7.38. Il est basé sur une annuité constante.

Ce prix de revient est assurément élevé mais réaliste. Il correspond au prix d'un aménagement au fil de l'eau qui exploite une petite chute. L'aménagement de Ruppoldingen (Aare,

TAB. 7.35: Variables internes et leur espace admissible de la variante de Riddes

Variable	Unité	Limite inf	Limite sup
Gradient aval hivernal	cm/h	1	25
Gradient aval estival	cm/h	1	45
Amplitude aval hivernale	cm	10	80
Amplitude aval estivale	cm	10	150
Battements hivernal	cm	100	500
Battements estival	cm	10	200
Hauteur utile	cm	768	1218
Débit équipé	m ³ /s	180	350
Digue perméable	m ³ /s	1	5
Longueur réservoir	m	200	2016
Epanchement	-	1	10
Hauteur utile épanchement	cm	0	500

TAB. 7.36: Résultats de l'optimisation partielle énergétique de la variante de Riddes

Variable	Investissement minimal	Unité
Coût total	76'045'000	CHF
Coût unitaire puissance	9'307	CHF/kW
Coût unitaire énergie	1.98	CHF/kWh/an

TAB. 7.37: Ratios énergétiques de transfert annuel

	Année 2000	Année 1993	Année 1999	Unité
Production	43.32	44.20	45.29	GWh/an
Ratio	-	98.02 %	95.65 %	-
Coût unitaire	1.98	1.94	1.89	CHF/kWh/an

TAB. 7.38: Prix de revient de l'énergie

Investissement	1.98	CHF/kWh/an
Durée d'amortissement	50	ans
Taux d'intérêt	4.5	%
Coût financier	10.0	ct/kWh
Coût d'exploitation	1.5	ct/kWh
Redevance et impôt	1.5	ct/kWh
Prix de revient	13.0	ct/kWh

Argovie, Suisse) produit, pour une chute comparable, de l'énergie à un prix similaire. Dans le cas d'un aménagement à buts multiples, le gain synergique escompté permet de réduire ce prix.

7.7.4 Optimisation partielle pour la protection contre les crues de la variante Riddes

L'optimisation partielle du coût unitaire du volume de rétention contre les crues est effectuée par itération exhaustive. Le volume de rétention est calculé sur l'emplacement du réservoir avec l'évolution de la taille de ce dernier en fonction de la longueur considérée. La figure 7.18 illustre le front de Pareto avec l'ensemble des solutions explorées. Le coût minimal obtenu est de 3.63 CHF/m³.

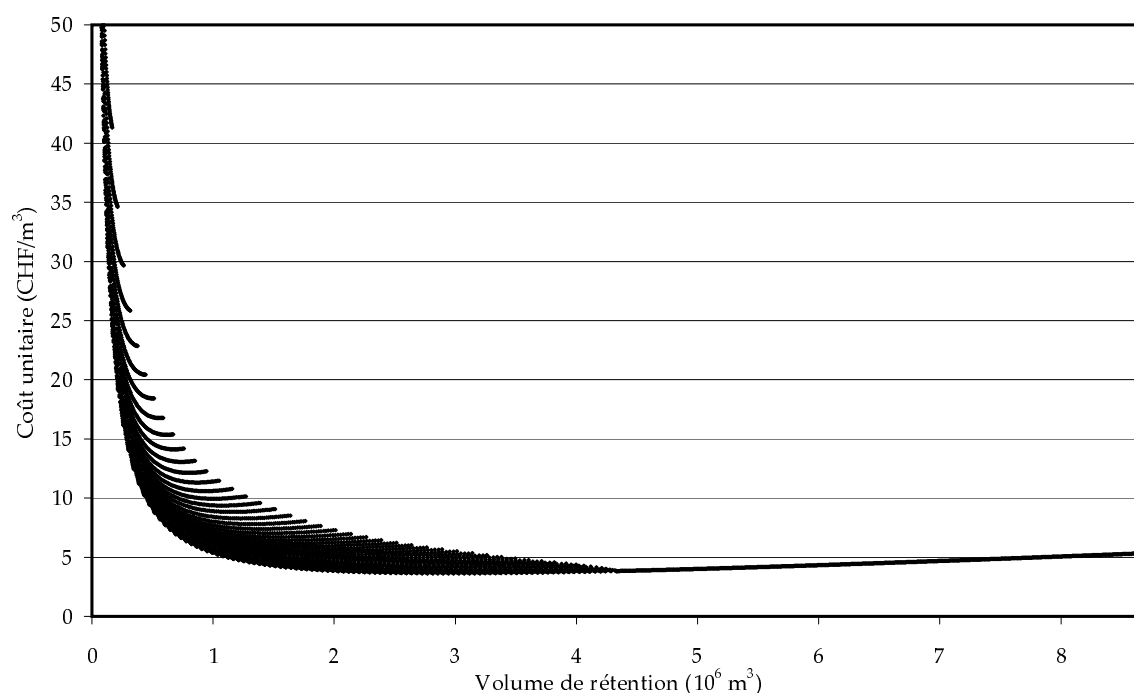


FIG. 7.18: Coût unitaire de l'aménagement de rétention en fonction du volume disponible de la variante de Riddes

Avec ce coût unitaire, l'objectif de protection contre les crues génère une marge bénéficiaire uniquement dans un intervalle réduit de volume. La borne inférieure de cet intervalle vaut $1.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour un investissement de $6.7 \cdot 10^6 \text{ CHF}$ et la borne supérieure vaut $2.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pour un investissement de $9.1 \cdot 10^6 \text{ CHF}$. Avec ce coût (3.63 CHF/m^3) il serait donc plus intéressant de choisir une surélévation des digues aval plutôt que de faire de la rétention (à moins de se limiter au volume compris dans l'intervalle). La restriction imposée sur le volume ne permet plus, avec ce prix unitaire, d'appliquer un coût volumétrique pour un volume supérieur à la borne maximale. Le coût unitaire est alors modifié pour conserver, sur l'ensemble du domaine, un bénéfice positif (figure 7.19).

Cette figure illustre l'évolution de la marge bénéficiaire de l'objectif crue en fonction du volume de rétention. Le coût unitaire est fixé à 2.85 CHF/m^3 . Ce coût permet, notamment pour le volume critique de $3.2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, de conserver un bénéfice positif sur l'ensemble du domaine. La discontinuité de sa dérivée est liée à l'évolution la forme géométrique en rapport avec le volume de rétention disponible.

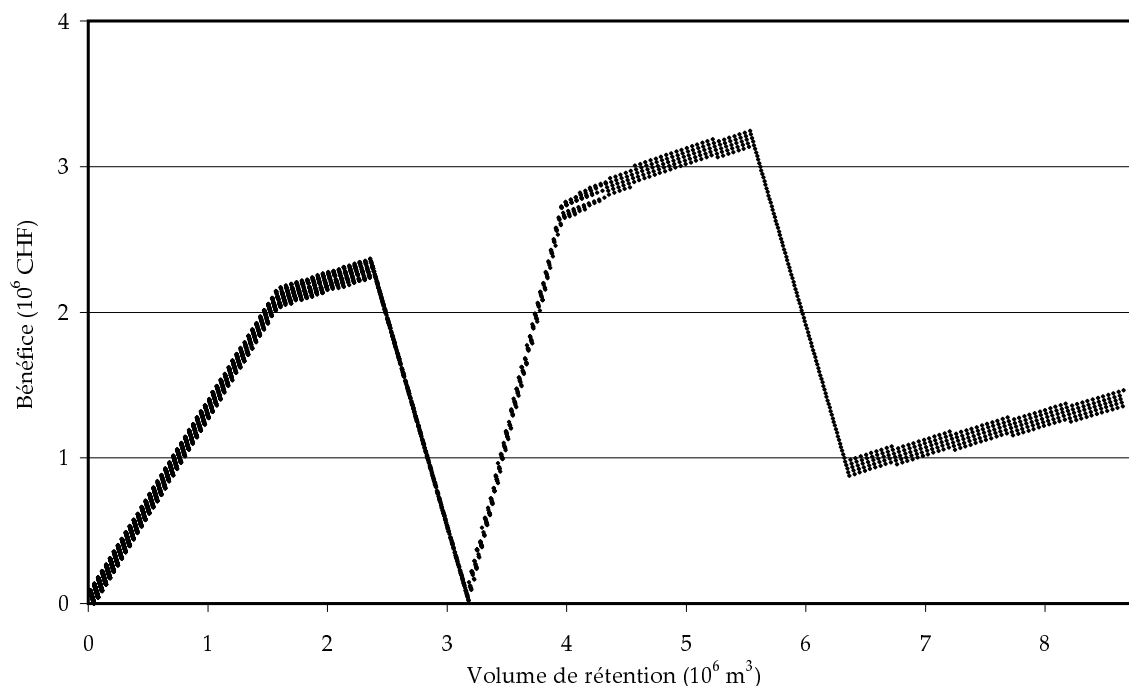


FIG. 7.19: Bénéfice de l'objectif crue en fonction du volume de rétention de la variante de Riddes

7.7.5 Optimisation partielle pour la réduction du marnage de la variante Riddes

Les solutions optimales trouvées avec la variante large, à cause de leurs dimensions modestes, respectent également la variante réduite. Pour rappel, ces dimensions sont comprises entre 200 et 350 m pour la largeur et 200 et 550 m pour la longueur. A la différence de forme près, ces dimensions pourraient respecter les contraintes de la variante de Riddes.

La prise en compte de la forme liée à l'emplacement de Riddes nécessite une nouvelle optimisation partielle. A cause de la similitude des dimensions (hauteur utile environ 7.80 m, surface environ 0.2 km²), les coûts volumiques sont comparables. Les nouvelles valeurs associées à la stabilité des niveaux sont données dans le tableau 7.39.

TAB. 7.39: Résultats de l'optimisation partielle liée à la réduction du marnage aval et des battements dans le réservoir de la variante de Riddes pour 1993 et 1999 (CHF/m/an)

Année	Aval	Réservoir
1993	547'000 CHF/m	80'500 CHF/m
1999	185'500 CHF/m	16'000 CHF/m

7.7.6 Optimisation partielle pour l'utilisation liée au loisirs de la variante Riddes

L'optimisation partielle pour l'utilisation sociale génère un aménagement avec des dimensions réduites. Ces dimensions sont largement inférieures à l'aménagement pressenti de Riddes. La valeur de 49.03 CHF/visite calculée précédemment reste ainsi valable.

Toutefois, cette valeur est calculée avec l'année 1993. Or selon le tableau 5.6 du paragraphe 5.2.6, l'année moyenne pour la température de l'air est 2001. Un calcul identique à

celui effectué pour la variante large conduit à la valeur optimale de 47.11 CHF/visite. La température moyenne de 2001 étant supérieure à celle de 1993 (+0.08 °C), le nombre de visites pour le même aménagement est donc légèrement augmenté et le prix moyen de la visite réduit d'autant.

Les simulations de fréquentation sociale sont basées sur un aménagement carré de 250 m de côté avec une profondeur de 2.5 m. Les ratios de transfert entre les années sont donnés au tableau 7.40.

TAB. 7.40: Ratios sociaux de transfert annuel

	Année 2001	Année 1993	Année 1999	Unité
Fréquentation	59'470	57'140	62'150	Visites/an
Ratio	–	104.08 %	95.69 %	–
Coût unitaire	47.11	49.03	45.07	CHF/visite/an

7.7.7 Optimisation globale de la variante Riddes

L'optimisation globale avec deux objectifs (coût total, investissement potentiel) tend à négliger les aspects sociaux à cause de leur relative faiblesse (investissement 40 fois inférieur à l'énergie). L'optimisation globale de la variante Riddes est donc effectuée avec les trois objectifs suivants :

- minimiser les coûts d'investissement ;
- minimiser le marnage aval ;
- maximiser les revenus actualisés.

Cette optimisation conduit pour les deux années simulées (1993 et 1999) à environ 160 solutions optimales. Le filtre synergique permet d'éliminer les trois quart des solutions. L'application du filtre des acteurs (c.f. tableau 7.41) ne conserve que 2 solutions pour l'année 1993 et également 2 pour l'année 1999.

TAB. 7.41: Bornes inférieures et supérieures du filtre des acteurs de la variante de Riddes

Objectif	Maximum		Minimum	
	Coût	Unité	Quantité	Unité
Marnage	60	10 ⁶ CHF	100	m
Battement	20	10 ⁶ CHF	100	m
Loisirs	3	10 ⁶ CHF	20'000	visites
Energie	75	10 ⁶ CHF	30	GWh
Crues	20	10 ⁶ CHF	2	10 ⁶ m ³

7.7.8 Résultats obtenus pour la variante Riddes

Les deux solutions retenues pour l'année 1993 ont des hauteurs très similaires, soit légèrement inférieures à 8.0 m. Ces hauteurs sont également celles trouvées pour l'année 1999. La taille du réservoir diffère du simple au double. Ces deux solutions appartiennent à deux groupes différents. Le premier groupe, plus modeste, présente une solution relativement bon marché. Le second groupe, plus ambitieux, présente une solution plus chère mais également réalisable avec des investissements potentiels plus importants. Dans les deux cas, le

réservoir a une taille plus modeste que l'aménagement standard présenté en introduction (c.f. paragraphe 1.5.2). Le débit équipé est très proche pour les deux solutions, soit environ $210 \text{ m}^3/\text{s}$. Les principales caractéristiques géométriques sont résumées dans le tableau 7.42. La gestion retenue offre également très peu de différence. La différence de hauteur de la zone d'épanchement compense la perte d'un casier pour la première solution présentée. Le volume d'épanchement offre environ $3.5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ additionnels au volume du réservoir. Le gain synergique se situe à 15 %. Le coût est compris entre 130 et $160 \cdot 10^6 \text{ CHF}$.

TAB. 7.42: Données géométriques brutes des solutions de la variante de Riddes pour 1993

Réservoir		Epanchement		Débit équipé
Long.	Haut.	Casier	Haut.	
m	m	–	m	m^3/s
534	7.94	8	3.18	215
1038	7.87	9	2.61	207

Les deux variantes retenues pour l'année 1999 présentent des réservoirs dont les tailles sont comprises entre celles des réservoirs de l'année 1993. Les débits équipés sont légèrement supérieurs à ceux de l'année 1993, notamment pour la seconde solution retenue. La zone d'épanchement est sensiblement réduite, à la limite de la faisabilité dans le second cas (hauteur de 41 cm). Le gain synergique se situe également aux environs de 15 % pour les deux solutions. Les principales caractéristiques géométriques sont résumées dans le tableau 7.43. Le coût est compris entre 130 et $145 \cdot 10^6 \text{ CHF}$.

TAB. 7.43: Données géométriques brutes des solutions de la variante de Riddes pour 1999

Réservoir		Epanchement		Débit équipé
Long.	Haut.	Casier	Haut.	
m	m	–	m	m^3/s
615	7.99	3	1.27	223
849	7.73	9	0.41	269

Le gain synergique comparé, d'une part, aux tailles des réservoirs et, d'autre part, aux coûts des aménagements, laisse supposer une zone de faisabilité probablement continue entre les 4 solutions retenues. Cette ouverture est utilisée au paragraphe suivant.

7.7.9 Agrégation des résultats obtenus pour la variante Riddes

L'optimisation liée à la définition de variantes communes aux deux années est effectuée manuellement. Le point de départ est la seconde solution retenue de l'année 1993. Ce choix est lié à la taille du réservoir qui dans ce cas est le plus grand des quatre. Par itérations successives, la taille du réservoir, la hauteur utile ainsi que le débit équipé sont augmentés. La solution finale trouvée permet de conserver un gain synergique positif pour les deux années. Les grandeurs géométriques de cette solution sont présentées au tableau 7.44. Sous forme graphique, les résultats (1993, 1999 et solution agrégée) de cette variante sont présentés à la figure 7.20. La solution agrégée est représentée soit par rapport à 1993, soit par rapport à 1999. Les différents axes du graphe sont normés par rapport à la variante qui offre la plus grande valeur.

La figure 7.20 illustre clairement le lien qui existe entre les trois axes "volume-coût-synergie". A cause du coût élevé pour la construction des digues, l'augmentation du volume (de celui

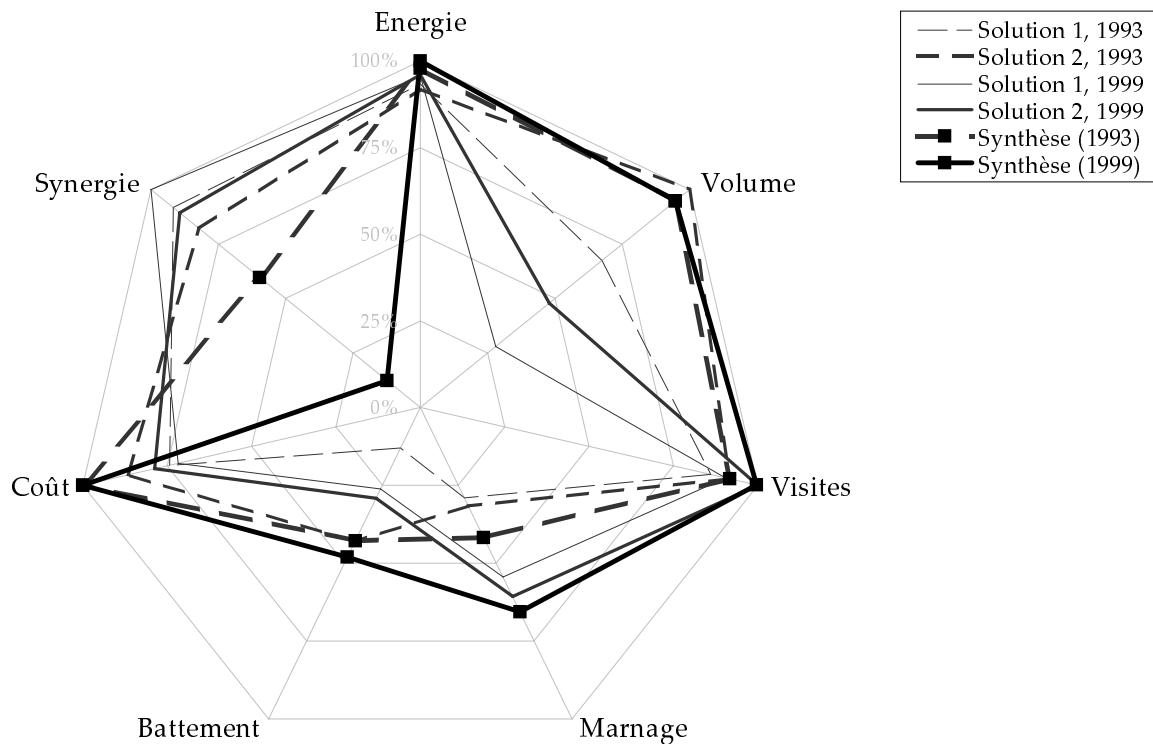


FIG. 7.20: Résultats graphique de la variante de Riddes

du réservoir et dans une moindre mesure de celui de la zone d'épanchement) conduit de manière importante à une élévation du coût total. En conséquence, l'indicateur de synergie baisse dans une proportion similaire. Ainsi, le classement des solutions sur l'axe du volume correspond à celui sur l'axe du coût mais est inversé sur l'axe de la synergie. A cause de la variabilité des valeurs des paramètres de gestion, le classement précédent n'apparaît pas aussi clairement sur les deux axes "marnage" et "battement". Enfin, les axes "énergie" et "visite" montrent peu de sensibilité pour les différentes variantes.

L'ensemble des solutions (données et résultats) de la variante "Riddes" (années 1993, 1999 et solutions agrégées) est donné à l'annexe A3.

Le coût total de l'aménagement donné par la solution agrégée est légèrement supérieur à ceux du paragraphe précédent (180 contre 130 à 160·10⁶CHF). L'augmentation conjointe de la hauteur utile et du débit équipé permet d'accroître légèrement la production annuelle d'énergie (+5%). L'amélioration de l'indicateur écologique de marnage aval est plus marquée. Cet indicateur passe ainsi d'une réduction de 90 m annuel à plus de 120 m. Les battements dans le réservoir sont similaires. L'augmentation du volume du réservoir (hauteur et surface) profite également à l'objectif de protection contre les crues dont le volume utile est augmenté de plus d'un million de m³ (+20%). Le tableau 7.45 donne, pour les deux années, les quantités produites pour chaque objectif et les investissements potentiels corrélés. Le gain synergique est sensiblement réduit (surtout pour l'année 1999). Cette diminution provient de l'augmentation de la taille du réservoir. L'agrégation avec la seconde solution du tableau 7.42 (longueur du réservoir de 1038 contre 1350 m) conduit à un indicateur synergique de 9.8%. Une partie du gain synergique (de 15% à 9.8%) est donc investie, de manière peu rentable, dans un accroissement de la taille du réservoir.

TAB. 7.44: Données de la solution agrégée de la variante Riddes

Réservoir		Epanchement		Débit équipé	
Long.	Haut.	Casier	Haut.		
<i>m</i>	<i>m</i>	—	<i>m</i>	<i>m³/s</i>	
1'350	7.99	9	2.60	250	

Réservoir		Epanchement		Total
Surface	Volume	Surface	Volume	Volume
<i>km²</i>	<i>10⁶m³</i>	<i>km²</i>	<i>10⁶m³</i>	<i>10⁶m³</i>
0.62	4.95	1.4	3.65	8.60

Gradient max		Amplitude max		Battement max		Digue perméable
Hiver	Ete	Hiver	Ete	Hiver	Ete	
<i>cm/h</i>	<i>cm/h</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>cm</i>	<i>m³/s</i>
6	15	30	70	450	75	1

TAB. 7.45: Quantités et investissements potentiels par objectif de la variante de Riddes pour 1993 et 1999 (10⁶CHF)

Année	Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues
	<i>m/an</i>	<i>m/an</i>	<i>Visites/an</i>	<i>GWh/an</i>	<i>10⁶m³</i>
1993	127	221	56'100	44.8	7.4
1999	361	404	61'000	45.7	7.4

Année	Coût	Investissement potentiel					Synergie	
		Total	Marnage	Battements	Loisirs	Energie		Crues
1993	180.0	197.6	69.2	17.8	2.8	86.8	21.0	9.8%
1999	180.0	183.6	67.0	6.4	2.8	86.4	21.0	2.0%

La valeur minimale calculée de l'investissement potentiel pour chaque objectif correspond à l'année 1999. La somme des investissements potentiels montre une marge de presque $4 \cdot 10^6$ CHF. La répartition linéaire de cette marge sur l'ensemble des objectifs permet une réduction des investissements potentiels de 2%. Le tableau 7.46 résume les valeurs des investissements potentiels et effectifs pour chaque objectif.

TAB. 7.46: Investissements minimaux potentiels retenus et effectifs de la variante de Riddes (10^6 CHF)

Année	Total	Marnage	Battelements	Loisirs	Energie	Crues	Synergie
Potentiel	183.7	67.0	6.4	2.8	86.4	21.0	2.0%
Effectif	180.0	65.7	6.3	2.7	84.7	20.6	-

Le calcul inverse permet de définir les coûts unitaires effectifs. Chaque objectif profite de la réduction de 2%. Le tableau 7.47 illustre ce calcul.

TAB. 7.47: Coûts unitaires optimaux et effectifs de la variante de Riddes calculés selon l'année 1993

	Marnage	Battelements	Loisirs	Energie	Crues
	<i>CHF/m_{an}</i>	<i>CHF/m_{an}</i>	<i>CHF/$visite_{an}$</i>	<i>CHF/kWh_{an}</i>	<i>CHF/m^3</i>
Potentiel	185'524	15'958	47.11	1.98	2.85
Effectif	181'842	15'641	46.18	1.94	2.79

La variante de Riddes illustre pour la troisième fois la performance de la méthode développée. Le calcul en parallèle des deux années de référence conduit à des indicateurs de synergie compris entre 7% et 14% malgré un filtre des acteurs relativement exigeant (c.f. tableau 7.41). La mise en commun des deux années nécessite des concessions sur le vecteur de décision ce qui conduit à une réduction du gain synergique. Le résultat final contient toujours une petite marge de manoeuvre possible avec les 2% de synergie.

7.8 Solutions finales retenues

L'étude des trois cas (variante large, variante réduite, variante Riddes) aboutit pour chacun à une solution appelée "agrégée". Pour rappel, les termes "large" et "réduite" ne portent pas sur les solutions obtenues pour ces deux études théoriques mais sur le vecteur de contraintes qui limite le champ de recherche de l'optimisation. Les trois solutions obtenues sont présentée ci-dessous côte à côte. Le tableau 7.48 présente un résumé des solution retenues, le tableau 7.49 donne les quantités produites pour chaque solution et chaque objectif (année 1999 prise comme référence) et le tableau 7.50 affiche les coûts par objectif. Ces trois tableaux sont présentés et commentés dans les paragraphes suivants.

TAB. 7.48: Dimensions des solutions retenues

	Surface rés.	Hauteur utile	Débit équipé	Vol. épanchement
	km^2	m	m^3/s	$10^6 m^3$
Large	0.25	7.68	270	11.14
Réduite	0.41	7.88	220	1.57
Riddes	0.62	7.99	250	3.65

Les surfaces des réservoirs des trois solutions retenues, même si elles présentent une différence d'un facteur 2.5, sont toutes largement inférieures à la dimension initiale prévue de $1 km^2$ de l'aménagement standard (c.f. paragraphe 1.5.2). L'accroissement de surface pour la variante Riddes (0.62 contre $0.25 km^2$) est effectué au détriment de l'indicateur synergique. Cette relative petite taille des réservoirs s'explique par l'absence de nécessité d'une taille supérieure (ni pour la réduction du marnage hivernale, ni pour les aspects de loisirs estivaux) ainsi que par les coûts qui lui sont reliés. La protection contre les crues est le seul objectif qui nécessite un volume important. Ce dernier est généré de manière plus économique par une zone d'épanchement. Cette constatation offre également l'avantage de ne pas mobiliser de la surface en permanence pour une utilisation finalement très rare.

Les hauteurs utiles sont toutes les trois très similaires, soit légèrement inférieures à $8.0 m$. Compte tenu d'une revanche de $1.0 m$, la hauteur finale des ouvrages (digues du réservoir, barrage et centrale, digues amont) est comprise entre 8.68 et $8.99 m$. Etant donné la hauteur actuelle des digues sur le Rhône ($8.68 m$ selon la modélisation), ces choix minimisent le coût des digues amont. Avec une pente naturelle de la plaine du Rhône de 0.06% , les volumes engendrés pour le rehaussement des digues amont peuvent rapidement devenir très importants (influence sur la hauteur du rehaussement mais également sur la longueur de ce dernier). Avec un coût volumique majoré de 25% pour tenir compte de la difficulté liée à un rajout, les coûts engendrés par les digues amont peuvent fortement influencer la faisabilité (ou la non-faisabilité) économique du projet.

Le débit équipé de la centrale est compris entre 220 et $270 m^3/s$. Il est donc légèrement supérieur au débit initial prévu ($200 m^3/s$). Cette augmentation est liée au gain synergique du projet. L'étude d'un aménagement à but unique énergétique montre que le débit correspondant au coût minimal se situe vers $200 m^3/s$. Par ailleurs, la production d'énergie tire profit d'une hauteur légèrement supérieure par rapport à l'aménagement à but unique ($7.68 m$ de hauteur utile pour éviter tout rehaussement amont).

Enfin, le volume d'épanchement présente de très grandes variations quant à son volume. Ces variations sont liées aux contraintes initiales de la zone potentielle d'épanchement. Manifestement trop optimiste dans le cas de la variante large, la zone disparaît quasiment

lorsque les contraintes se resserrent (variante réduite). Dans le cas de la variante Riddes, la forme favorable (ratio longueur de digue sur surface d'épanchement) permet avec une hauteur modeste de générer un volume moyen (environ $3.5 \cdot 10^6 \text{m}^3$). Dans les trois cas cependant, la hauteur de la zone tend toujours vers des valeurs faibles (inférieure à 3 m). Le coût des digues en est l'explication. La modélisation n'admet aucune digue existante pour cette zone. Un projet concret peut certainement aboutir à d'autres conclusions sur ce point.

TAB. 7.49: Quantités produites par objectif pour les solutions retenues

	Marnage	Battelements	Loisirs	Energie	Crues
	$\%_{red}$	$\%_{red}$	<i>Visite/an</i>	<i>GWh/an</i>	10^6m^3
Large	61	44	57'800	43.1	12.5
Réduite	73	41	45'300	40.8	4.0
Riddes	65	48	61'000	45.7	7.4

Le marnage aval présente pour les trois solutions des valeurs très comparables. Il est exprimé en pourcentage de réduction par rapport au marnage existant dans le Rhône. Cette réduction souligne la relative indépendance entre la taille du réservoir et le taux de réduction du marnage. Le marnage hivernal peut être concentré dans un réservoir de dimension modeste pour autant que les battements dans ce dernier soient acceptables. Le marnage estival de la rivière, largement moindre, a peu d'impact sur les battements estivaux du réservoir et par conséquent peu d'impact sur les autres objectifs (loisirs, production d'énergie).

Le taux de réduction des battements dans le réservoir (par rapport à la situation qui les maximise) reste également très constant pour les trois solutions. La taille supérieure du réservoir de Riddes permet toutefois un résultat légèrement meilleur que la variante large tant pour le marnage que pour les battements (65 et 48 % contre 61 et 44 %).

La réduction des battements dans le réservoir se répercute sur le nombre annuels de visites supposées sur le site. Bien que du même ordre de grandeur pour les trois solutions, l'aménagement prévu de Riddes offre le potentiel le plus élevé.

Les trois productions énergétiques se situent entre 40 et 45 *GWh* par an. Cette différence s'explique, d'une part, par le débit équipé ainsi que la hauteur de chute et, d'autre part, par la gestion du réservoir. L'augmentation de la surface de ce dernier permet de réduire l'amplitude des battements ce qui maximise ainsi la production. La production maximale est atteinte avec la variante de Riddes. La taille du réservoir ainsi que la hauteur de chute compense le débit équipé de la variante large (250 contre 270 m^3/s).

Les volumes de rétention pour les crues varient d'un facteur 3. Cette différence s'explique surtout par le vecteur de contraintes trop optimiste de la variante large concernant les zones de rétention. Elle s'explique également par la modification du prix unitaire volumique. Cette différence est liée à l'optimisation partielle pour les crues de la variante Riddes.

TAB. 7.50: Coût par objectif et coût total pour les solutions retenues (10^6CHF)

	Marnage	Battelements	Loisirs	Energie	Crues	Total	Synergie
Large	58.0	5.4	2.5	69.4	18.4	153.8	5.2 %
Réduite	73.1	5.3	2.2	71.6	6.1	158.3	0.2 %
Riddes	63.9	6.1	2.8	82.4	21.0	180.0	2.0 %

Les quantités produites pour chaque objectif se retrouvent directement dans les coûts qui sont attribués à ces objectifs. Ainsi la relative stabilité liée aux quantités se retrouvent dans la clé de répartition des coûts. Globalement, le domaine de faisabilité se situe pour des aménagements dont le coût d'investissement reste inférieur à $200 \cdot 10^6$ CHF. La variabilité des deux contributeurs principaux (énergie et marnage) est d'environ $15 \cdot 10^6$ CHF soit inférieure à 20 %. Celle des deux contributeurs secondaires (battements et loisirs) est faible et inférieure à $1 \cdot 10^6$ CHF. L'objectif de protection contre les crues présente deux extrêmes possibles. La raison de cette variation est déjà expliquée ci-dessus.

Le tableau 7.51 résume les coûts par objectif. Ces derniers sont ventilés sur chaque objectif, moyennés pour les trois solutions trouvées et présentés sous forme de pourcentage du coût moyen.

TAB. 7.51: Coût moyen par objectif et en pourcentage du coût total (10^6 CHF)

Marnage	Battements	Loisirs	Energie	Crues	Total
65.0	5.5	2.5	75.0	18.0	166.0
39.2 %	3.3 %	1.5 %	45.2 %	10.8 %	100 %

Ces chiffres font clairement ressortir les deux objectifs principaux, soit la production d'énergie et la régulation du marnage. La protection contre les crues occupe une place intermédiaire tandis que la réduction des battements dans le réservoir et les aspects de loisirs sont largement secondaires.

Ces résultats confirment la position centrale de l'aménagement prévu pour la régulation du marnage. Ils modifient cependant la position relativement secondaire initialement pressentie pour la production d'énergie. Cette dernière occupe même, avec les chiffres présentés, la première place.

7.9 Conclusions

Compte tenu des trois buts spécifiques de ce travail énoncés au paragraphe 1.6, les trois études de cas effectuées dans le cadre de ce chapitre illustrent la méthodologie développée au paragraphe 6.7.

Pour ces trois cas, la méthodologie répond tout d'abord au premier but spécifique, à savoir de quantifier l'impact des décisions techniques sur l'ensemble des acteurs. Hormis les aspects qualitatifs spécifiquement présentés et appliqués directement au chapitre 4^{ème}, les aspects quantitatifs sont particulièrement illustrés et rendus compréhensibles par les optimisations partielles. Ces dernières montrent en effet les meilleures zones de faisabilité pour chaque objectif et permettent de cerner le problème dans chacune de ses parties. Dans un second temps, l'optimisation globale apporte la compréhension du système dans son ensemble et illustre les liens qui existent entre les différents objectifs.

La clé de répartition des coûts représente le second but spécifique de ce travail. Implicitement contenue dans les produits délivrés, la clé proposée présente un triple avantage. Elle établit un lien solide entre les produits réellement délivrés et les coûts demandés, elle permet d'être indépendante des tailles optimales de chaque objectif, et enfin elle assure un coût unitaire inférieur à la solution optimale d'un aménagement à but unique.

Le troisième but spécifique réside dans l'établissement d'un outil de base pour la négociation. Les solutions présentées dans les études de cas constituent de fait un point de départ pour

une négociation potentielle. Loin d'être parfaites, ces solutions possèdent cependant les caractéristiques suivantes :

- Elles sont techniquement réalisables. La variante de Riddes illustre en effet la prise en compte des limites physiques d'un site potentiel et ses conséquences sur les résultats des optimisations partielles et de leur coût associé.
- Elles sont optimales. L'optimisation globale assure de ne retenir que les meilleures solutions au sens des fonctions objectif développées. Les courbes de Pareto présentées, entre autres, aux figures 7.1, 7.10 et 7.12 assurent cette optimalité. La caractéristique multi-objective de l'optimisation permet de plus une génération diversifiée de solutions.
- Elles sont synergiques. Le filtre synergique élimine toutes les solutions dont l'un des objectifs au moins pourrait être réalisée de manière avantageuse par un autre aménagement. Ce filtre permet ainsi d'assurer qu'il est intéressant de mettre en commun les objectifs.
- Elles sont payables et satisfaisantes. Le filtre des acteurs permet d'éliminer les solutions dont l'un des objectifs au moins est trop sollicité ou, à l'inverse, dont l'un des objectif au moins ne remplit pas le minimum souhaité. Ce dernier filtre introduit un élément subjectif fort dans le processus. Il constitue l'élément clé de discussion et de décision.

Les solutions finales proposées dans ce chapitre sont fortement dépendantes des choix effectués au niveau des filtres des acteurs. Ces choix sont effectués, dans le cadre de cette étude, de façon autonome et non-concertée. Les résultats sont présentés comme une illustration de la méthode. Des résultats différents, basés sur la volonté chiffrée des différents acteurs (représentant des objectifs), peuvent être atteints facilement. Le filtre des acteurs intervient, en effet, comme dernière étape de la méthode. Ainsi, sa modification ne nécessite aucune nouvelle optimisation partielle ou globale.

8 Conclusions et Perspectives

*A la fin d'une longue discussion, nous arrivâmes à conclure qu'au fond
il n'y a rien de plus particulier qu'une idée générale*

(Renard, 1893)

8.1 Préambule

Conclure un travail de recherche, dont le sujet est finalement si peu exploré après quatre années de labeur, n'est pas tâche facile. Toutefois, pour permettre d'achever cette étape, probablement suivie par d'autres, il est important de laisser une image claire de ce qui a été accompli. Ce chapitre est donc plus une synthèse qu'un résumé. S'il reprend les principales étapes de ce qui a été accompli, c'est d'abord pour mettre en relief les différentes parties entre elles plutôt que pour répéter ce qui a déjà été écrit précédemment.

Ce travail est composé de trois parties principales :

- la revue bibliographique qui comprend deux chapitres, l'un sur les méthodes qualitatives (chapitre 2^{ème}) et l'autre sur les méthodes quantitatives (chapitre 3^{ème}) ;
- le corps du travail qui comprend trois chapitres, l'un sur l'application, à un aménagement hydraulique à buts multiples, d'une analyse qualitative reprise de la méthode de Gomez and Probst (1995) (chapitre 4^{ème}), l'autre sur le développement de modèles de simulation pour une analyse quantitative (chapitre 5^{ème}) et le dernier sur le développement d'une méthodologie de sélection de solutions (chapitre 6^{ème}) ;
- l'application de la méthodologie complète à un cas d'étude sur le Rhône valaisan (chapitre 7^{ème}).

Cette articulation, respectée tout au long de ce travail, est basée sur le principe de la dynamique des systèmes nécessaire à l'appréhension des problèmes complexes. Cette même base est déjà présente dans la méthode de Gomez and Probst (1995). Ce principe répond, d'une part, à l'économie des moyens et, d'autre part, à l'adaptation des outils au degré de détail voulu. Il va du général au particulier, du qualitatif au quantitatif, de la méthode à l'application, du problème à la décision.

Ce chapitre de conclusion retrace tout d'abord les principaux résultats des trois chapitres centraux et de l'application (chapitres 4^{ème} à 7^{ème}). Il débute par un rappel des développements de la méthode qualitative. Il poursuit par un aperçu des différents modèles de simulation élaborés ainsi que des résultats qu'ils produisent. Il continue en donnant les étapes principales de la méthodologie élaborée et termine ce tour d'horizon en décrivant très brièvement le cas d'application de Riddes et les principaux résultats obtenus.

Dans une vue plus synthétique, ce chapitre relève ensuite les points novateurs développés spécifiquement dans ce travail. Ce sont :

- le développement d'une méthodologie intégrée pour des ouvrage à buts multiples ;

- la méthode de résolution du problème hydraulique lié au marnage ;
- la méthode de résolution du problème hydraulique lié aux crues ;
- la définition de la synergie et les différentes techniques de filtrage des solutions ;
- l'application d'une méthode systémique qualitative, issue du monde économique, à un problème d'ingénierie d'hydraulique.

Finalement, ce chapitre termine avec quelques perspectives pour des développements ultérieurs. Ce sont :

- la prise en compte de prévisions hydrologiques probabilistes tant pour la gestion ordinaire que pour la gestion de crues ;
- l'amélioration des modèles de simulation et notamment celui lié aux aspects de loisirs ;
- l'adjonction de nouveaux modèles de simulation, en particulier pour le fonctionnement de la nappe phréatique ;
- le remplacement du modèle d'optimisation de la gestion par un réseau de neurone ;
- la prise en compte du modèle écologique directement dans les optimisations ;
- et enfin, dans un rêve informatique, la modélisation des décideurs eux-mêmes pour les aspects liés à un aménagement à buts multiples.

8.2 Aspects qualitatifs

Fondé sur la dynamique des systèmes, ce travail débute par une modélisation qualitative du système complexe étudié. Il s'agit principalement d'en comprendre le fonctionnement interne par les relations qui existent entre ses différentes parties. Cette compréhension permet de cerner, d'une part, les problèmes existants au sein du système actuel et, d'autre part, les attentes des principaux intervenants quant à des modifications possibles ou souhaitées.

Pour permettre une modélisation qualitative physique du système étudié avec la méthode proposée par Gomez and Probst (1995), des adaptations sont nécessaires. C'est, d'une part, le choix de l'approche physique exclusivement par opposition à la pluralité des approches logiques possibles. C'est, d'autre part, l'extension du concept d'activité et de réactivité des facteurs (profondeur d'agrégation des influences). Les développements liés spécifiquement au logiciel *PACEVs* apportent en plus la notion de distribution spatiale (rayon d'action) et transforme l'activité (ou réactivité) en impact (distinction des effets désirables de ceux indésirables).

Afin de valider la méthode développée, une analyse de sensibilité est menée sur le cas d'étude. Elle porte, d'une part, sur le modèle lui-même avec l'intensité des relations choisies par les experts et, d'autre part, sur la profondeur d'agrégation des influences. Cette analyse conclut que la méthode est applicable essentiellement sur les facteurs principaux du système.

L'application de la méthode développée permet finalement de classer les différents facteurs dans trois groupes. Le premier groupe rassemble les facteurs liés au dimensionnement, le second groupe les facteurs liés à la gestion et le dernier groupe les facteurs qui sont des indicateurs du projet. Dans chacun des trois groupes, les facteurs-clés sont mis en évidence.

L'étude qualitative conclut sur la nécessité d'une approche quantitative. Elle apporte cependant les bases nécessaires aux différents modèles de simulation et permet, par une variable appelée "pivot", de casser la complexité qui existe entre le système décisionnel et le système physique.

8.3 Aspects quantitatifs

Les aspects décisionnels étant relégués dans la partie méthodologie, les aspects quantitatifs ou physiques peuvent être abordés par la simulation. Afin de respecter les différents aspects mis en lumière par l'analyse qualitative, autant d'outils de simulation que de thèmes abordés sont développés. Ce sont tout d'abord la gestion ordinaire de l'aménagement ainsi que la gestion des crues. Ces deux outils permettent de déterminer le fonctionnement hydraulique de l'aménagement, c'est-à-dire le débit écoulé à l'aval. Les autres outils de simulation ne sont plus que des conséquences de cette gestion. Les aspects énergétiques, thermiques, écologiques et sociaux découlent en effet uniquement, pour un aménagement donné, des choix liés à la gestion. La simulation financière est en partie influencée par les outils précédents (revenus liés au fonctionnement de l'aménagement) et en partie dépendante de l'aménagement directement (investissement initial).

Les résultats de simulation permettent tout d'abord de quantifier les produits délivrés par un aménagement donné pour une gestion donnée. Ils apportent ainsi une réponse quantifiée aux conséquences (positives ou négatives) du projet. En ce sens, l'ensemble de ces simulations constitue un outil adéquat pour évaluer l'impact des mesures techniques (dimensionnement et gestion) du projet sur l'environnement.

Les résultats de simulation permettent également de comparer les différents aménagements ainsi que leurs différentes gestions possibles. Moyennant des fonctions d'agrégation, les résultats bruts de simulation peuvent être réduits à quelques valeurs significatives. Ces valeurs représentent un projet donné. Par itération, il devient ainsi possible d'améliorer le projet initial, tout au moins de le faire évoluer dans la direction souhaitée.

Ces outils de simulation constituent un premier support d'aide à la négociation. Dans les limites de validité des modèles développés, ces outils apportent une réponse indiscutable des conséquences physiques d'un projet hypothétique. Etant donné la rapidité de calcul du processus (de l'ordre de la demi-minute), il serait même envisageable d'exploiter ce potentiel d'adaptation en *live* au cours d'une négociation.

Selon la définition même du compromis, *accord obtenu par concession réciproque* (Larousse, 1994), ce support d'aide à la négociation permet d'aboutir à des solutions de cette nature. Il permet, en effet, d'accorder des points de vue divergents à la condition que chaque partenaire réduise ses prétentions. La figure 8.1 illustre pour deux objectifs A et B, une solution en faveur de l'objectif A, une solution en faveur de l'objectif B et un espace de solution de compromission.

8.4 Méthodologie développée

Passer du compromis au consensus requiert une étape supplémentaire. C'est l'objectif principal de la méthodologie développée. Habituellement, le consensus est défini comme *un accord et un consentement général (tacite ou exprès) du plus grand nombre* (Larousse, 1994). Dans ce travail, il est plutôt considéré comme une solution qui ne désavantage aucun des partenaires ce qui conduit naturellement au consentement général. Selon la même figure 8.1, les solutions de consensus dépassent le compromis en ce sens qu'elles accordent de meilleures performances pour au moins un des objectifs. Elles appartiennent en quelque sorte au même type que les solutions de Pareto.

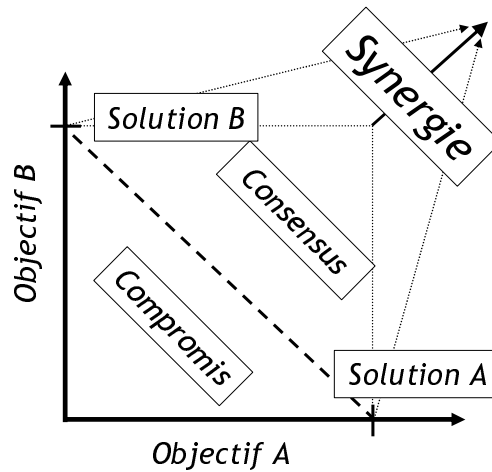


FIG. 8.1: Solutions de compromis, de consensus et de synergie

La méthodologie développée est basée sur un ensemble de procédés d'élimination de solutions potentielles pour ne retenir finalement que les solutions réalistes. Elle considère, dans un premier temps, l'ensemble des solutions potentielles. Ce nombre de solutions correspond à la combinatoire de différentes variables de décision. S'il y a au moins une variable continue, ce nombre est théoriquement infini.

Le premier filtre est implicitement contenu dans le vecteur de contraintes qui délimite l'espace admissible des variables de décision. Ainsi, pour autant que ces contraintes reproduisent les contraintes naturelles d'un site, les solutions restantes correspondent toutes à des solutions techniquement réalisables.

Le second filtre est réalisé par une optimisation multi-objective. Le résultat de cette optimisation est un ensemble de solutions théoriquement optimales. Il nécessite, pour faciliter la comparaison des objectifs, des optimisations partielles. Ces optimisations partielles établissent, pour chaque objectif, des clés de transfert entre les produits délivrés et l'investissement potentiel.

Le troisième filtre élimine les solutions optimales qui ne correspondent pas à une solution de consensus par rapport à au moins une solution optimale partielle. Ce filtre est appelé synergique. Il permet ainsi de dépasser les solutions consensuelles.

Le quatrième filtre est double. Il élimine les solutions synergiques qui ne correspondent pas aux attentes des partenaires par défaut de production ou par excès de coût.

Les solutions restantes sont donc des solutions techniquement réalisables, optimales au sens de Pareto, synergiques, acceptables quant à la production de chacun des objectifs et payables par chacun des partenaires. Ces solutions constituent assurément une base de négociation autrement plus élaborée que celles basées sur la seule simulation. Elle présente par ailleurs l'avantage, pour un site donné, de n'inclure les aspects purement subjectifs qu'à la fin du processus. Il est donc très facile de modifier les paramètres du quatrième filtre pour obtenir de nouvelles solutions.

8.5 Application au cas d'étude de Riddes

La modélisation qualitative du Rhône à Riddes pour un aménagement à buts multiples permet de distinguer six thèmes principaux. Ce sont les aspects hydrauliques, les aspects énergétiques, les aspects socio-économiques, les aspects liés à la nappe phréatique et finalement les aspects écologiques. Pour chacun de ces six aspects, les facteurs-clés sont mis en évidence et attribués à l'une des trois catégories (dimensionnement, gestion, indicateur).

Analysé dans son ensemble, le système relève tout d'abord les principaux facteurs de dimensionnement, à savoir ce qui touche directement le réservoir (hauteur et surface), la passe à poisson (débit) et la production énergétique (débit équipé). Par agrégation, les variables de gestion sont réduites au seul débit sortant de l'aménagement. Cette variable constitue également la variable "pivot" entre les systèmes de modélisation physique et logique. Finalement, les indicateurs regroupent l'ensemble des impacts du système tant pour les aspects écologiques, sociaux, financiers, énergétiques ainsi que ceux liés à la nappe phréatique.

L'ensemble des résultats qualitatifs forment l'étape initiale de la modélisation quantitative. Ils définissent les modèles nécessaires de simulation (hydraulique, énergétique, thermique, écologique, social et financier), les contraintes à respecter (vecteur des contraintes pour les variables de décision) ainsi que l'articulation des modèles entre eux (résolution optimisée de la gestion comme étape initiale).

Sur la base des simulations, l'optimisation générale est développée. Elle utilise l'algorithme d'optimisation *QMOO* en lui ajoutant deux fonctionnalités (mise en réseau d'ordinateurs, prise en compte de résultats de simulation qui n'entrent pas dans l'optimisation). Les résultats issus de *QMOO* sont des solutions situées sur des courbes de Pareto. L'investissement est compris entre 100 et $1\,000 \cdot 10^6$ CHF. Les revenus bruts sont compris entre 100 et $500 \cdot 10^6$ CHF.

L'application des différents filtres (synergique, acteurs inférieur, acteurs supérieur) permet d'éliminer l'essentiel des solutions optimales pour n'en conserver que deux ou trois. L'agrégation finale exécutée manuellement permet d'aboutir à une solution unique. Cette solution peut être caractérisée par un réservoir légèrement supérieur à 0.5 km^2 , une hauteur utile située vers 8.0 m et un débit équipé de $250 \text{ m}^3/\text{s}$. L'investissement total de cet aménagement est d'environ $180 \cdot 10^6$ CHF et l'investissement potentiel de $185 \cdot 10^6$ CHF.

8.6 Innovations de ce travail

Les aménagements à buts multiples sont une expression courante dans le domaine de l'ingénierie hydraulique. Le rapport technique onusien (UN, 1972) utilise déjà ce mot composé comme un terme courant. La première innovation de travail réside cependant dans l'approche choisie. Habituellement, ces ouvrages sont conçus pour un but principal unique sur lequel se superposent des buts secondaires. Dans l'approche mise en oeuvre, les différents buts sont traités simultanément par l'optimisation globale. De plus, la conception, le dimensionnement et la gestion sont résolus de manière totalement intégrée.

La seconde innovation réside dans la méthode choisie pour résoudre le marnage. Bien que la méthode mathématique soit une approche classique de gestion des réservoirs, elle n'a cependant jamais été exploitée, en tout cas pas comme tel dans la littérature trouvée, pour

résoudre la marnage hydroélectrique par le biais d'une gestion optimisée de réservoirs. La forme mathématique choisie, soit pour les contraintes de gestion, soit pour la forme de la fonction objectif, constitue ainsi un élément nouveau.

La troisième innovation touche à la méthode développée pour la comparaison de moyens mis en oeuvre liés à la résolution du problème des crues. A partir d'un ensemble d'hydrogrammes de crues, la méthode permet, par le biais d'une génération statistique aléatoire, de comparer, par rapport à une situation de référence, l'effet probable moyen d'une augmentation de la capacité hydraulique à l'effet probable moyen d'une augmentation de la capacité de rétention. Cette comparaison hydraulique permet dans un second temps une comparaison économique de l'effet des moyens mis oeuvre.

La quatrième innovation se trouve dans la définition de la synergie et son application concrète par différents filtres. La synergie est basée sur la constatation que, indépendamment de l'objectif poursuivi et de son unité physique de production, toute réalisation nécessite un investissement initial. Ainsi, par le biais d'une optimisation d'un aménagement à but unique, une fonction de transfert peut être définie entre l'unité physique de l'objectif et son besoin en investissement unitaire. Dès lors, la mise en commun des objectifs est rendue possible sur la base d'une unité d'investissement. Cette mise en commun doit naturellement aboutir à un gain synergique sur l'investissement total.

La dernière innovation réside enfin dans la mise en oeuvre d'une approche systémique pour un problème d'ingénierie classique en apparence. La prise en compte d'un environnement aussi large que possible pour un aménagement déjà intrinsèquement complexe rend insuffisant toute approche phénoménologique et nécessite une approche systémique. Bien que la distinction entre *phénomène* et *système* relève du degré de détail avec lequel l'objet est étudié (tout système peut devenir un méga-phénomène et tout phénomène peut devenir un micro-système), il demeure que l'approche reste différente. Le phénomène est étudié comme un tout décomposable tandis que le système regarde principalement les interactions entre les parties. De ce fait, l'approche systémique ne permet plus la décomposition.

8.7 Perspectives

Ce travail, même s'il peut paraître conséquent (et il me le paraît!), ne constitue probablement que des prémices dans le domaine. Parmi les nombreux points qui nécessiteraient des approfondissements, les plus pertinents me semblent être les suivants :

- Il faudrait tout d'abord intégrer les aspects probabilistes dans la gestion ordinaire. Compte tenu d'un débit futur probable calculé par un modèle de prévision, l'incertitude pourrait être reportée sur la gestion du réservoir. Son impact pourrait ensuite être exprimé sur le marnage aval ou sur des battements additionnels dans le réservoir. La nécessité d'un volume additionnel de réserve de gestion pourrait alors être dimensionné. Les conséquences pourraient également être quantifiées tant sur la production énergétique que sur la gestion écologique aval.
- Le second approfondissement est lié à la gestion des crues. Cette gestion est définie dans ce travail par des règles fixées d'avance, directement liées au débit mesuré. Une amélioration consiste à intégrer, dans ce cas également, des prévisions de débit et à adapter la gestion en conséquence. De la sorte, les impacts liés à la rétention pourraient être grandement augmentés.

- Les modèles de simulation élaborés sont pertinents pour les plus simples (hydraulique, énergétique et thermique notamment). Le modèle des coût pourrait être amélioré en ce qui concerne la prise en compte de l'état existant (notamment des digues potentiellement existantes) ainsi que pour les aspects liés aux machines hydromécaniques. Le modèle des loisirs nécessiterait également de fortes améliorations. Il ferait certainement, à lui tout seul, l'objet d'une thèse en sociologie.
- L'adjonction de nouveaux modèles de simulation permettrait de considérer des aspects quelque peu négligés dans ce travail. Il s'agit notamment du comportement de la nappe phréatique (considéré uniquement par des aspects constructifs) et des problèmes liés à la sédimentation. Ces deux aspects ont été traités dans deux travaux de diplôme distincts (Irniger, 2000; Filliez, 2006). Ils mériteraient cependant des approfondissements.
- L'outil d'optimisation utilisé, comme tous les algorithmes génétiques, nécessite de nombreuses itérations (entre 20'000 et 50'000). Cependant, le modèle d'optimisation de la gestion, passage obligé pour l'évaluation de la fonction objectif, est lent (entre 30 et 40 secondes par évaluation). En conséquence, malgré des ressources informatiques considérables, les temps de calcul sont importants. Une solution pour accélérer l'évaluation serait d'encapsuler le modèle de gestion dans un réseau de neurones. Après une phase d'apprentissage (entre 5'000 et 10'000 évaluations), ce réseau pourrait remplacer le logiciel d'optimisation *AMPL* avec un degré suffisant de précision pour les optimisations partielles ou globales. Le temps de calcul pour l'évaluation de la gestion optimale d'une solution serait alors réduit à quelques fractions de seconde.
- Afin de considérer les exigences des acteurs le plus tard possible dans le processus (pour éviter des itérations sur la phase d'optimisation), le filtre des acteurs intervient comme dernière étape. Il est alors limité à deux valeurs par acteur (quantité minimale et investissement maximal). Si ces exigences étaient fixées de manière quasi-définitive dans une phase antérieure, elles pourraient être intégrées directement dans la fonction de transfert. Elles prendraient la forme de fonction d'acceptation. Ceci permettrait de ne pas devoir se limiter à deux valeurs (similaires à des seuils) mais de pouvoir considérer une fonction continue. Les solutions optimales trouvées approcheraient alors plus finement les exigences de chacun.
- Pour des raisons liées à l'évolution des différents modèles, et notamment celle du modèle écologique, les optimisations partielles et globales n'ont pas pu être effectuées directement avec ce dernier. Lorsqu'il sera définitif, il serait utile de le considérer pleinement.
- Enfin, peut-être dans un rêve qui consiste à tout vouloir modéliser, l'intégration des acteurs eux-mêmes dans le système pourrait constituer une superstructure au-dessus du modèle d'optimisation. Ce "super modèle" deviendrait un véritable outil d'aide à la négociation en incluant les aspects émotionnels lors de la prise de décision. Il relèverait autant des sciences sociales que politiques. Imaginé sur la base d'un système informatique multi-agents, il dépasse cependant le cadre strict d'une thèse en ingénierie de l'hydraulique.

Au-delà des perspectives scientifiques, la perspective la plus motivante, serait de voir une application réelle de la méthodologie développée. En particulier, cette méthode trouverait sa validation la plus pertinente par sa mise en oeuvre lors de la réalisation d'un aménagement à buts multiples.

8.8 Le mot de la fin

Avant de mettre un point final à ce rapport, je me permets une remarque très personnelle. Les développements accomplis tout au long de ce travail de recherche et décrits précédemment ont été réellement passionnants.

Profondément conscient cependant des limites des modèles développés, la remarque de Joliot (2001), *le danger qui menace les chercheurs aujourd'hui serait de conclure qu'il n'y a plus rien à découvrir*, n'est assurément pas de mise.

Il en est une autre toutefois qui guette la suite de ce travail. Comme cela a été esquissé dans l'application, les résultats finaux du cas d'étude de Riddes remettent en question les tailles de l'aménagement à buts multiples initialement imaginées (tout au moins celles du réservoir). Dès lors, se baser uniquement sur ce travail et affirmer que l'aménagement optimal est trouvé demeure absolument présomptueux. L'attitude modeste qui accepte constamment la remise en question convient nettement mieux aux scientifiques et notamment pour les problèmes du genre complexe. C'est exactement ce que François Marie Arouet, plus connu sous le nom de Voltaire, résume avec brio dans son poème sur la loi naturelle :

Que conclure à la fin de tous mes longs propos ?

C'est que les préjugés sont la raison des sots.

(Voltaire, 1961)

Remerciements

Ce travail de recherche a été effectué au Laboratoire de Constructions Hydrauliques (EPFL) sous la direction et avec le soutien du Prof. Dr Anton Schleiss. Alors que je n'étais qu'un jeune ingénieur diplômé, ce dernier m'a néanmoins accordé toute sa confiance pour réaliser cette recherche. Il m'a laissé toute liberté pour concrétiser des idées *a priori* peu susceptibles de mener au succès. Pour ce soutien, cette confiance et cette liberté qui ont rendus ces années passées au LCH tellement enrichissantes, je le remercie plus que vivement.

Dans ces remerciements, j'aimerais également inclure le Dr Jean-Louis Boillat, qui, bien que resté partiellement en dehors de cette recherche, a su me prodiguer de très bons conseils tout comme le Dr Erik Bollaert mon assistant attitré.

Ce travail ne serait cependant pas aussi fructueux sans l'équipe pluridisciplinaire du projet SYNERGIE. Composée de biologistes, d'architectes, d'ingénieurs civils et mécaniciens, cette équipe m'a accompagné, aidé et soutenu pendant presque cinq années. Mes remerciements les plus vifs vont donc à Marc Pellaud (mon co-thésard en écologie aquatique) et son directeur de thèse, Rodolphe Schlaepfer du Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes (EPFL), à Thierry de Pourtalès du Laboratoire de Paysage et Architecture (EPFL), à Henri Civier (pour son humour toujours bienvenu), Jean-Michel Burnier et Patrice Droz du bureau STUCKY, et à Lionel Chapuis et Gérard Vulliod de l'entreprise VATECH-ANDRITZ.

Le projet SYNERGIE n'aurait pas vu le jour sans un soutien financier important. Initié par l'OFEV avec le projet Rhône-Thur, le financement a été complété par les Forces Motrices Valaisannes (FMV-Vs), le Service des Forces Hydrauliques (SFH-Vs) et l'Association suisse pour l'aménagement des eaux (SWV). Ce projet a également bénéficié du financement de la Confédération (projet CTI n° 6794.1 FHS - IW). J'adresse donc mes remerciements à MM. Bruno Schädler et Jean-Pierre Jordan de l'OFEV, Eric Wuilloud, Etienne Caloz et Jean Pralong des FMV, Walter Hauenstein de la SWV et Moritz Steiner et Pierre-Benoît Raboud du SFH. A ce dernier tout particulièrement, pour ses remarques pertinentes et son engagement inconditionnel, j'aimerais exprimer ma profonde gratitude.

Toutefois, un projet aussi passionnant ne serait rien sans vie sociale. Et de ce point de vue, le LCH obtient assurément une palme. Pour toutes ces discussions, souvent animées mais toujours agréables, j'adresse mes remerciements chaleureux à tous mes collègues côtoyés quotidiennement : Frédéric (mon collègue de bureau pour ses précieux conseils), Sélim, Stéphanie, Tobias, Asin, Marcello, Burkhard, Pedro, Louis, Javier, Rémi, Sameh, Giovanni, Martine. . . des prénoms qui indiquent la richesse et la diversité de cette petite société !

Enfin, je voudrais encore adresser ici peut-être plus que des remerciements à celle qui a passé des heures à m'attendre le soir ou le samedi, à celle qui m'a fourni tout le confort matériel tellement agréable, à celle qui m'a assuré de son soutien indéfectible lors des moments difficiles, à celle sans qui j'aurais eu mille fois plus de peine pour accomplir ce travail, à celle qui tout simplement est devenue mon épouse et la mère de notre petit Louis-Nicolas au cours de ce doctorat. Pour tout cela, merci Elisabeth.

Table des figures

1.1	Affectation des réservoirs selon leurs objectifs	3
1.2	La Suisse, le Rhône et son bassin versant	6
1.3	Evolution du débit équipé cumulé du Rhône supérieur	7
1.4	Bassin versant du Rhône supérieur avec ses ouvrages d'accumulation	7
1.5	Intégration <i>in situ</i> du projet à buts multiples (Irniger, 2000)	10
1.6	Représentation conceptuelle du projet à buts multiples	10
1.7	Définition de la hauteur utile	11
1.8	Articulation des différents chapitres	14
2.1	Représentation schématique des 4 phases de la modélisation	19
3.1	Représentation schématique d'un modèle	26
3.2	Représentation schématique de la méthode <i>Black-box</i>	29
3.3	Représentation schématique de la méthode simultanée	30
3.4	Caractéristiques et méthodes de résolution d'un problème d'optimisation	30
3.5	Schéma de résolution de l'algorithme évolutif	34
3.6	Schéma d'un neurone formel	35
3.7	Réseau de neurones à une couche cachée	36
3.8	Système expert d'après Nikolopoulos (1997)	37
4.1	Les cinq étapes de la méthode de Gomez and Probst (1995)	44
4.2	Exemple fictif d'un réseau d'influence et de son calcul	45
4.3	Illustration du signe de la relation entre les facteurs	46
4.4	Définition des zones du graphe d'influence	47
4.5	Réseau simplifié pondéré du système (40 facteurs)	50
4.6	Illustration de la variation des facteurs entre deux calculs	51
4.7	Résultats basés sur les facteurs hydrauliques de la modélisation	55
4.8	Résultats basés sur l'ensemble des 40 facteurs de la modélisation	57
4.9	Résultat secondaire agrégé des mesures par ordre croissant d'importance	62
4.10	Résultat désagrégé pondéré des mesures	64
5.1	Hierarchie des différents modèles de simulation	68
5.2	Bassin versant du Rhône supérieur avec ouvrages d'accumulation et rejets	71
5.3	Gestion heuristique avec le niveau du réservoir constant	73
5.4	Gestion heuristique avec le débit aval constant	74
5.5	Gestion heuristique avec une moyenne mobile calculée sur 5 heures	75
5.6	Gestion heuristique avec un gradient d'une valeur de 8 cm/h	75
5.7	Gestion heuristique avec une amplitude hebdomadaire de 40 cm	76
5.8	Gestion du réservoir avec le modèle heuristique combiné, semaine hivernale	77
5.9	Semaine hivernale type du Rhône valaisan à Branson	78
5.10	Gestion du réservoir avec le modèle optimisé, semaine hivernale	80
5.11	Variation du niveau du réservoir, semaine hivernale type	83
5.12	Variation du niveau du réservoir, semaine estivale type	83

5.13	Probabilité d'occurrence d'une variation du niveau de la rivière aval	84
5.14	117 hydrogrammes de crue générés à Branson (CONSECRU 2)	86
5.15	Volumes débordés à Branson avec une capacité de la rivière de 1'250 m ³ /s	86
5.16	Volumes débordés à Branson avec une capacité de la rivière de 1'600 m ³ /s	87
5.17	Relation de tarage de la section de Branson : état actuel et état futur	88
5.18	Laminage passif (crue de 1520 m ³ /s)	90
5.19	Laminage actif (crue de 1520 m ³ /s)	90
5.20	Laminage actif avec déconnection (crue de 1520 m ³ /s)	92
5.21	Laminage actif avec déconnection et vidange aval (crue de 1520 m ³ /s)	93
5.22	Réduction de la hauteur des digues aval selon la taille de l'aménagement	95
5.23	Section de digue utilisée pour le calcul de la réduction du volume	96
5.24	Courbe volumétrique de l'aménagement	98
5.25	Probabilité d'occurrence annuelle d'une variation donnée dans le réservoir	99
5.26	Situation géographique des étangs, du Rhône et de l'aéroport	108
5.27	Températures simulées et observées, étang de Choulex	109
5.28	Températures simulées et observées, étang de Choulex, dates de mesures	109
5.29	Températures simulées et observées, étang de Pougny, dates de mesures	110
5.30	Températures simulées et observées, Rhône genevois	111
5.31	Températures simulées et observées, Rhône genevois, agrandissement	112
5.32	Températures simulées dans le réservoir avec l'année 1993	113
5.33	Différences de température dans le Rhône aval pour l'année 1993	114
5.34	Différence de températures selon le débit de la digue perméable	114
5.35	Courbe hygrométrique calculée au-dessus du réservoir	115
5.36	Colline des rendements en graphe 2D	118
5.37	Colline des rendements et couples simulés	120
5.38	Colline tronquée du rendement des machines	121
5.39	Sensibilité du rendement global selon surface, hauteur utile et débit équipé	122
5.40	Sensibilité du rendement de la turbine selon le diamètre des machines	123
5.41	Sensibilité du rendement global selon la profondeur d'implantation	124
5.42	Evolution annuelle de la production d'énergie	125
5.43	Evolution calculée de la fréquentation du site au cours de l'été 1993	136
5.44	Lien entre modèle écologique et réduction du marnage, 1999	149
5.45	Lien entre modèle écologique et réduction du marnage, 1999, Rhône élargi	150
6.1	Représentation schématique des cinq parties conceptuelle de l'optimisation	154
6.2	Représentation conceptuelle du projet à buts multiples	155
6.3	Répartition des variables	156
6.4	Gestion et simulation	157
6.5	Attribution de l'ensemble des vecteurs résultat aux outils de simulation	158
6.6	Résultats agrégés de simulation	160
6.7	Organigramme complet du système d'optimisation	162
6.8	Front de Pareto, espace lié aux variables, espace lié aux objectifs	163
6.9	Front de Pareto de l'optimisation partielle, investissement unitaire	168
6.10	Délimitation graphique des solutions synergiques	170
7.1	Coût de l'aménagement énergétique, variante large	179
7.2	Coût unitaire de l'aménagement énergétique, variante large	179
7.3	Coût de l'aménagement de rétention des crues, variante large	180
7.4	Coût unitaire de l'aménagement de rétention des crues, variante large	181
7.5	Bénéfice de l'objectif crue selon le volume, variante large	182

7.6	Coût unitaire de l'aménagement écologique, marnage, variante large	184
7.7	Coût unitaire de l'aménagement écologique, battements, variante large	184
7.8	Coût de l'aménagement de loisirs, variante large	186
7.9	Coût unitaire de l'aménagement de loisirs, variante large	187
7.10	Résultats bruts de l'optimisation globale de la variante large	188
7.11	Résultats synergiques de la variante large pour 1993	189
7.12	Résultats synergiques de la variante large pour 1999	193
7.13	Résultats graphique de la variante large	195
7.14	Résultats graphique de la variante réduite	202
7.15	Site de Riddes dans la plaine valaisanne	205
7.16	Site du réservoir de la variante étudiée de Riddes dans la plaine valaisanne	206
7.17	Casiers d'épanchement du site de Riddes	207
7.18	Coût unitaire de l'aménagement de rétention, variante Riddes	209
7.19	Bénéfice de l'objectif crue selon le volume, variante de Riddes	210
7.20	Résultats graphique de la variante de Riddes	213
8.1	Solutions de compromis, de consensus et de synergie	224

Liste des tableaux

1.1	Grandeurs caractéristiques de l'aménagement <i>standard</i>	9
2.1	Méthode d'identification des acteurs selon Luyet (2005)	16
2.2	Tableau synoptique des méthodes qualitatives d'aide à la décision	23
3.1	Méthodes mathématiques de résolution	31
4.1	Coefficient d'agrégation des influences	48
4.2	Acteurs du système avec leurs principaux intérêts	49
4.3	Facteurs du système répartis dans les six thèmes	49
4.4	Analyse de sensibilité sur l'intensité des relations	52
4.5	Analyse de sensibilité sur l'intensité des relations, facteurs principaux	52
4.6	Analyse de sensibilité sur le choix du modèle de calcul	53
4.7	Analyse de sensibilité sur le choix du modèle de calcul, facteurs principaux	53
4.8	Numéro, nom, type, rayon d'action et définition des mesures	61
5.1	Classement selon les volumes annuels écoulés à Branson (10^6m^3)	68
5.2	Classement selon la courbe des débits classés à Branson (m^3/s)	69
5.3	Classement selon la courbe des niveaux classés à Branson (mm)	69
5.4	Classement selon la température annuelle moyenne hydrique à Sion ($^{\circ}\text{C}$)	69
5.5	Classement selon la température annuelle moyenne aérienne à Sion ($^{\circ}\text{C}$)	70
5.6	Classement des années	70
5.7	Production énergétique et volume de rétention des modèles heuristiques	78
5.8	Production énergétique et volume de rétention des modèles optimisés	81
5.9	Nombre de débordements évités selon volume de rétention et capacité aval	88
5.10	Performance de l'étang de Choulex à Genève	108
5.11	Performance de l'étang de Pougny à Genève	110
5.12	Performance du Rhône genevois	112
5.13	Variation du nombre d'heures de condensation selon F_s	116
5.14	Rendement du multiplicateur en fonction de la charge	119
5.15	Rendement de l'alternateur en fonction de la charge	119
5.16	Caractéristiques optimales des machines hydromécaniques	121
5.17	Subdivision et illustration des différentes valeurs économiques	126
5.18	Facteur de transfert lié aux activités	130
5.19	Données du modèle du coût des transports, Iles de Sion	132
5.20	Principales caractéristiques du restaurant des Iles de Sion	134
5.21	Principales caractéristiques du chiffre d'affaires du restaurant, Iles de Sion	134
5.22	Evolution calculée du chiffre d'affaires du restaurant des Iles de Sion	134
5.23	Comparaison du chiffre d'affaires mesuré et calculé, restaurant Iles de Sion	134
5.24	Fréquentation du site des Iles de Sion	134
5.25	Provenance des visiteurs du site de référence	135
5.26	Provenance des visiteurs du site étudié	135
5.27	Fréquentation du site étudié (calculé, arrondi)	135

5.28	Prix unitaires en CHF	141
5.29	Dimensions de l'aménagement standard	144
5.30	Coûts de l'aménagement standard en 10 ⁶ CHF et en % du coût total	144
5.31	Revenus de l'aménagement standard	145
5.32	Clé de répartition de l'aménagement standard à Riddes	146
6.1	Éléments constitutifs de l'aménagement (c.f. figure 1.6)	155
6.2	Matrice des relations entre les éléments de l'aménagement	156
6.3	Lien entre les objectifs et les résultats de simulation	160
6.4	Lien entre les étapes et les résultats atteints	173
7.1	Liens entre les objectifs et les résultats de simulation	177
7.2	Variables internes et leur domaine admissible, variante large	178
7.3	Résultats de l'optimisation partielle énergétique, variante large	180
7.4	Résultats de l'optimisation partielle de rétention des crues, variante large	182
7.5	Résultats de l'optimisation partielle écologique, variante large, 1993	185
7.6	Résultats de l'optimisation partielle liée aux loisirs, variante large	186
7.7	Résultats des optimisations partielles, variante large	187
7.8	Bornes inférieures et supérieures du filtre des acteurs, variante large	189
7.9	Solutions retenues avec les bornes du tableau 7.8, variante large	190
7.10	Bornes inférieures et supérieures réduites du filtre des acteurs, variante large	190
7.11	Solutions finales avec les bornes du tableau 7.10, variante large	190
7.12	Données géométriques brutes des solutions finales, variante large, 1993	191
7.13	Surfaces et volumes des solutions finales, variante large, 1993	191
7.14	Quantités produites par objectif, variante large, 1993	191
7.15	Paramètres de gestion, variante large, 1993	191
7.16	Résultats de l'optimisation partielle écologique, variante large, 1999	192
7.17	Bornes inférieures et supérieures du filtre des acteurs, variante large, 1999	193
7.18	Données de la solution finale, variante large, 1999	194
7.19	Données de la solution agrégée, variante large	195
7.20	Quantités et investissements potentiels, variante large, 1993 et 1999	196
7.21	Investissements minimaux potentiels retenus et effectifs, variante large	196
7.22	Coûts unitaires optimaux et effectifs, variante large, calculés avec 1993	196
7.23	Variables internes et leur domaine admissible, variante réduite	198
7.24	Résultat de l'optimisation partielle énergétique, variante réduite	199
7.25	Coûts volumiques minimaux pour différentes dimensions de rétention	199
7.26	Résultats de l'optimisation partielle écologique, variante réduite, 1993-1999	200
7.27	Résultats de l'optimisation partielle liée aux loisirs, variante réduite	200
7.28	Bornes inférieures et supérieures du filtre des acteurs, variante réduite	200
7.29	Données géométriques brutes des solutions, variante réduite, 1993	201
7.30	Données géométriques brutes des solutions, variante réduite, 1999	201
7.31	Données de la solution agrégée, variante réduite	202
7.32	Quantités et investissements potentiels, variante réduite, 1993 et 1999	203
7.33	Investissements minimaux potentiels retenus et effectifs, variante réduite	203
7.34	Coûts unitaires optimaux et effectifs, variante réduite, calculés avec 1993	203
7.35	Variables internes et leur espace admissible, variante Riddes	208
7.36	Résultats de l'optimisation partielle énergétique, variante Riddes	208
7.37	Ratios énergétiques de transfert annuel	208
7.38	Prix de revient de l'énergie	208
7.39	Résultats de l'optimisation partielle écologique, variante Riddes, 1993-1999	210

7.40	Ratios sociaux de transfert annuel	211
7.41	Bornes du filtre des acteurs, variante Riddes	211
7.42	Données géométriques brutes des solutions, variante Riddes, 1993	212
7.43	Données géométriques brutes des solutions, variante Riddes, 1999	212
7.44	Données de la solution agrégée, variante Riddes	214
7.45	Quantités et investissements potentiels, variante Riddes, 1993 et 1999	214
7.46	Investissements minimaux potentiels retenus et effectifs, variante Riddes	215
7.47	Coûts unitaires optimaux et effectifs, variante Riddes, calculés avec 1993	215
7.48	Dimensions des solutions retenues	216
7.49	Quantités produites par objectif pour les solutions retenues	217
7.50	Coût par objectif et coût total pour les solutions retenues	217
7.51	Coût moyen par objectif et en pourcentage du coût total	218

Notations

Les symboles ci-dessous sont utilisés dans ce document:

Symboles romains

A	Coefficient d'atténuation
a	Unité temporelle (an)
A_s	Surface sur laquelle le flux surfacique agit (m^2)
$Activité_{AD}$	Activité du facteur A sur les facteurs B, C et D
Age_i	Variable polytomique qui exprime l'âge de l'individu
Am	Amplitude de variation admissible du niveau d'eau de la rivière aval (m)
$AMPL$	Acronyme pour A Modeling Language for Mathematical Programming
C	Chaleur massique de l'eau ; $C = 4180$ (J/K/kg)
c_1	Coefficient de Bowen ($mm\ Hg/^\circ C$)
C_i	Investissement à charge de l'objectif i (CHF)
$C_{em,tot}$	Coût total des installations électro-mécaniques (CHF)
$C_{em,US}$	Coût unitaire des installations électro-mécaniques en dollars ($USD74/kW_l$)
C_{em}	Coût unitaire des installations électro-mécaniques (CHF/kW_l)
$C_{prof,i}$	Variable polytomique qui caractérise la catégorie professionnelle de l'individu
C_{sed}	Chaleur massique des sédiments (J/kg/K)
C_{tot}	Coût d'investissement total nécessaire pour la construction de l'aménagement (CHF)
CT_i	Coût du transport (CHF/km)
D	Diamètre de la turbine (m)
D_{act}	Durée considérée pour l'actualisation des revenus (an)
D_{constr}	Durée de construction de l'aménagement (an)
D_{opt}	Diamètre optimal de la turbine (m)
$Dist_i$	Distance parcourue entre le lieu d'origine et le lieu de loisir (km)
DS	Différence de section de digue aval (m^2)
dt	Incrément temporel (s)
E_{el}	Production annuelle d'électricité (GWh/an)
F_j	Fréquentation journalière du site ($Nb_{visite}/jour$)
F_s	Facteur de sécurité pour la formation de brouillard
$F_{étu}$	Facteur multiplicatif lié aux coûts des études
F_{fin}	Facteur multiplicatif lié aux coûts financiers
F_{GC}	Facteur multiplicatif lié aux études de génie civil
F_{impact}	Facteur multiplicatif lié aux études d'impact
$F_{imprevus}$	Facteur multiplicatif lié aux imprévus
Fr_{tot}	Fréquentation sociale annuelle totale, identique à V_{cal} (Visites/an)

g	Accélération terrestre (m/s^2)
G_{bat}	Poids de la vanne batardeau (kN)
G_{seg}	Poids de la vanne segment (kN)
H	Energie calorifique contenue dans l'eau (Joule)
H_1	Hauteur de digue aval sans rétention (m)
H_2	Hauteur de digue aval avec rétention (m)
H_b	Pression barométrique (m.c.e.)
H_n	Hauteur de chute nette (m.c.e.)
H_s	Contre-pression aval mesurée à l'axe de la turbine (m.c.e.)
H_v	Tension vapeur (m.c.e.)
h_v	Hauteur de vanne (m)
H_{air}	Taux de saturation de l'air calculé avec l'impact du réservoir (%)
h_{av}	Niveau d'eau dans la rivière aval (m)
h_{max}	Niveau maximal admissible dans la rivière aval pour la période considérée (m)
h_{min}	Niveau minimal admissible dans la rivière aval pour la période considérée (m)
h_{moy}	Niveau moyen dans la rivière aval pour la période considérée (m)
$H_{res,cible}$	Niveau d'eau cible dans le réservoir (m)
$H_{res,max}$	Niveau d'eau maximal admissible dans le réservoir (m)
$H_{res,min}$	Niveau d'eau minimal admissible dans le réservoir (m)
H_{res}	Niveau d'eau dans le réservoir (m)
I_i	Investissement unitaire optimal minimal de l'objectif i ; unité dépendante de l'objectif i
I_{AB}	Intensité qualitative de la relation entre les facteurs A et B
I_{av}	Indicateur de marnage aval utilisé pour l'optimisation (m)
I_{BC}	Intensité qualitative de la relation entre les facteurs B et C
I_{CD}	Intensité qualitative de la relation entre les facteurs C et D
I_{pot}	Investissement potentiel réalisable en fonction des produits délivrés pour chaque objectif (CHF)
I_{res}	Indicateur de battements dans le réservoir utilisé pour l'optimisation, indicateur identique au marnage aval (m)
I_{syn}	Indicateur synergique d'un aménagement donné
Ind_{ber}	Augmentation de surface utilisable pour l'habitat de la guildes berge (ha)
Ind_{cou}	Augmentation de surface utilisable pour l'habitat de la guildes cours principal (centre du cours d'eau) (ha)
$Ind_{eco,av}$	Index agrégé de l'amélioration de l'état écologique du cours d'eau aval (%)
Ind_{EPT}	Augmentation de la richesse des macro-invertébrés en particuliers des Ephéméroptères, des Plécoptères et des Tricoptères (%)
Ind_{mou}	Augmentation de surface utilisable pour l'habitat de la guildes mouille (ha)
Ind_{rad}	Augmentation de surface utilisable pour l'habitat de la guildes radier (ha)
$Ind_{t,ad}$	Augmentation de surface utilisable pour l'habitat de la truite adulte (ha)
$Ind_{t,juv}$	Augmentation de surface utilisable pour l'habitat de la truite juvénile (ha)
J_{an}	Flux surfacique lié à la radiation de l'atmosphère sur le volume de contrôle (W/m^2)
J_{br}	Flux surfacique lié à la radiation du volume de contrôle dans l'atmosphère (W/m^2)

J_{cc}	Flux surfacique lié à la convection et à la conduction du volume de contrôle dans l'atmosphère (W/m^2)
J_e	Flux surfacique lié à l'évaporation du volume de contrôle dans l'atmosphère (W/m^2)
J_{sed}	Flux surfacique lié à l'impact du sol sur le volume de contrôle (W/m^2)
J_{sol}	Flux surfacique lié à la radiation directe du soleil sur le volume de contrôle (W/m^2)
J_{tot}	Flux énergétique surfacique du volume considéré (W/m^2)
k	Durée horaire pour le calcul du débit aval moyen (h)
k_{sed}	Coefficient de diffusion des sédiments (m^2/s)
L_v	Chaleur latente de l'eau (J/kg)
m	Pente transversale de la digue aval, rive mouillée
$M_{air,sec}$	Masse d'air sec contenue dans le volume d'air (kg/m^3)
$M_{eau,sat}$	Masse d'eau maximale contenue dans le volume d'air au point de saturation (g/m^3)
M_{eau}	Masse d'eau contenue dans le volume d'air (g/m^3)
M_{evap}	Quantité d'eau évaporée au dessus du plan d'eau (m^3/h)
$M_{mol,air}$	Masse molaire moyenne de l'air (g/mol)
$M_{mol,vap}$	Masse molaire de l'eau (g/mol)
max_c	Valeur maximale trouvée dans l'échantillon du coût des transports
max_v	Valeur maximale trouvée dans l'échantillon du nombre annuel de visites
$Meteo_i$	Variable polytomique qui caractérise la météo lors de la visite de l'individu i
n	Pente transversale de la digue aval, rive sèche
n_t	Vitesse de rotation de la turbine (t/min)
n_{opt}	Vitesse optimale de la turbine (1/min)
NV_i	Nombre annuel de visites de l'individu i
$Occu_i$	Nombre d'occupants dans le véhicule
$OFEV$	Office fédéral de l'environnement, dans le département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, Suisse
P	Pression atmosphérique ou totale (mm Hg)
P_0	Pression vapeur de référence (K)
P_{calage}	Paramètre de calage du modèle
P_{el}	Puissance électrique instantanée (MW)
P_{sat}	Pression vapeur saturante (mm Hg)
P_{vap}	Pression vapeur de l'air (mm Hg)
P_{vente}	Prix de vente de la production énergétique (CHF/MWh)
P_{visite}	Prix attribué à la visite de l'aménagement (CHF)
$PACEV_s$	Acronyme pour Potentiel d'Amélioration des Cours d'Eau Valaisans
Pr_i	Quantité produite pour l'objectif i ; unité dépendante de l'objectif i
Q_e	Débit entrant dans le volume considéré (m^3/s)
Q_s	Débit sortant du volume considéré (m^3/s)
Q_T	Débit de la rivière qui peut être turbiné (m^3/s)
Q_t	Débit turbiné par la machine (m^3/s)
Q_{am}	Débit dans la rivière à l'amont de l'aménagement (m^3/s)
Q_{av}	Débit dans la rivière à l'aval de l'aménagement (m^3/s)

Q_{dim}	Débit nominal de chaque groupe (m^3/s)
Q_{nappe}	Débit issu de la nape dans le réservoir (m^3/s)
Q_{perm}	Débit de la digue perméable (m^3/s)
$Q_{t,1}$	Débit turbiné du groupe 1 (m^3/s)
$Q_{t,2}$	Débit turbiné du groupe 2 (m^3/s)
$QMOO$	Acronyme pour <i>Queueing Multi-Objective Optimiser</i> traduit en français par <i>algorithme d'optimisation multi-objectif avec des solutions rangées</i>
R	Constante des gaz parfait (J/K/mol)
r	Rapport de mélange d'un volume d'air
R/Etu_i	Variable polytomique qui caractérise les individus retraités ou étudiants
R_A	Valeur actualisée des revenus (CHF)
R_L	Coefficient de réflexion atmosphérique
R_T	Ratio temporel entre le salaire horaire et le coût d'opportunité
R_t	Revenu de l'année t (CHF)
r_{sat}	Rapport de mélange lorsque la pression vapeur est saturante
S_{perp}	Section perpendiculaire à l'écoulement de la nappe phréatique (m^2)
Sal_i	Salaire horaire de l'individu i (CHF/h)
$Sexe_i$	Variable polytomique qui caractérise le sexe de l'individu i
Sm	Somme issue du produit du vecteur multiplicatif optimisé et des variables explicatives moyennes
$STEP$	Acronyme pour Station d'épuration
t	Unité temporelle (h)
T_0	Température d'ébullition de la pression vapeur de référence P_0 ($^{\circ}C$)
T_e	Température du débit entrant dans le volume considéré ($^{\circ}C$)
T_{act}	Taux considéré pour l'actualisation des revenus (%)
T_{air}	Température de l'air ($^{\circ}C$)
T_{av}	Température de la rivière aval ($^{\circ}C$)
T_{infl}	Taux d'inflation
T_{int}	Taux d'intérêt intercalaire
T_{res}	Température de l'eau dans le réservoir ($^{\circ}K$)
T_{sed}	Température des sédiments ($^{\circ}C$)
$T_{tr,i}$	Temps, augmenté de 12 minutes, nécessaire au trajet (h)
u_v	Vitesse du vent au-dessus du plan d'eau (m/s)
V_t	Vecteur multiplicatif des variables explicatives du modèle de loisirs
V_{calc}	Nombre annuel calculé de visites
V_{disp}	Volume disponible pour le laminage des crues (m^3)
V_{el}	Produit de la vente d'énergie (CHF)
V_{evap}	Volume d'air dans lequel la quantité d'eau évaporée au-dessus du plan d'eau est répartie (m^3)
V_{mes}	Nombre annuel mesuré de visites
V_{res}	Volume du réservoir (m^3)
Val_{moy}	Valeur de l'aménagement pour l'individu moyen de l'échantillon
Var	Variables explicatives du modèle de calcul de la valeur sociale
W	Largeur de la vanne (m)

$X_{\text{état}}$	Variabes d'état du modèle
$X_{\text{entrée}}$	Variabes d'entrée du modèle
Y_{sortie}	Variabes de sortie du modèle
z_{sed}	Epaisseur des sédiments dans laquelle s'établit le gradient thermique (m)

Symboles grecs

α_{GP}	Coefficient de pondération pour les relations directes
β_{GP}	Coefficient de pondération pour les relations indirectes 1 ^{ier} ordre
ΔC_{crue}	Réduction du coût lié à la protection contre les crues (10^6 CHF)
Δh	Variation admissible du niveau dans la rivière aval entre deux heures successives (cm/h)
ΔM_{eau}	Masse d'eau additionnelle (g/m^3)
η	Rendement énergétique global de l'aménagement
γ_{GP}	Coefficient de pondération pour les relations indirectes 2 ^{ème} ordre
λ_{sed}	Conductivité thermique des sédiments ($\text{W}/\text{m}/\text{K}$)
ϕ	Nombre adimensionnel lié au débit
ψ	Nombre adimensionnel lié à l'énergie
ρ	Masse volumique de l'eau (kg/m^3)
ρ_{sed}	Masse volumique des sédiments (kg/m^3)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ; $\sigma = 5.6703 \cdot 10^{-8}$ ($\text{W}/\text{m}^2/\text{K}^4$)
σ_{cav}	Nombre de cavitation
ε	Emissivité de l'eau
φ_{air}	Humidité relative de l'air ($\%$)

Bibliographie

- Abrishamchi, A., Ebrahimian, A., Tajrishi, M. and Marino, M. (2005). Case Study : Application of Multicriteria Decision Making to Urban Water Supply, *Journal of Water Resources Planning and Management* **131**(4) : 326–335.
- Andreu, J., Capilla, J. and Sanchis, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management, *Journal of Hydrology* **177** : 269–291.
- Antenucci, J. and Imerito, A. (2000). The CWR Dynamic Reservoir Simulation Model, DYRESM, User Manual, *Technical report*, Center for Water Research, The University of Western Australia.
- Arakawa, M., Yamakawa, H. and Ishikawa, H. (2003). Robust Design Using Fuzzy Numbers with Intermediate Variables, *AIT - CU Workshop 2003*, Asian Institute of Technology Conference Center, Thailand.
- Atkinson, G. (2004). Common ground for institutional economics and system dynamics modeling, *System Dynamics Review* **20** : 275–286.
- Auderset-Joye, D. (1993). *Contribution à l'écologie des Characées de Suisse*, PhD thesis, N° 2580, Laboratoire d'écologie et de biologie aquatique, Université de Genève, Switzerland.
- Banville, C., Landry, M., Martel, J.-M. and Boulaire, C. (1998). A stakeholder approach to MCDA, *System Research and Behavioral Science* **15**(1) : 15–32.
- Baran, B., von Lüken, C. and Sotelo, A. (2005). Multi-objective pump scheduling optimisation using evolutionary strategies, *Engineering Software* **36** : 39–47.
- Baranzini, A. and Rochette, D. (2006). La demande de récréation pour un parc naturel. Une application au bois de Pfyn-Finges, Suisse, *Cahier de recherche : N° HES-SO/HEG-GE/C-06/1/1-CH* pp. 1–12.
- Bartholow, J. (2002). Stream Segment Temperature Model (SSTEMP), Version 2.0, *Technical report*, U.S. Geological Survey, Science Center.
- Belkhouche, B., Demtchouk, I. and Steinberg, L. J. (1999). Design of Object-Oriented Water Quality Software System, *Journal of Water Resources Planning and Management* **125**(5) : 289–296.
- Bellman, R. E. (1957). *Dynamic programming*, Princeton University Press, Princeton, N.J., USA.
- Bellman, R. E. and Dreyfus, S. (1962). *Applied dynamic programming*, Princeton University Press, Princeton, N.J., USA.

- Birol, E., Karousakis, K. and Koundouri, P. (2006). Using economic valuation techniques to inform water resources management : A survey and critical appraisal of available techniques and an application, *Science of the Total Environment* **365** : 105–122.
- Bollaert, E., Irniger, P. and Schleiss, A. (2000). Management of sedimentation in a multiple reservoir in a run-of-river powerplant project on an Alpine river, *Proc. HYDRO 2000*, Vol. Session III : Sediment Management, Bern, Switzerland, pp. 183–192.
- Bousquet, S., Gaume, E. and Lancelot, B. (2003). Evaluation des enjeux socio-économiques liés aux étiages de la Seine, *La Houille Blanche* **3** : 145–149.
- Box, G. E. and Draper, N. R. (1987). *Empirical Model-Building and Response Surfaces*, Wiley, USA.
- Boyd, M. and Kasper, B. (2004). Analytical Methods for Dynamic Open Channel Heat and Mass Transfer, methodology for the Heat Source Model, Version 7.0, *Technical Report*, Oregon Department of Environmental Quality, USA.
- Braden, J. B. and Johnston, D. M. (2004). Downstream Economic Benefits from Storm-Water Management, *Journal of Water Resources Planning and Management* **130**(6) : 498–505.
- Brady, D., Graves, W. L. and Geyer, J. C. (1969). Surface heat exchange at power cooling lakes, *Technical Report 5*, Edison Electric Inst. Publication N° 69-901.
- Brainard, J. S., Lovett, A. A. and Bateman, I. J. (1997). Using isochrone surfaces in travel-cost model, *Journal of Transport Geography* **5**(2) : 117–126.
- Brans, J.-P. and Vincke, P. (1985). A preference ranking organization method : The PROMETHEE method for multiple criteria decision-making, *Management science* **31**(6) : 647–656.
- Buchecker, M., Hunziker, M. and Kienast, F. (2003). Participatory landscape development : overcoming social barriers to public involvement, *Landscape and Urban Planning* **64** : 29–46.
- Buchli, L., Filippini, M. and Banfi, S. (2003). Estimating the benefits of low flow alleviation in rivers : the case of the Ticino River, *Applied Economics* **35** : 585–590.
- Burger, A., Recordon, E., Bovet, D., Cotton, L. and Saugy, B. (1985). *Thermique des nappes souterraines*, PPUR, Switzerland.
- Cai, X., Lasdon, L. S. and Michelsen, A. M. (2004). Group Decision Making in Water Resources Planning Using Multiple Objective Analysis, *Journal of Water Resources Planning and Management* **130**(1) : 4–14.
- Cai, X., McKinney, D. C. and Lasdon, L. S. (2003). Integrated Hydrologic-Agronomic-Economic Model for River Basin Management, *Journal of Water Resources Planning and Management* **129**(1) : 4–17.
- Cardwell, H., Jager, H. I. and Sale, M. J. (1996). Designing Instream Flows to Satisfy Fish and Human Water Needs, *Journal of Water Resources Planning and Management* **122**(5) : 356–363.
- CEVAP (2005). Rapport d'Assainissement, Drance de Bagnes, Rapport provisoire, *Technical Report (unpublished)*, SFH, Canton du Valais, Switzerland.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface Water Quality Modeling*, McGraw-Hill, New York.

- Chapuis, L. (1990). Statistique de dimensionnement des bulbes, *Technical Report (unpublished)*, Voest Alpine GmbH, VATECH Hydro, Switzerland.
- Charnes, A., Cooper, W. and Ferguson, R. (1955). Optimal estimation of executive compensation by linear programming, *Management science* **1**(1) : 138–151.
- Chen, Q. and Mynett, A. E. (2004). A robust fuzzy logic approach to modelling algae biomass, *Journal of Hydraulic Research* **42**(3) : 303–309.
- Clawson, M. and Knetsch, J. L. (1966). *Economics of outdoor recreation*, Johns Hopkins University Press, USA.
- Coulibaly, P., Haché, M., Fortin, V. and Bobée, B. (2005). Improving Daily Reservoir Inflow Forecasts with Model Combination, *Journal of Hydraulic Engineering* **10**(2) : 91–99.
- Cox, M. and Bolte, J. (2007). A spatially explicit network-based model for estimating stream temperature distribution, *Environmental Modelling and Software* **22** : 502–514.
- Coyle, G. (2000). Qualitative and quantitative modelling in system dynamics : some research questions, *System Dynamics Review* **16**(3) : 225–244.
- Crossman, N. D., Perry, L. M., Bryan, B. A. and Ostendorf, B. (2007). CREDOS : A Conservation Reserve Evaluation And Design Optimisation System, *Environmental Modelling and Software* **22** : 449–463.
- Cui, L. (2005). Multiobjective optimization for water supply system management, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management* pp. 1345–1350.
- Daniels, S. E., Lawrence, R. L. and Alig, R. J. (1996). Decision making and ecosystem based management : applying the Vroom Yetton model to public participation strategy, *Environmental Impact Assessment Review* **16** : 13–30.
- Dantzig, G. B. (2002). Linear programming (Reprinted), *Operations research* **50**(1) : 42–47.
- Das, A. and Datta, B. (1999). Development of Multiobjective Management Models for Coastal Aquifers, *Journal of Water Resources Planning and Management* **125**(2) : 76–87.
- De Cesare, G., Boillat, J.-L. and Schleiss, A. J. (2006). Circulation in Stratified Lakes due to Flood-Induced Turbidity Currents, *Journal of Environmental Engineering* **132**(11) : 1508–1517.
- Delbecq, A. L., van de Ven, A. H. and Gustafson, D. H. (1975). *Group Techniques for Program Planning : A Guide to Nominal Group and Delphi Processes*, Scott, Foresman.
- Délétroz, N. and Chevrier, P. (2006). Tourisme et dangers naturels ; Inventaire des activités aquarécréatives, *Technical Report (unpublished)*, Bureau Drosera SA et Institut Economie et Tourisme HEVs, Switzerland.
- Demny, G., Homann, C., Shoemaker, C. and Köngeter, J. (2003). Automatic optimization of hydraulic structures, *XXX IAHR Congress*, Vol. D, Thessaloniki , Greece, pp. 559–566.
- Devi, S., Srivastava, D. K. and Mohan, C. (2005). Optimal Water Allocation for the Transboundary Subernarekha River, India, *Journal of Water Resources Planning and Management* **131**(4) : 253–269.
- Dias, J. and Lopes, J. (2006). Implementation and assessment of hydrodynamic, salt and heat transport models : The cas of Ria de Aveiro Lagoon (Portugal), *Environmental Modelling and Software* **21** : 1–15.

- Dölling, O. R. and Varas, E. A. (2005). Decision support model for operation of multi-purpose water resources systems, *Journal of Hydraulic Research* **43**(2) : 115–124.
- Doyle, J. K. (1997). The cognitive psychology of systems thinking, *System Dynamics Review* **13**(3) : 253–265.
- Draper, A. J., Munévar, A., Arora, S. K., Reyes, E., Parker, N. L., Chung, F. I. and Peterson, L. E. (2004). CalSim : Generalized Model for Reservoir System Analysis, *Journal of Water Resources Planning and Management* **130**(6) : 480–489.
- DTEE (2000). 3e Correction du Rhône, Sécurité pour le futur, Rapport de synthèse, *Technical Report* , Etat du Valais - Département des transports, de l'équipement et de l'environnement, Switzerland.
- Dubois, J. (2005). Simulation des systèmes hydrauliques et hydrologiques complexes : Routing System II, *Wasser-Energie-Luft* **97**(6) : 338–344.
- Duggan, E. W. and Thachenkary, C. S. (2004). Integrating nominal group technique and joint application development for improved systems requirements determination, *Information and management* **41** : 399–411.
- Duram, L. A. and Brown, K. G. (1999). Assessing public participation in US watershed planning initiatives, *Society and Natural Resources* **12** : 455–467.
- Erbiste, P. (1984). Estimating gate weights, *Water Power and Dam Construction* **36** : 18–23.
- Eschenbach, E. A., Magee, T., Zagona, E., Goranflo, M. and Shane, R. (2001). Goal Programming Decision Support System for Multiobjective Operation of Reservoir Systems, *Journal of Water Resources Planning and Management* **127**(2) : 108–120.
- EuroDicauTom (1982). Definition de la dynamique des systèmes, <http://ec.europa.eu/eurodicautom> .
- EuroDicauTom (1990). Définition de la Synergie, <http://ec.europa.eu/eurodicautom> .
- Favrat, D. and Maréchal, F. (2002). Modélisation et optimisation des systèmes énergétiques industriels, Cours Postgrade en génie Electrique, EPFL, Switzerland.
- Feather, P. and Shaw, W. D. (1999). Estimating the Cost of Leisure Time for Recreation Demand Models, *Journal of Environmental Economics and management* **38**(1) : 49–65.
- Ferber, J. (1997). *Les systèmes multi-agents, Vers une intelligence collective*, intereditions edn, Paris, France.
- Filion, Y., Karney, B. and Adams, B. (2005). Multiobjective design of water networks with random loads, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management* pp. 1319–1324.
- Filliez, J. (2006). Etude de faisabilité d'un barrage sur le Rhône valaisan, Travail pratique de Master, Faculté ENAC, EPFL, Switzerland.
- Flug, M., Seitz, H. L. H. and Scott, J. F. (2000). Multicriteria Decision Analysis Applied to Glen Canyon Dam, *Journal of Water Resources Planning and Management* **126**(5) : 270–276.
- Fontane, D. G., Gates, T. K. and Moncada, E. (1997). Planning Reservoir Operations with Imprecise Objectives, *Journal of Water Resources Planning and Management* **123**(3) : 154–162.

- Forrester, J. W. (2003). Dynamic models of economic systems and industrial organisations, *System Dynamics Review* **19**(4) : 331–345.
- Fourer, R., Gay, D. M. and Kernighan, B. W. (2003). *AMPL : A Modeling Language for Mathematical Programming*, Duxbury Press, Brooks/Cole Publishing Company, USA.
- Gabriel, S. A., Kumar, S., Ordonez, J. and Nasserian, A. (2006). A multiobjective optimization model for project selection with probabilistic considerations, *Socio-Economic Planning Sciences* **40** : 297–313.
- Gabrys, B. and Bargiela, A. (1999). Neural Networks Based Decision Support in Presence of Uncertainties, *Journal of Water Resources Planning and Management* **125**(5) : 272–280.
- Goldberg, D. and Kuo, C. (1987). Genetic algorithm in pipeline optimization, *Journal of Computing in Civil Engineering* **1**(2) : 128–141.
- Gomez, P. and Probst, G. (1995). *Die Praxis des ganzheitlichen Problemlösens*, deutsche bibliothek edn, Paul Haupt, Bern, Switzerland.
- Gooseff, M. N., Strzepek, K. and Chapra, S. C. (2005). Modeling the potential effects of climate change on water temperature downstream of a shallow reservoir, Lower Madison River, Mt, *Climatic Change* **68**(3) : 331–353.
- Gordon, T. J. (1994). The Delphi Method, Futures Research Methodology, *Technical Report* , AC/UNU Millennium Project.
- Grelot, F., Guillaume, B. and Gendreau, N. (2003). Evaluations économiques de la réduction du risque d'inondation, *La Houille Blanche* **3** : 96–101.
- Griffin, C. (1999). Watershed councils : an emerging form of public participation in natural resource management, *Journal of the American Water Resources Association* **35**(3) : 505–518.
- Halleraker, J. H., Saltveit, S. J., Harby, A., Arnekleiv, J. V., Fjeldstad, H.-P. and Kohler, B. (2003). Factors influencing stranding of wild juvenile brown trout (*salmo trutta*) during rapid and frequent flow decreases in an artificial stream, *River Resources Application* **19** : 589–603.
- Heller, P. (2006). Potentiel d'Assainissement des Cours d'Eau Valaisans, logiciel PACEVs, Outil méthodologique, *Technical Report 18/05 (unpublished)*, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, ENAC - EPFL, Switzerland.
- Heller, P., Bollaert, E. and Schleiss, A. J. (2005). Optimal reservoir use of a multipurpose run-of-river powerplant for hydropeaking mitigation, *Hydro2005- Policy into practice*, Vol. sess. 7, Hydropower and Dams, Villach, Austria, pp. 1–8.
- Heller, P., Bollaert, E., Schleiss, A. J., Pellaud, M. and Schlaepfer, R. (2006). Multi-purpose shallow reservoir : Synergies between ecology and energy production, *River Flow*, Vol. 2, Taylor and Francis Group, Lisbon, Portugal, pp. 2027–2035.
- Heller, P., Civier, H. and Pellaud, M. (2004). Projet Synergie, 1er rapport annuel 2004, Période du 1 février au 31 décembre 2004, *Technical Report (unpublished)*, LCH - EPFL, Switzerland.
- Heller, P., Schleiss, A. J. and Bollaert, E. (2005). Potential synergies of multipurpose run-of-river hydroelectric powerplants, *XXXI IAHR Congress*, Vol. 2, Seoul, Korea, pp. 2121–2130.

- Hill, M. J., Braaten, R., Veitch, S. M., Lees, B. G. and Sharma, S. (2005). Multi-criteria decision analysis in spatial decision support : the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis, *Environmental Modelling and Software* **20** : 955–976.
- Hingray, B., Mezghani, A., Schaeffli, B., Niggli, M., Faivre, G., Guex, F., Hamdi, Y. and Musy, A. (2006). Estimation des débits de crue du Rhône à porte du Scex et autres points amont caractéristiques, Rapport CONSECRU 2, *Technical Report* , HYDRAM, EPFL, Switzerland.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, University of Michigan Press, Michigan, USA.
- Hopkins, O. S., Lauria, D. T. and Kolb, A. (2004). Demand-Based Planning of Rural Water Systems in Developing Countries, *Journal of Water Resources Planning and Management* **130**(1) : 44–52.
- Hotelling, H. (1931). The economics of exhaustible resources, *Journal of Political Economy* **39**(2) : 137–175.
- Hyde, K. M., Maier, H. R. and Colby, C. B. (2004). Reliability-Based Approach to Multicriteria Decision Analysis for Water Resources, *Journal of Water Resources Planning and Management* **130**(6) : 429–438.
- Hynes, S., Hanley, N. and O’Donoghue, C. (2005). Measuring the opportunity cost of time in recreation demand modelling : An application to whitewater kayaking in Ireland, (*unpublished*), University of Stirling, UK.
- Irniger, P. (2000). Aménagement à buts multiples sur le Rhône, Travail pratique de Diplôme, Faculté ENAC, EPFL, Switzerland.
- Johnson, V. M. and Rogers, L. L. (2000). Accuracy of Neural Network Approximators in Simulation-Optimization, *Journal of Water Resources Planning and Management* **126**(2) : 48–56.
- Joliot, P. (2001). *La recherche passionnément*, Odile Jacob, Paris, France.
- Jones, C. A. (2000). Economic Valuation of Resource Injuries in Natural Resource Liability Suits, *Journal of Water Resources Planning and Management* **126**(6) : 358–365.
- Jordan, F. (2007). *Modèle de prévision et de gestion des crues, Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue*, PhD thesis, N° 3711, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, Switzerland.
- Kapoor, I. (2001). Towards participatory environmental management ?, *Journal of Environmental Management* **63**(3) : 269–279.
- Kim, K. and Chapra, S. C. (1997). Temperature model for highly transient shallow streams, *Journal of Hydraulic Engineering* **123**(1) : 30–40.
- King, O. H. (1995). Estimating the value of marine resources : a marine recreation case, *Ocean and Coastal Management* **27**(1) : 129–141.
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. and Vecchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing, *Science* **220**(4598) : 671–680.
- Knoepfel, P., Larrue, C. and Varone, F. (2001). *Analyse et pilotage des politiques publiques*, Helbing et Lichtenhahn, Bâle, Switzerland.

- Labadie, J. W. (2004). Optimal Operation of Multireservoir Systems : State-of-the-Art Review, *Journal of Water Resources Planning and Management* **130**(2) : 93–111.
- Lancaster, K. J. (1966). A new approach to consumer theory, *Journal of Political Economy* **74**(2) : 132–157.
- Land, A. H. and Doig, A. G. (1960). An Automatic Method for Solving Discrete Programming Problems, *Econometrica* **28**(3) : 497–520.
- Landeta, J. (2006). Current validity of the Delphi method in social sciences, *Technological Forecasting and Social Change* **73** : 467–482.
- Lanini, S., Courtois, N., Giraud, F., Petit, V. and Rinaudo, J. (2004). Socio-hydrosystem modelling for integrated water-resources management - the Hérault catchment case study, southern France, *Environmental Modelling and Software* **19** : 1011–1019.
- Larousse (1994). *Dictionnaire Le Petit Larousse Illustré*, Larousse, Paris, France.
- Leach, W. D. and Pelkey, N. W. (2001). Making Watershed Partnerships Work : A Review of The Empirical Literature, *Journal of Water Resources Planning and Management* **127**(6) : 378–385.
- Leyland, G. (2002). *Multi-objective optimisation applied to industrial energy problems*, PhD thesis, N° 2572, Laboratoire d'énergétique industrielle, EPFL, Switzerland.
- Liu, A., Collins, A. and Yao, S. (1998). A Multi-Objective and Multi-Design Evaluation Procedure for Environmental Protection Forestry, *Environmental and Resource Economics* **12** : 225–240.
- Loomis, J. B. (2000). Environmental Valuation Techniques in Water Resource Decision Making, *Journal of Water Resources Planning and Management* **126**(6) : 339–344.
- Loomis, J. B. and Feldman, M. (2003). Estimating the benefits of maintaining adequate lake levels to homeowners using the hedonic property method, *Water Resources Research* **39**(9) : Article N° 1259.
- Luna-Reyes, L. F. and Andersen, D. L. (2003). Collecting and analyzing qualitative data for system dynamics : methods and models, *System Dynamics Review* **19**(4) : 271–296.
- Lund, J. R. (2005). Discussion and Closure of "Optimal Operation of Multireservoir Systems : State-of-the-Art Review" by John W. Labadie, *Journal of Water Resources Planning and Management* **131**(5) : 406–408.
- Lund, J. R. and Ferreira, I. (1996). Operating Rule Optimization for Missouri River Reservoir System, *Journal of Water Resources Planning and Management* **122**(4) : 287–295.
- Luyet, G. (2006). Informations sur le fonctionnement du restaurant des Iles de Sion (communication personnelle), Valais, Switzerland.
- Luyet, V. (2005). *Bases méthodologiques de la participation lors de projets ayant des impacts sur le paysage. Cas d'application : la plaine du Rhône valaisanne*, PhD thesis, N° 3342, Laboratoire de Gestion des Ecosystèmes, EPFL, Switzerland.
- Maani, K. E. and Maharaj, V. (2004). Links between systems thinking and complex decision making, *System Dynamics Review* **20**(1) : 21–48.

- Mahmoud, M. R. and Garcia, L. A. (2000). Comparison of different multicriteria evaluation methods for the Red Bluff diversion dam, *Environmental Modelling and Software* **15** : 471–478.
- Marino, M. A. and Simonovic, S. P. (1981). Single multipurpose reservoir design : a modified optimal control by chance-constrained programming, *Journal of Advanced Water Resources* **4** : 43–48.
- Martino, J. P. (1993). *Technological Forecasting for Decisionmaking*, third edn, McGraw-Hill, USA.
- Mason, R. and Mitroff, I. (1981). *Challenging Strategic Planning Assumptions*, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Matthies, M., Berlekamp, J., Lautenbach, S., Graf, N. and Reimer, S. (2003). Decision Support System for the Elbe River Water Quality Management, *ModSim 2003*, Modelling and Simulation Society of Australia and New-Zealand, Townsville, Queensland, Australia.
- Maystre, L., Pictet, J. and Simos, J. (1994). *Méthodes multicritères ELECTRE : description, conseils pratiques et cas d'application à la gestion environnementale*, Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland.
- Meier, W. (2002). *Modellierung der Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf physikalische und chemische Eigenschaften von Bergbächen*, PhD thesis, N° 14'526, ETHZ, Switzerland.
- Meile, T., Schleiss, A. and Boillat, J.-L. (2005). Entwicklung des Abflussregimes der Rhone seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts, *Wasser-Energie-Luft* **97**(5/6) : 133–142.
- Mena, S. B. (2000). Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision, *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* **4**(2) : 83–93.
- Metropolis, N. C., Rosenbluth, A. W., Rosenbluth, M. N., Teller, A. H. and Teller, E. (1953). Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, *Journal of Chemical Physics* **21**(6) : 1087–1092.
- Molyneaux, A. (2002). *A practical evolutionary method for the multi-objective optimisation of complex integrated energy systems including vehicle drivetrains*, PhD thesis, N° 2636, Laboratoire d'énergie industrielle, EPFL, Switzerland.
- Murphy, L. and Simpson, A. (1992). Pipe optimisation using genetic algorithms, *Technical Report R93*, Departement of Civil Engineering, University of Adelaide, Australia.
- Netto, O. C., Parent, E. and Duckstein, L. (1996). Multicriterion Design of Long-Term Water Supply in Southern France, *Journal of Water Resources Planning and Management* **122**(6) : 403–413.
- Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, Trinity College of Cambridge, London, UK.
- Nikolopoulos, C. (1997). *Expert systems*, marcel dekker inc. edn, Basel, Switzerland.
- Ohkubo, S. and Dissanayake, P. (1999). An Intelligent Multicriteria Fuzzy Optimum Design Method for Large-Scale Structural Systems, *International Journal of Numerical Methods in Engineering* **45** : 195–214.
- Oliveira, R. and Loucks, D. P. (1997). Operating rules for multireservoir systems, *Journal of Water Resources Research* **33**(4) : 839–852.

- Olsen, N. R. (2005). A three-dimensional numerical model for simulation of sediment movements in water intakes with multiblock option, *Technical report*, Dept. of Hydraulic and environmental engineering, The norwegian university of science and technology, Norway.
- Owen, W. J., Gates, T. K. and Flug, M. (1997). Variability in Perceived Satisfaction of Reservoir Management Objectives, *Journal of Water Resources Planning and Management* **123**(3) : 147–153.
- Pareto, V. (1896). *Cours d'économie politique*, Vol. I and II, F. Rouge, Lausanne, Switzerland.
- Park, M., Nepal, M. P. and Dulaimi, M. F. (2004). Dynamic Modeling for Construction Innovation, *Journal of Management in Engineering* **20**(4) : 170–177.
- Pellaud, M. (2007). *Ecological response of a multi-purpose river development project using macro-invertebrates richness and fish habitat value*, PhD thesis, N° 3807, Laboratoire des Systèmes Ecologiques, EPFL, Switzerland.
- Point, P. (1999). *La valeur économique des hydrosystèmes, Méthodes et modèles d'évaluation des services délivrés*, Economica, France.
- Prasad, T. D. and Park, N.-S. (2004). Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks, *Journal of Water Resources Planning and Management* **130**(1) : 73–82.
- Qian, J. Z., Wang, J. Q., Li, R. Z. and Wang, W. P. (2005). A multi-objective dynamic model for water resources management, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management* pp. 1351–1356.
- Rainelli, P. (2003). L'évaluation des dommages et bénéfices environnementaux, Exemple : L'évaluation des pertes d'aménités des pêcheurs à pied suite au naufrage de l'Erika, *La Houille Blanche* **3** : 118–122.
- Raman, H. and Chandramouli, V. (1996). Deriving a General Operating Policy for Reservoirs Using Neural Network, *Journal of Water Resources Planning and Management* **122**(5) : 342–347.
- Rangarajan, B., Allen, J. K. and Mistree, F. (1999). Modeling Uncertainty in Preliminary Design Stages through the Usage of Fuzzy Goals in Compromise Decision Support Problems, *3rd World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization*, New York, USA.
- Reichert, P., Borsuk, M., Hostmann, M., Schweizer, S., Spörri, C., Tockner, K. and Truffer, B. (2007). Concepts of Decision Support for River Rehabilitation, *Environmental Modelling and Software* **22** : 188–201.
- Renard, J. (1893). *Journal 1887-1910*, Actes du Sud, France.
- Richardson, G. P. (1996). Problems for the future of system dynamics, *System Dynamics Review* **12**(2) : 141–157.
- Rohde, S., Schütz, M., Kienast, F. and Englmaier, O. (2005). River widening : an approach to restoring riparian habitats and plant species, *River Research and Applications* **21**(10) : 1075–1094.

- Rowe, G. and Wright, G. (1996). The impact of task characteristics on the performance of structured group forecasting techniques, *International Journal of Forecasting* **12** : 73–89.
- Roy, B. (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE), *Revue Française de Recherche Operationnelle* **2**(8) : 57–75.
- Roy, R. and Oduguwa, V. (2003). Multi-objective Optimisation of Rod Design in long Product Rolling within a Quantitative and Qualitative Search Space, *Computational Intelligence in Robotics and Automation*, Kobe, Japan, pp. 583–588.
- Rumelhart, D., Hinton, G. and Williams, R. (1986). *Learning internal representations by error propagation*, Vol. 1, parallel distributed processing : explorations in the microstructure of cognition edn, MIT Press, Cambridge, UK.
- Russell, S. O. and Campbell, P. F. (1996). Reservoir Operating Rules with Fuzzy Programming, *Journal of Water Resources Planning and Management* **122**(3) : 165–170.
- Sanchez, M., Prats, F., Agell, N. and Ormazabal, G. (2005). Multiple-Criteria Evaluation for Value Management in civil Engineering, *Journal of Management in Engineering* **21**(3) : 131–137.
- Sasikumar, K. and Mujumdar, P. P. (1998). Fuzzy Optimization Model for Water Quality Management of a River System, *Journal of Water Resources Planning and Management* **124**(2) : 79–88.
- Schärli, A. (1985). *Décider sur plusieurs critères, panorama de l'aide à la décision multicritère*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Switzerland.
- Schlaeger, F., Schonlau, H. and Königeter, J. (2003). An Integrated Water Resources Management Approach for the River Spree and its Catchment, *Water Science and Technology* **47**(7-8) : 191–199.
- Schleiss, A. (2001). Solutions et mesures pour réduire les effets nuisibles, Cycle d'études postgrade en aménagements hydrauliques, LCH, EPFL, Switzerland.
- Schleiss, A. J. (2004). Augmentation du risque de dégâts liés aux inondations, *Traçés* **130**(19) : 13–16.
- Schleiss, A. J. (2006). Mögliche Synergien zwischen Hochwasserschutz, Flussrevitalisierung und Wasserkraft dank innovativer Mehrzweckprojekte, *Wasser-Energie-Luft* **98**(1) : 3–9.
- Schlüter, M., Savitsky, A. G., McKinney, D. C. and Lieth, H. (2005). Optimizing long-term water allocation in the Amudarya River delta : a water management model for ecological impact assessment, *Environmental Modelling and Software* **20** : 529–545.
- Schürch, M. and Vuataz, F. D. (2000). Groundwater components in the alluvial aquifer of the alpine Rhone River valley, Bois de Finges area, Wallis Canton, Switzerland, *Hydrogeology Journal* **8**(5) : 549–563.
- Schweizer, S., Borsuk, M. and Reichert, P. (2007). Predicting the Hydraulic and Morphological Consequences of River Rehabilitation, *Journal of River Research and Applications*, (submitted) .
- Shabman, L. and Stephenson, K. (2000). Environmental Valuation and Its Economic Critics, *Journal of Water Resources Planning and Management* **126**(6) : 382–388.
- Sharif, M. and Wardlaw, R. (2000). Multireservoir Systems Optimization using Genetic Algorithms : Case Study, *Journal of Computing in Civil Engineering* **14**(4) : 255–263.

- Shirakawa, N. and Tamai, N. (2003). Use of economic measures for establishing environmental flow in upstream river basins, *International Journal of River Basin Management* **1**(1) : 15–19.
- Shrestha, B. P., Duckstein, L. and Stakhiv, E. Z. (1996). Fuzzy Rule-Based Modeling of Reservoir Operation, *Journal of Water Resources Planning and Management* **122**(4) : 262–269.
- Siervo, F. and de Leva, F. (1976). Modern trends in selecting and designing Francis turbines, *Water Power and Dam Construction* **28**(8) : 28–35.
- Sinha, A. K., Rao, B. V. and Bischof, C. H. (1999). Nonlinear Optimization Model for Screening Multipurpose Reservoir Systems, *Journal of Water Resources Planning and Management* **125**(4) : 229–233.
- Steiner, I. D. (1972). *Group Process and Productivity*, Academic Press, New-York, USA.
- Sterman, J. D. (2002). Dana Meadows : Thinking globally, acting locally, *System Dynamics Review* **18**(2) : 101–107.
- Steuer, R. E. (1986). *Multiple criteria optimisation : theory, computation and application*, John Wiley and Sons, USA.
- Strange, N., Tarp, P., Helles, F. and Brodie, J. D. (1999). A four-stage approach to evaluate management alternatives in multiple-use forestry, *Forest Ecology and Management* **124** : 79–91.
- Tamiz, M., Jones, D. and El-Darzi, E. (1995). A review of Goal Programming and its applications, *Annals of Operations Research* **58**(1) : 39–53.
- Taylor, J. G. and Ryder, S. D. (2003). Use of the delphi method in resolving complex water resources issues, *Journal of the American Water Resources Association* **39**(1) : 183–189.
- Thomman, R. and Mueller, J. (1987). *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper and Rowe, New York.
- Umayal, S. and Kamaraj, N. (2005). Stochastic Multi Objective Short Term Hydrothermal Scheduling Using Particle Swarm Optimization, *IEEE Indicon*, Chennai, India, pp. 497–501.
- UN (1972). Water Resource Project Planning, in U. NATIONS (ed.), *Office of Technical Cooperation, Water Resources Serie*, Vol. 41, New York, USA, pp. 132–146.
- UN (1992). Earth Summit, Agenda 21, *Conference on Environment and Development (UNCED)*, Rio de Janeiro, Brazil.
- Valais (2005). Les améliorations foncières en Valais, cent ans d'activité, *Technical Report* , Service de l'agriculture, Valais, Switzerland.
- Valéry, P. (1957). *Louanges de l'eau, Oeuvres Complètes*, Vol. 127, Pléiades, Gallimard, NRF, Paris, France.
- Vaughan, W. J., Russel, C. S., Rodriguez, D. J. and Darling, A. H. (2000). Cost-Benefit Analysis Based on Referendum CV : Dealing with Uncertainty, *Journal of Water Resources Planning and Management* **126**(6) : 351–357.
- Vester, F. (2001). Simulating complex systems as sustainable organization by transparent sensitivity models, *4th International Eurosim Congress*, TU Delft, Netherlands.

- Voltaire (1961). *Voltaire, Oeuvres complètes, Le poète, Poème sur la loi naturelle*, Vol. 5, Bibliothèque la Pléiade, NRF, Paris, France.
- Vullioud, G. and Chapuis, L. (2006). Procédure de dimensionnement des machines hydrauliques, *Technical Report (unpublished)*, VATECH Hydro Andritz, Switzerland.
- Walski, T. M. (2001). The wrong paradigm - Why Water distribution optimization doesn't work, *Journal of Water Resources Planning and Management* **127**(4) : 203–205.
- Ward, F. and Loomis, J. (1986). The travel cost demand model as an environmental policy assessment tool : a review of literature, *Western Journal of Agricultural Economics* **11**(2) : 164–178.
- Watkins, D. W. and McKinney, D. C. (1997). Finding Robust Solutions To Water Resources Problems, *Journal of Water Resources Planning and Management* **123**(1) : 49–58.
- Westphal, K. S., Vogel, R. M., Kirshen, P. and Chapra, S. C. (2003). Decision Support System for Adaptive Water Supply Management, *Journal of Water Resources Planning and Management* **129**(3) : 165–177.
- Yeh, C. H. and Labadie, J. W. (1997). Multiobjective Watershed-Level Planning of Storm Water Detention Systems, *Journal of Water Resources Planning and Management* **123**(6) : 336–343.
- Yeh, W. W.-G. and Becker, L. (1982). Multiobjective Analysis of Multireservoir Operations, *Water Resources Research* **18**(5) : 1326–1336.
- Yin, Y. Y., Huang, G. H. and Hipel, K. W. (1999). Fuzzy Relation Analysis for Multicriteria Water Resources Management, *Journal of Water Resources Planning and Management* **125**(1) : 41–47.
- Yoshida, K., Tanji, H., Somura, H., Higuchi, K. and Toda, O. (2005). Mitigation of stream temperature change with reservoir management, *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management* pp. 1279–1284.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy Sets, *Information and Control* **8** : 338–353.

ANNEXES

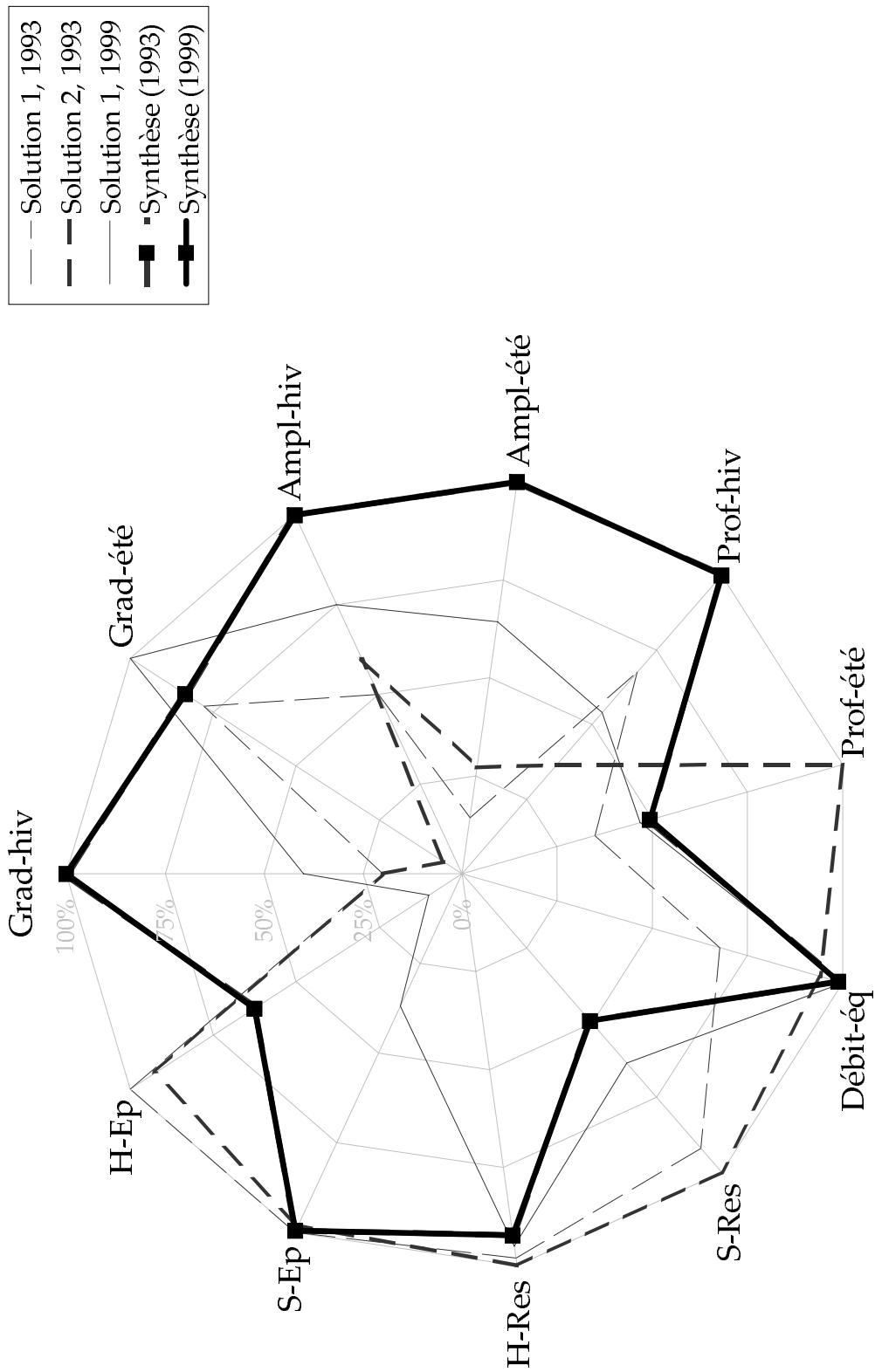
A1 Solutions Variante Large

Données et résultats sous forme numérique, calcul du pourcentage de réduction du marnage et des battements, calcul adimensionnel par rapport à la valeur maximale.

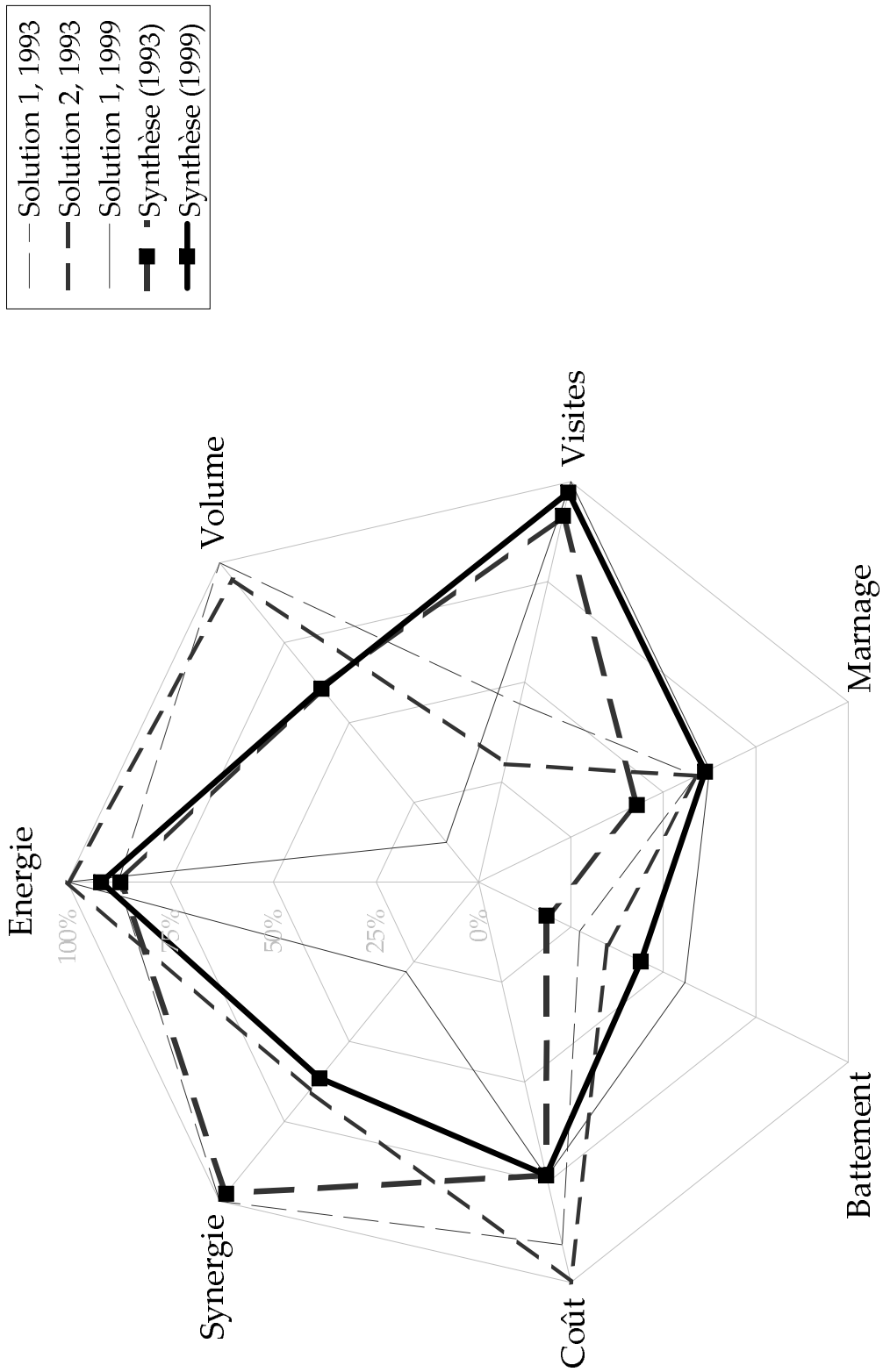
	Grad ^{hiv} cm/h	Grad ^{été} cm/h	Ampl ^{hiv} cm	Ampl ^{été} cm	Prof ^{hiv} m	Prof ^{été} m	Débit ^{éq} m ³ /s	S ^{Res} 10 ³ m ²	H ^{Res} m	S ^{Ep} 10 ³ m ²	H ^{Ep} m	Energie GWh/an	VOLUME Mio m ³	Visites 10 ³ visites	Marnage δm	Battement δm	Coût Mio CHF	Synergie %
1993	1	14	10	10	3.04	0.53	185	462.4	8.17	4.476	4.00	41.2	20.7	26.4	178.3	181.4	190.3	13%
1999	1	1	12	19	1.64	1.52	257	502.7	8.33	4.389	3.70	46.9	19.6	17.5	179.1	231.9	209.9	9%
Synthèse 93	2	18	15	45	2.43	0.71	273	318.7	7.92	1.652	0.40	47.0	2.6	59.4	343.6	656.0	154.8	4%
Synthèse 99	5	15	20	70	4.50	0.75	270	247.5	7.68	4.455	2.50	40.9	12.5	54.4	130.0	122.5	153.8	13%
	5	15	20	70	4.50	0.75	270	247.5	7.68	4.455	2.50	43.1	12.5	57.8	337.1	516.9	153.8	8%
Max	5	18	20	70	4.50	1.52	273	502.7	8.33	4.476	4.00	47.0	20.7	59.4	343.6	656.0	209.9	13%
1993	20%	78%	50%	14%	68%	35%	68%	92%	98%	100%	100%	88%	100%	45%	59%	27%	91%	100%
1999	20%	6%	60%	27%	36%	100%	94%	100%	100%	98%	93%	100%	95%	29%	59%	35%	100%	65%
Synthèse 93	40%	100%	75%	64%	54%	47%	100%	63%	95%	37%	10%	100%	12%	100%	62%	56%	74%	28%
Synthèse 99	100%	83%	100%	100%	100%	49%	99%	49%	92%	100%	63%	87%	61%	92%	43%	18%	73%	98%
Synthèse 99	100%	83%	100%	100%	100%	49%	99%	49%	92%	100%	63%	92%	61%	97%	61%	44%	73%	61%

Année	Marnage	%	Battement
1993	303	59%	666
1993	303	59%	666
1999	550	62%	1176
Synthèse 93	303	43%	666
Synthèse 99	550	61%	1176

Données des solutions de la variante large sous forme graphique, en particulier gradient hivernal et estival, amplitude hivernale et estivale, profondeur minimale hivernale et estivale, surface et hauteur du réservoir, surface et hauteur de la zone épanchement.



Résultats des solutions de la variante large sous forme graphique, en particulier la production énergétique annuelle, le volume total pour les crues, le nombre annuel de visite du site, la réduction du marnage, la réduction des battements, le coût total et le taux de synergie.



A2 Solutions Variante Réduite

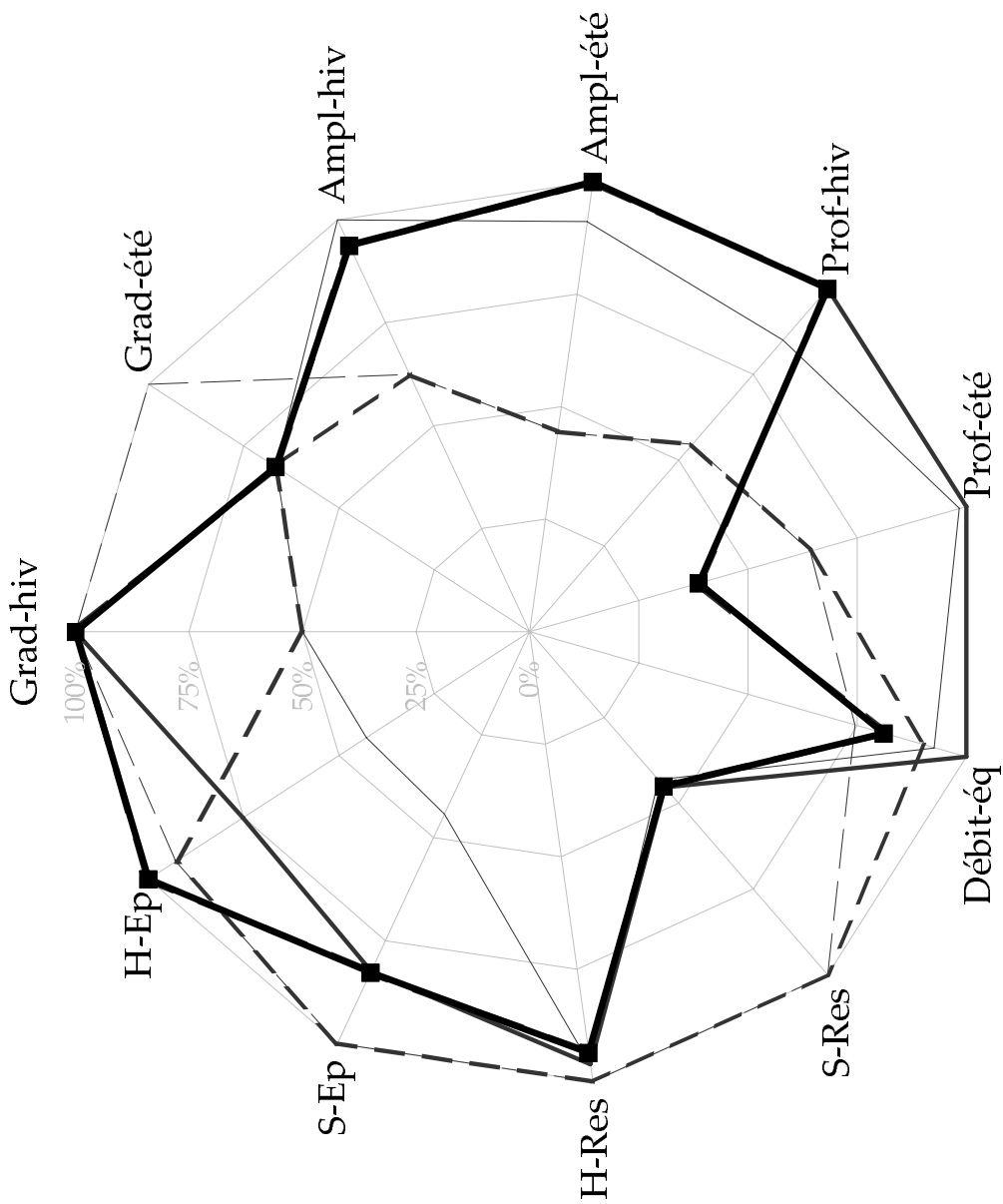
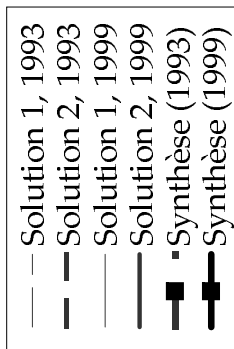
Données et résultats sous forme numérique, calcul du pourcentage de réduction du marnage et des battements, calcul adimensionnel par rapport à la valeur maximale.

	Grad ^{hiv} cm/h	Grad ^{été} cm/h	Ampl ^{hiv} cm	Ampl ^{été} cm	Prof ^{hiv} m	Prof ^{été} m	Débit _{4-q} m ³ /s	S ^{Res} 10 ³ m ²	H ^{Res} m	S ^{Ep} 10 ³ m ²	H ^{Ep} m	Energie GW/h/an	Volume Mio m ³	Visites 10 ³ visites	Marnage δm	Battement δm	Coût Mio CHF	Synergie %
1993	2	3	10	20	2.53	1.24	202	905.0	8.42	1118	1.58	44.6	7.6	19.6	209.6	295.7	214.7	6%
1999	1	2	10	20	2.53	1.24	245	905.0	8.42	1118	1.58	46.8	7.6	20.4	215.9	284.1	221.3	5%
	1	2	16	41	3.95	1.90	251	390.8	8.13	496	0.73	44.9	2.8	1.2	419.4	433.1	163.8	1%
	2	2	15	45	4.64	1.93	271	410.7	8.10	922	1.28	45.5	3.7	3.3	426.9	414.5	168.9	0%
Synthèse 93	2	2	15	45	4.64	0.75	220	408.0	7.88	924	1.70	40.1	3.8	46.9	190.5	71.0	158.3	18%
Synthèse 99	2	2	15	45	4.64	0.75	220	408.0	7.88	924	1.70	40.8	3.8	45.3	403.2	482.3	158.3	1%

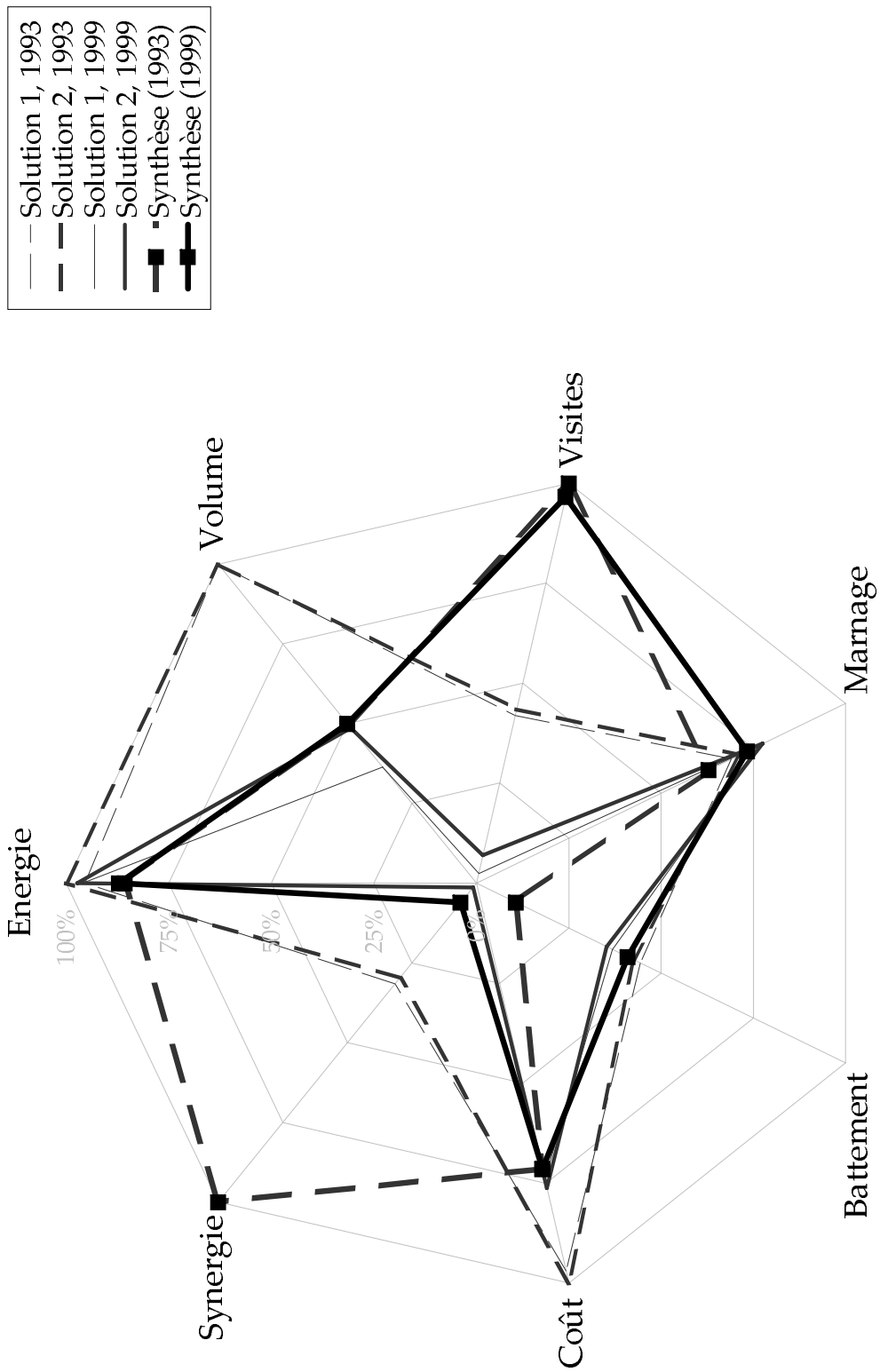
Année	Marnage %	Battement %
1993	303	44%
1993	303	43%
1999	550	37%
1999	550	35%
Synthèse 93	303	11%
Synthèse 99	550	41%

	Grad ^{hiv} cm/h	Grad ^{été} cm/h	Ampl ^{hiv} cm	Ampl ^{été} cm	Prof ^{hiv} m	Prof ^{été} m	Débit _{4-q} m ³ /s	S ^{Res} 10 ³ m ²	H ^{Res} m	S ^{Ep} 10 ³ m ²	H ^{Ep} m	Energie GW/h/an	Volume Mio m ³	Visites 10 ³ visites	Marnage δm	Battement δm	Coût Mio CHF	Synergie %
Max	2	3	16	45	4.64	1.93	271	905.0	8.42	1118	1.70	46.8	7.6	46.9	426.9	482.3	221.3	18%
1993	100%	100%	63%	44%	55%	64%	75%	100%	100%	100%	93%	95%	100%	42%	69%	44%	97%	32%
1999	50%	67%	63%	44%	55%	64%	90%	100%	100%	100%	93%	100%	100%	43%	71%	43%	100%	30%
	50%	67%	100%	91%	85%	98%	93%	43%	97%	44%	43%	96%	36%	3%	76%	37%	74%	6%
	100%	67%	94%	100%	100%	100%	100%	45%	96%	82%	75%	97%	49%	7%	78%	35%	76%	1%
Synthèse 93	100%	67%	94%	100%	100%	39%	81%	45%	94%	83%	100%	86%	50%	100%	63%	11%	72%	100%
Synthèse 99	100%	67%	94%	100%	100%	39%	81%	45%	94%	83%	100%	87%	50%	97%	73%	41%	72%	6%

Données des solutions de la variante réduite sous forme graphique, en particulier gradient hivernal et estival, amplitude hivernale et estivale, profondeur minimale hivernale et estivale, surface et hauteur du réservoir, surface et hauteur de la zone épanchement.



Résultats des solutions de la variante réduite sous forme graphique, en particulier la production énergétique annuelle, le volume total pour les crues, le nombre annuel de visite du site, la réduction du marnage, la réduction des battements, le coût total et le taux de synergie.



A3 Solutions Variante Riddes

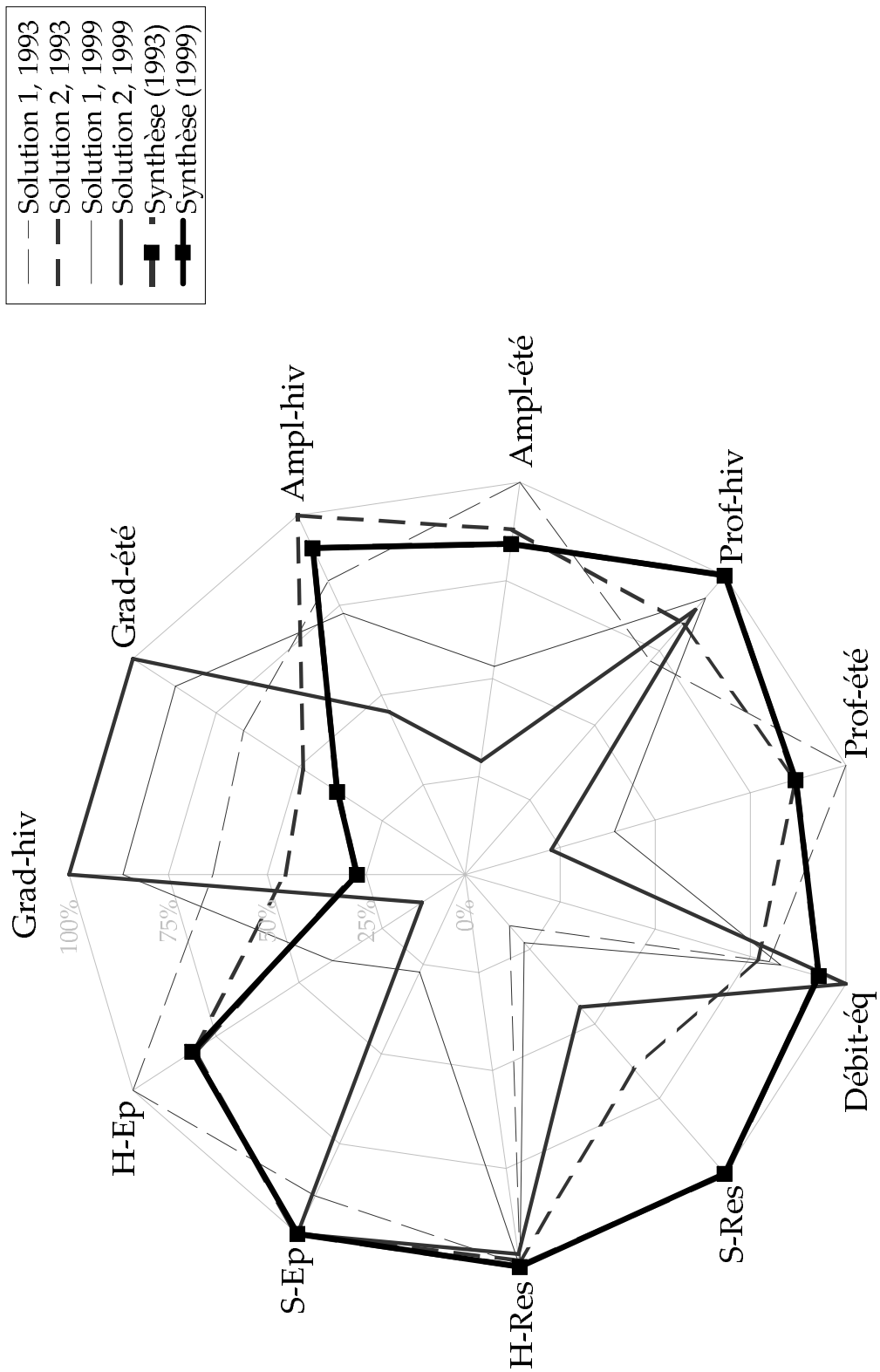
Données et résultats sous forme numérique, calcul du pourcentage de réduction du marnage et des battements, calcul adimensionnel par rapport à la valeur maximale.

	Grad ^{hiv} cm/h	Grad ^{été} cm/h	Ampl ^{hiv} cm	Ampl ^{été} cm	Prof ^{hiv} m	Prof ^{été} m	Débit ^{eq} m ³ /s	S ^{Res} 10 ³ m ²	H ^{Res} m	S ^{EP} 10 ³ m ²	H ^{EP} m	Energie GWh/an	Volume Mio m ³	Visites 10 ³ visites	Marnage δm	Battement δm	Coût Mio CHF	Synergie %
1993	14	26	27	83	3.21	0.84	215	105.6	7.94	1'285	3.18	42.7	5.25	52.7	88.0	66.9	133.7	15%
1999	10	19	33	73	3.77	0.73	207	404.7	7.87	1'402	2.61	42.1	7.78	56.1	95.9	222.5	155.9	13%
	19	34	24	44	4.16	0.33	223	141.5	7.99	381	1.27	43.7	2.18	55.4	299.2	220.4	129.2	16%
	22	39	15	24	3.99	0.19	269	274.7	7.73	1'402	0.41	43.9	3.72	61.2	334.2	245.3	141.6	15%
Synthèse 93	6	15	30	70	4.50	0.73	250	620.0	7.99	1'402	2.61	44.8	7.37	56.1	126.5	221.3	180.0	10%
Synthèse 99	6	15	30	70	4.50	0.73	250	620.0	7.99	1'402	2.61	45.7	7.37	61.0	361.3	403.8	180.0	2%

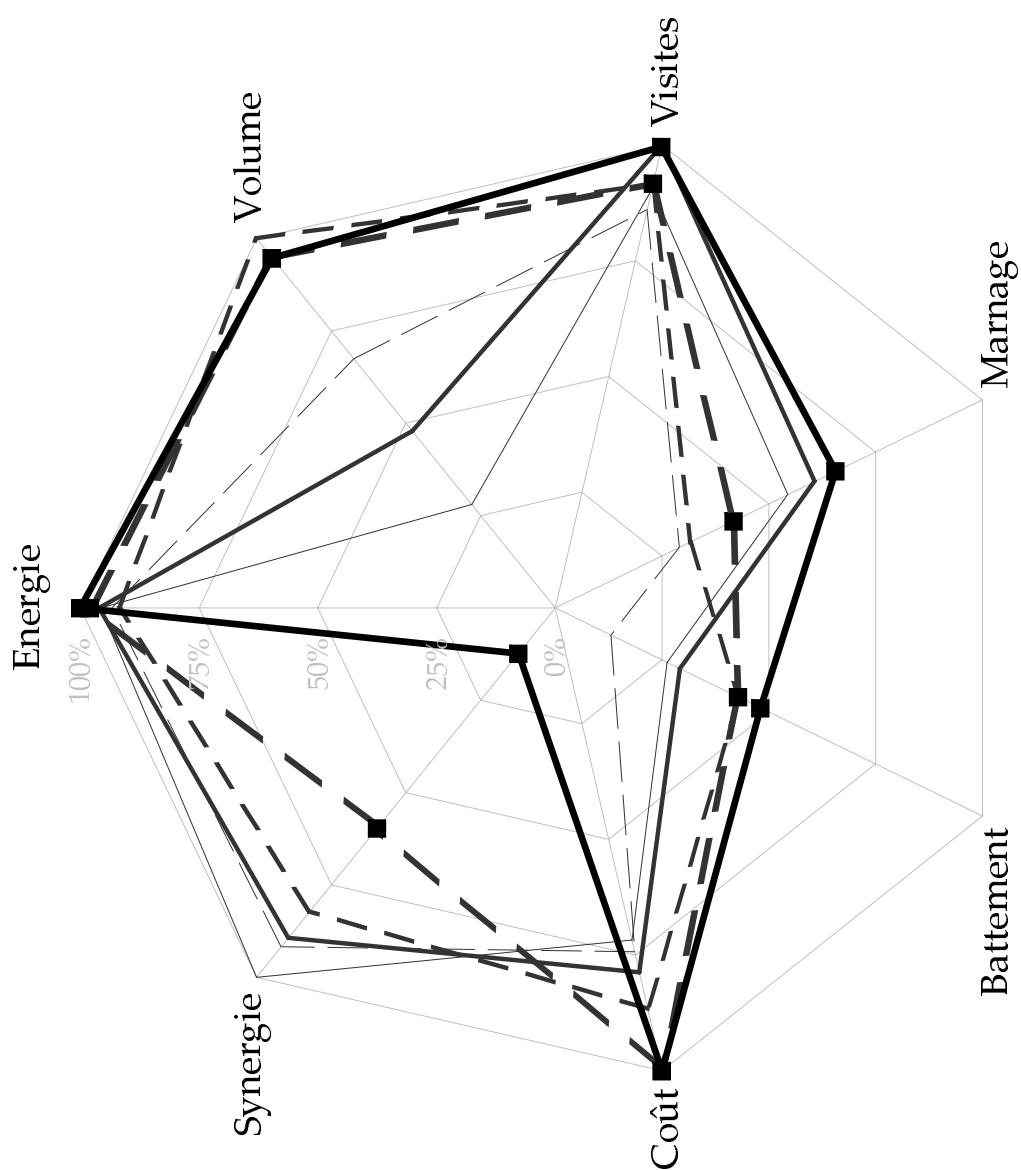
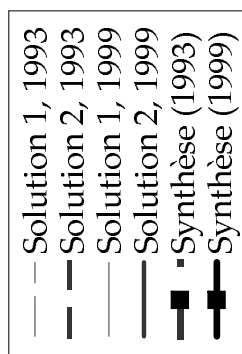
Année	Marnage	%	Battement
1993	303	29%	13%
1993	303	32%	43%
1999	550	54%	26%
1999	550	61%	29%
1999	550	61%	29%
Synth 93	303	42%	43%
Synth 99	550	66%	48%

Max	22	39	33	83	4.50	0.84	269	620.0	7.99	1'402	3.18	45.7	7.78	61.2	361.3	403.8	180.0	16%
1993	64%	67%	82%	100%	71%	100%	80%	17%	99%	90%	100%	93%	67%	86%	29%	13%	74%	92%
1999	45%	49%	100%	88%	84%	87%	77%	65%	98%	100%	82%	92%	100%	92%	32%	43%	87%	82%
	86%	87%	73%	53%	92%	39%	83%	23%	100%	27%	40%	96%	28%	91%	54%	26%	72%	100%
	100%	100%	45%	29%	89%	23%	100%	44%	97%	100%	13%	96%	48%	100%	61%	29%	79%	89%
Synthèse 93	27%	38%	91%	84%	100%	87%	93%	100%	100%	100%	82%	98%	95%	92%	42%	43%	100%	60%
Synthèse 99	27%	38%	91%	84%	100%	87%	93%	100%	100%	100%	82%	100%	95%	100%	66%	48%	100%	12%

Données des solutions de la variante de Riddes sous forme graphique, en particulier gradient hivernal et estival, amplitude hivernale et estivale, profondeur minimale hivernale et estivale, surface et hauteur du réservoir, surface et hauteur de la zone épanchement.



Résultats des solutions de la variante de Riddes sous forme graphique, en particulier la production énergétique annuelle, le volume total pour les crues, le nombre annuel de visite du site, la réduction du marnage, la réduction des battements, le coût total et le taux de synergie.



A4 Code MatLab : Routine principale

Routine MatLab qui effectue le lien avec l'optimisation *QMOO*. Cette routine, écrite pour du travail en parallèle sur plusieurs machines, crée autant de "task" que de machines disponibles. Elle envoie ensuite les différentes "task" puis attend le retour des résultats. Elle renvoie finalement l'ensemble des résultats dans l'optimiseur *QMOO*.

```
function Resultat = Optimization(VarIn)
% Main used for optimisation with MOO
% Version du 09.03.06

SimFlag = 0; % si MOO global alors 0, si MOO local alors 1
Nb_workers = 5;
Long = size(VarIn);
Long = Long(1); % normally 50 or 100 simulations
Tsize = int32(Long/Nb_workers); % Task length

% Load the necessary data
w = cd;
a = strcat(w, '\Data');
cd(a);
Data;
cd('..');

% Find a jobmanager
jm = findResource('jobmanager', 'LookUpURL', 'lchpc60');

% Create a job
job = createJob(jm);
chemin = {'D:\SYNERGIE Thèse\08-
          Modelisation\MatLabOptiGlobal\SimMarnage\Gestion-opti',
          'D:\SYNERGIE Thèse\08-
          Modelisation\MatLabOptiGlobal\SimMarnage\Gestion-simul',
          'D:\SYNERGIE Thèse\08-
          Modelisation\MatLabOptiGlobal\SimMarnage\Indicateurs',
          'D:\SYNERGIE Thèse\08-
          Modelisation\MatLabOptiGlobal\SimMarnage\Size',
          'D:\SYNERGIE Thèse\08-
          Modelisation\MatLabOptiGlobal\SimMarnage\OptiSend'};
set(job, 'FileDependencies', chemin);

cpt = 1;

% Tasks distribution
for cptworker = 1 : Nb_workers
    clear ('Hsize', 'Lsize', 'Dsize', 'Bsize', 'Esize', 'Mc');
    Tsize = int32(Long/(Nb_workers+1-cptworker));
    Long = Long - Tsize;
    for cptTask = 1 : Tsize

        % Hydraulic size
        Hsize(cptTask, 1) = 200; % Dam Q
        Hsize(cptTask, 2) = 5; % Bypass Q
        Hsize(cptTask, 3) = 3; % Perm Q
        Hsize(cptTask, 4) = VarIn(cpt,7)/100; % DamHeight
        Hsize(cptTask, 5) = VarIn(cpt,7)/100 - 0.5; % InilakeLevel
    end
end
```

```

% Lake and related embankment sizes
Lsize(cptTask, 1) = VarIn(cpt, 8);           % m LongFond
Lsize(cptTask, 2) = VarIn(cpt, 9);           % m LargFond
Lsize(cptTask, 3) = VarIn(cpt, 7)/100 - 1.5; % m HautInter
Lsize(cptTask, 4) = 4.5;                     % m LargInterSupGauche
Lsize(cptTask, 5) = 4.5;                     % m LargInterSupDroite
Lsize(cptTask, 6) = 4.5;                     % m LargInterSupAmont
Lsize(cptTask, 7) = 4.5;                     % m LargInterSupAval
Lsize(cptTask, 8) = Lsize(cptTask, 3)*2;     % m LargInterInfGauche
Lsize(cptTask, 9) = Lsize(cptTask, 8);       % m LargInterInfDroite
Lsize(cptTask, 10) = Lsize(cptTask, 8);      % m LargInterInfAmont
Lsize(cptTask, 11) = Lsize(cptTask, 8);      % m LargInterInfAval
Lsize(cptTask, 12) = 2;                       % - Pente digue ext.
Lsize(cptTask, 13) = 4;                       % m Largeur couronne.
Lsize(cptTask, 14) = 4;                       % m Excavation init. =
profondeur Synergie dans plaine

Lsize(cptTask, 15) = 1;                       % m Revanche
Lsize(cptTask, 16) = 2.5;                     % m profondeur rivière
aval dans plaine

% Dam size
Dsize(cptTask, 1) = 80;                       % m Largeur du barrage
Dsize(cptTask, 2) = 20;                       % m Longueur barrage
Dsize(cptTask, 3) = 2.5;                       % m Epaisseur semelle
Dsize(cptTask, 4) = 5;                         % - Nb vanne barrage
Dsize(cptTask, 5) = 50;                       % m Largeur rivière
Dsize(cptTask, 6) = 0;                         % - Vanne-porte

% By-pass river sizes
Bsize(cptTask, 1) = 2;                         % % Pente rivière poi
Bsize(cptTask, 2) = 2;                         % - Nb bassins repos

% Epanchement zone sizes
Esize(cptTask, 1) = 00;                       % m Longueur zone ép.
Esize(cptTask, 2) = 00;                       % m Largeur zone ép.
Esize(cptTask, 3) = 4;                       % m Hauteur zone ép. ;
doit rester inf. à la
hauteur hors sol de la
retenue mais sup. à 0.

% Management constraints
Mc(cptTask, 1) = VarIn(cpt, 1)/100;           % ConstMarnageMin
Mc(cptTask, 2) = (VarIn(cpt, 1) + VarIn(cpt, 2))/100; % ConstMarnageMax
Mc(cptTask, 3) = VarIn(cpt, 3)/100;           % ConstAmplitudeMin
Mc(cptTask, 4) = (VarIn(cpt, 3) + VarIn(cpt, 4))/100; % ConstAmplitudeMax
Mc(cptTask, 5) = VarIn(cpt, 7)/100 - VarIn(cpt, 5)/100; % LakeLevelMinmin
Mc(cptTask, 6) = VarIn(cpt, 7)/100 - VarIn(cpt, 6)/100; % LakeLevelMinmax

% Si PermQ est défini par le sous-sol
% Hsize(cptTask, 3) = 2.5e-4 * max(Esize(1), Esize(2))* Esize(3);

% Incrément dans le vecteur VarIn
cpt = cpt + 1;
end

% Submission

```

```

if SimFlag == 1
    cd('D:\SYNERGIE Thèse\08
        Modelisation\MatLabOptiGlobal\SimMarnage\OptiSend');
end

createTask(job, @OptiSend, 1, {Hsize, Lsize, Dsize, Bsize, Esize, Mc,
    CurveRiverHDebit, Length, RiverUpQ, EPrice, SimFlag, Width});
end

% Send tasks
submit (job);

% Retrieve Results
waitForState(job);
Retour = getAllOutputArguments(job);
destroy (job);

Result = Retour{1};
if length(Retour) > 1
    for i = 2 : length(Retour)
        Result = [Result Retour{i}];
    end
end

Resultat = Result;

```

A5 Code MatLab : Distribution machines

Routine MatLab qui effectue la simulation sur chacune de machines disponibles. Pour minimiser le temps de transfert de l'information entre les machines, chaque "task" comprend plusieurs solutions à calculer. Cette routine pilote les différentes opérations nécessaires à l'évaluation d'une solution (création courbe hauteur-volume du réservoir, optimisation du débit aval, simulation de tous les aspects dépendants).

```
function Resultat = OptiSend(X, Hsize, Lsize, DamHeight, CurveRiverHDebit,
    Length, IniLakeLevel, RiverUpQ, EPrice, SimFlag, Meteo, Width);
% Main used for optimisation with MOO
% Version du 09.03.06

IL = size(X);
IL = IL(1);           % nb de simulations

% Hydraulic size
DamQ = Hsize(1);
BypassQ = Hsize(2);
PermQ = Hsize(3);

% Meteo data
Jsun = Meteo{1};      % ensoleillement (W/m2)
Tair = Meteo{2};      % Température air (0.1 °C)
Pvair = Meteo{3};     % Pression vapeur air (0.1 mb)
Vwind = Meteo{4};     % Vitesse vent (0.1 m/s)
Humidity = Meteo{5};  % Humidité (pour-mille)
RiverUpT = Meteo{6};  % Température eau amont (°C)
Pair = Meteo{7};      % Pression air (0.1 mb)

% Computation of the downstream flow (optimization of the management)
for no = 1 : IL

    % Management constraints
    x(1) = X(no,1);    % ConstMarnageMin
    x(2) = X(no,2);    % ConstMarnageMax
    x(3) = X(no,3);    % ConstAmplitudeMin
    x(4) = X(no,4);    % ConstAmplitudeMax
    x(5) = X(no,5);    % LakeLevelMinAllowmin
    x(6) = X(no,6);    % LakeLevelMinAllowmax

    % Size computation
    if SimFlag == 1 cd('D:\SYNERGIE Thèse\08-
        Modelisation\MatLabfour\Simulation\Size');
    end

    y = SizeLoad(Lsize, DamHeight);
    LakeSurface = y{1};
    CurveLakeVolume = y{2};

    if SimFlag == 1 cd('D:\SYNERGIE Thèse\08-
        Modelisation\MatLabfour\Simulation\Gestion-opti');
    end

    RDQ = GestionOpti(x, CurveLakeVolume, CurveRiverHDebit, DamHeight,
        Length, IniLakeLevel, RiverUpQ, EPrice, SimFlag);
```

```

% Computation of variables dependant from downstream flow
if SimFlag == 1
    w = cd;
    File = strcat(w , '\Gestion-simul');
    cd(File);
end

GestionSimulResult = GestionSimul(CurveLakeVolume, IniLakeLevel, RiverUpQ,
    RDQ, Length, CurveRiverHDebit, Width, BypassQ, DamQ, EPrice, SimFlag,
    RiverUpT, PermQ, Tair, Jsun, Pvair, Vwind, Humidity, LakeSurface,
    Pair, DamHeight);

LakeVolume = GestionSimulResult{1};
LakeLevel = GestionSimulResult{2};
RDL = GestionSimulResult{3};
RDW = GestionSimulResult{4};
EProduced = GestionSimulResult{5};
Esell = GestionSimulResult{6};
Eco = GestionSimulResult{7};

% Computation of indicators
if SimFlag == 1 cd('D:\SYNERGIE Thèse\08-
    Modelisation\MatLabfour\Simulation\Indicateurs');
end

IndicateursResult = Indicateurs(Length, RDL, LakeLevel, EProduced);

if SimFlag == 1 cd('D:\SYNERGIE Thèse\08-
    Modelisation\MatLabfour\Simulation\OptiSend');
end

%Result = [LakeResult RiverResult Energy];
LakeResult = IndicateursResult{1};
RiverResult = IndicateursResult{2};
Energy = IndicateursResult{3};
ResultatTemp{no} = [LakeResult RiverResult Energy];
end

Resultat = ResultatTemp;

```

A6 Code MatLab : Courbe de rétention hauteur-volume

Routine MatLab qui effectue le calcul de la courbe hauteur-volume du réservoir en fonction de sa géométrie de base.

```
function y = SizeLoad(Size, DamHeight);
% This routine loads or keeps the different size of the problem
% Version du 09.03.06

% Lake sizes
LongFond = Size(1);           % Deep length of the lake [m]
LargFond = Size(2);           % Deep width of the lake [m]
HautInter = Size(3);          % Depth of the bank middle point [m]
LargInterSupGauche = Size(4); % Additional up left length of the bank [m]
LargInterSupDroite = Size(5); % Additional up right length of the bank [m]
LargInterSupAmont = Size(6);  % Additional up upstream length of the bank [m]
LargInterSupAval = Size(7);   % Additional up downstream length of bank [m]
LargInterInfGauche = Size(8); % Additional down left length of the bank [m]
LargInterInfDroite = Size(9); % Additional down right length of the bank [m]
LargInterInfAmont = Size(10); % Additional down upstream length of bank [m]
LargInterInfAval = Size(11);  % Additional down downstream length of bank [m]

% Computation of "elevation - volume" lake relation [cm; m3]
i = 1 : double(int32(HautInter*100));
Hauteur = (i./100);

LGauche = (LargInterInfGauche.*Hauteur/HautInter/2)';
LDroite = (LargInterInfDroite.*Hauteur/HautInter/2)';
LAmont = (LargInterInfAmont.*Hauteur/HautInter/2)';
LAval = (LargInterInfAval.*Hauteur/HautInter/2)';
Volume = (LGauche+LDroite+LargFond) .* (LAmont+LAval+LongFond) .* (Hauteur)';
Hauteur_inter = (Hauteur)';

limitesup = DamHeight * 600;
limitesup = double(int16(limitesup));
i = HautInter*100+1 : limitesup;
Hauteur = (i./100);

LGauche = ((HautInter*LargInterInfGauche/2./Hauteur)+(1-
HautInter./Hauteur) .* (LargInterInfGauche+(Hauteur-
HautInter)*LargInterSupGauche/2/(DamHeight-HautInter)))';
LDroite = ((HautInter*LargInterInfDroite/2./Hauteur)+(1-
HautInter./Hauteur) .* (LargInterInfDroite+(Hauteur-
HautInter)*LargInterSupDroite/2/(DamHeight-HautInter)))';
LAmont = ((HautInter*LargInterInfAmont/2./Hauteur)+(1-
HautInter./Hauteur) .* (LargInterInfAmont+(Hauteur-
HautInter)*LargInterSupAmont/2/(DamHeight-HautInter)))';
LAval = ((HautInter*LargInterInfAval/2./Hauteur)+(1-
HautInter./Hauteur) .* (LargInterInfAval+(Hauteur-
HautInter)*LargInterSupAval/2/(DamHeight-HautInter)))';
Volume2 = (LGauche+LDroite+LargFond) .* (LAmont+LAval+LongFond) .* (Hauteur)';
CurveLakeVolume(:,2) = [Volume(:,1); Volume2(:,1)];
CurveLakeVolume(:,1) = [Hauteur_inter ; (Hauteur)'];
CurveLakeVolume = double(CurveLakeVolume);

% Computation of "elevation - volume" river up relation [cm;m3]
i = (1 : 1 : limitesup)';
```

```

Hauteur = min(i./100, DamHeight);
VolumeRiv = 909.88.*(Hauteur).^3 + 7895.3.*(Hauteur).^2 - 4629.9.*(Hauteur);

% Computation of elevation-volume relation
CurveLakeVolume(:,2) = CurveLakeVolume(:,2) + VolumeRiv;

% Computation of total lake surface [m2]
Largetotal = LargFond + LargInterInfGauche +LargInterSupGauche +
LargInterInfDroite +LargInterSupDroite;
Longtotal = LongFond + LargInterInfAmont +LargInterSupAmont + LargInterInfAval
+LargInterSupAval;
LakeSurface = Largetotal * Longtotal;

y = {LakeSurface CurveLakeVolume};

```

A7 Code MatLab : Optimisation de la gestion

Routine MatLab qui effectue l'optimisation du débit aval de manière à minimiser le marnage aval tout en maximisant la production d'énergie et en minimisant les battements dans le réservoir.

```
function Debit = AMPL7(X, CurveLakeVolume, CurveRiverHDebit, DamHeight,
    Length, IniLakeLevel, RiverUpQ, EPrice, SimFlag);
% This routine computes the downstream flow by nonlinear programming
% Minimize the delta lake level but maximize the lake level
% Weekly computation by step of one hour
% It uses the complete version of AMPL restricted to 300 variables
% CompFlowlength must be smaller than 100 (max 99)
% Version du 16.03.06

Flagend = 0;
Startpoint = 1;
AvFlowLength = 167;          % Duration of average flow computation (minus 1
hour)
CompFlowLength = 95;        % Duration of outflow computation (minus 1 hour)
Spoint = CompFlowLength-48;
MaxiLakeVolume = CurveLakeVolume(fix((DamHeight)*100),2);
LastMaxiVolume = max(0, MaxiLakeVolume - 100000);

cpt = 0;

while Startpoint + AvFlowLength <= Length
    if Startpoint == 1
        IniLakeVolume = CurveLakeVolume(fix(IniLakeLevel*100),2);
        RDQmoy = Qmoy(RiverUpQ(1:AvFlowLength+1));
        Res = ManagementConstraint(X, CurveRiverHDebit, RDQmoy);
        LakeLevelMinAllow = Res{1};
        RDQmarnage = Res{2};
        RDQmax = Res{3};
        RDQmin = Res{4};
        MiniLakeVolume = CurveLakeVolume(LakeLevelMinAllow,2);

        if RiverUpQ(1) <= RDQmoy
            IniQ = max(RiverUpQ(1), RDQmin - RDQmarnage/2 + 1);
        else
            IniQ = min(RiverUpQ(1), RDQmax + RDQmarnage/2 - 1);
        end

        IniQ1 = IniQ;
        RDQminPrev = RDQmin;
        RDQmaxPrev = RDQmax;
        Endpoint = Startpoint + CompFlowLength;

        Res71 = AMPL71(RiverUpQ, EPrice, RDQmin, RDQmax, RDQminPrev,
            RDQmaxPrev, RDQmarnage, IniLakeVolume, MaxiLakeVolume,
            MiniLakeVolume, IniQ, Startpoint, Endpoint, cpt, SimFlag,
            CurveRiverHDebit, LastMaxiVolume);

        Flow2 = Res71{1};
        Volume2 = Res71{2};
        Flow = Flow2(1:Spoint)';
        Volume = Volume2(1:Spoint)';
        cpt = Res71{3};
    end
end
```



```

        Startpoint = Startpoint + Spoint;
else
    IniQ = Flow(Startpoint - 1);
    IniLakeVolume = Volume(Startpoint - 1);
    RDQmoy = Qmoy(RiverUpQ(Startpoint:(Startpoint + AvFlowLength)));
    Res = ManagementConstraint(X, CurveRiverHDebit, RDQmoy);
    LakeLevelMinAllow = Res{1};
    RDQmarnage = Res{2};
    RDQmax = Res{3};
    RDQmin = Res{4};
    MiniLakeVolume = CurveLakeVolume(LakeLevelMinAllow,2);
    Endpoint = Startpoint + CompFlowLength;

    Res71 = AMPL71(RiverUpQ, EPrice, RDQmin, RDQmax, RDQminPrev,
        RDQmaxPrev, RDQmarnage, IniLakeVolume, MaxiLakeVolume,
        MiniLakeVolume, IniQ, Startpoint, Endpoint, cpt, SimFlag,
        CurveRiverHDebit, LastMaxiVolume);

    Flow2 = Res71{1};
    Volume2 = Res71{2};
    cpt = Res71{3};
    RDQminPrev = Res71{4};
    RDQmaxPrev = Res71{5};
    Flow = [Flow ; Flow2(1:Spoint)'];
    Volume = [Volume ; Volume2(1:Spoint)'];
    Startpoint = Startpoint + Spoint;
end
end

RDQmin = Res71{4};
RDQmax = Res71{5};
RDQmarnage = Res71{6};

while Startpoint + CompFlowLength < Length
    IniQ = Flow(Startpoint - 1);
    IniLakeVolume = Volume(Startpoint - 1);
    Endpoint = Startpoint + CompFlowLength;

    Res71 = AMPL71(RiverUpQ, EPrice, RDQmin, RDQmax, RDQminPrev, RDQmaxPrev,
        RDQmarnage, IniLakeVolume, MaxiLakeVolume, MiniLakeVolume, IniQ,
        Startpoint, Endpoint, cpt, SimFlag, CurveRiverHDebit, LastMaxiVolume);

    Flow2 = Res71{1};
    Volume2 = Res71{2};
    cpt = Res71{3};
    RDQmin = Res71{4};
    RDQmax = Res71{5};
    RDQmarnage = Res71{6};
    RDQminPrev = RDQmin;
    RDQmaxPrev = RDQmax;
    Flow = [Flow ; Flow2(1:Spoint)'];
    Volume = [Volume ; Volume2(1:Spoint)'];
    Startpoint = Startpoint + Spoint;
end

if Startpoint < Length

```

```

IniQ = Flow(Startpoint - 1);
IniLakeVolume = Volume(Startpoint - 1);
Endpoint = Length;
Res71 = AMPL71(RiverUpQ, EPrice, RDQmin, RDQmax, RDQminPrev, RDQmaxPrev,
  RDQMarnage, IniLakeVolume, MaxiLakeVolume, MiniLakeVolume, IniQ,
  Startpoint, Endpoint, cpt, SimFlag, CurveRiverHDebit, MaxiLakeVolume);

Flow2 = Res71{1};
Volume2 = Res71{2};
cpt = Res71{3};
Flow = [Flow ; Flow2(1: Endpoint - Startpoint + 1)'];
Volume = [Volume ; Volume2(1: Endpoint - Startpoint + 1)'];
end

RDQ = Flow;

% Average flow on two hours
RDQ2(1) = (RDQ(1)+ IniQ1)/2;
i = 2 : 1 : Length;
RDQ2(i) = (RDQ(i-1) + RDQ(i))/2;
RDQ = RDQ2(1:Length)';

cpt
Debit = RDQ;

```

A8 Code MatLab : Simulation

Routine MatLab qui effectue les différentes simulations dépendantes de la gestion du réservoir. Cette routine commence par résoudre les aspects hydrauliques du réservoir. Ensuite, elle calcule la production d'énergie, l'évolution thermique du réservoir, l'évaluation écologique du cours d'eau aval, la fréquentation du réservoir puis les coûts de construction de l'aménagement. Elle renvoie finalement ses résultats à la routine "OptiSend".

```
function Result = GestionSimul(CurveLakeVolume, IniLakeLevel, RiverUpQ, RDQ,
    Length, CurveRiverHDebit, Width, BypassQ, DamQ, EPrice, SimFlag,
    RiverUpT, PermQ, Tair, Jsun, Pvair, Vwind, Humidity, LakeSurface, Pair,
    DamHeight, Lsize, Dsize, Bsize, Esize);
% Computation of variable dependant from downstream flow
% Version du 09.03.06

% HYDRAULIC COMPUTATION
if SimFlag == 1
    w = cd;
    File = strcat(w, '\Hydraulic');
    cd(File);
end

if SimFlag == 0
    maison = pwd;
    Debut = strrep(maison, '\work', '');
    Fin = ('\matlabDependencyDir\Gestion-simul\Hydraulic');
    Chemin = strcat(Debut, Fin);
    cd(Chemin);
end

HydraulicResult = Hydraulic(CurveLakeVolume, IniLakeLevel, RiverUpQ, RDQ,
    Length, CurveRiverHDebit, Width);
LakeVolume = HydraulicResult{1};
LakeLevel = HydraulicResult{2};
RDL = HydraulicResult{3};
RDW = HydraulicResult{4};
if SimFlag == 0 cd(maison); end
if SimFlag == 1 cd('..'); end

% ENERGY COMPUTATION
if SimFlag == 1
    w = cd;
    File = strcat(w, '\Energy');
    cd(File);
end

if SimFlag == 0
    maison = pwd;
    Debut = strrep(maison, '\work', '');
    Fin = ('\matlabDependencyDir\Gestion-simul\Energy');
    Chemin = strcat(Debut, Fin);
    cd(Chemin);
end
```

```

EnergyResult = Energy(Length, LakeLevel, IniLakeLevel, RDL, RDQ, BypassQ,
    DamQ, EPrice);
EProduced = EnergyResult{1};
ESell = EnergyResult{2};
EH = EnergyResult{3};
EQ = EnergyResult{4};
Power = EnergyResult{5};
if SimFlag == 0 cd(maison); end
if SimFlag == 1 cd('..'); end

% TEMPERATURE COMPUTATION
if SimFlag == 1
    w = cd;
    File = strcat(w , '\Temperature');
    cd(File);
end

if SimFlag == 0
    maison = pwd;
    Debut = strrep(maison, '\work', '');
    Fin = ('\matlabDependencyDir\Gestion-simul\Temperature');
    Chemin = strcat(Debut, Fin);
    cd(Chemin);
end

TemperatureResult = LakeTemperature(RiverUpQ, PermQ, RDQ, Length, Tair,
    RiverUpT, CurveLakeVolume, IniLakeLevel, Jsun, Pvair, Vwind,
    Humidity, LakeSurface, LakeVolume);
LakeT = TemperatureResult{1};
LakeQout = TemperatureResult{2};
Je = TemperatureResult{3};
RDT = RiverDownTemperature(LakeQout, LakeT, RDQ, RiverUpT);
if SimFlag == 0 cd(maison); end
if SimFlag == 1 cd('..'); end

% ECOLOGY COMPUTATION
if SimFlag == 1
    w = cd;
    File = strcat(w , '\Eco');
    cd(File);
end

if SimFlag == 0
    maison = pwd;
    Debut = strrep(maison, '\work', '');
    Fin = ('\matlabDependencyDir\Gestion-simul\Eco');
    Chemin = strcat(Debut, Fin);
    cd(Chemin);
end

EcoResult = EcoRiv(RDQ, RDT, RDL, RDW, RiverUpQ, CurveRiverHDebit, Length);
if SimFlag == 0 cd(maison); end
if SimFlag == 1 cd('..'); end;

```

```

% SOCIAL COMPUTATION
if SimFlag == 1
    w = cd;
    File = strcat(w , '\Socio');
    cd(File);
end

if SimFlag == 0
    maison = pwd;
    Debut = strep(maison, '\work', '');
    Fin = ('\matlabDependencyDir\Gestion-simul\Socio');
    Chemin = strcat(Debut, Fin);
    cd(Chemin);
end
Socio_Result = Socio(Length, Tair, LakeT, LakeLevel);
SocioAir = Socio_Result{1};
SocioLake = Socio_Result{2};
SocioAirLake = Socio_Result{3};
SocioVisite = Socio_Result{4};
Smog_Result = Smog(Tair, Pair, Humidity, Pvoir, Je, LakeSurface, Vwind,
Length, Lsize);
Brouillard = Smog_Result{1};
EvaporationJ = Smog_Result{2};
if SimFlag == 0 cd(maison); end
if SimFlag == 1 cd('..'); end

% FINANCE COMPUTATION
if SimFlag == 1
    w = cd;
    File = strcat(w , '\Finance');
    cd(File);
end

if SimFlag == 0
    maison = pwd;
    Debut = strep(maison, '\work', '');
    Fin = ('\matlabDependencyDir\Gestion-simul\Finance');
    Chemin = strcat(Debut, Fin);
    cd(Chemin);
end

Finance_result = Cost_calculation(LakeSurface, DamHeight, Power/1000, Lsize,
    Dsize, Bsize, Esize);
Gain_result = Gain_calculation(ESell, EProduced, LakeSurface, DamHeight,
    Esize, Lsize, SocioVisite);
Cost = Finance_result{1};
Cost_vect = Finance_result{2};
Dike_gain = Gain_result{1};
Electr_gain = Gain_result{2};
Socio_gain = Gain_result{3};
if SimFlag == 0 cd(maison); end
if SimFlag == 1 cd('..'); end

% RESULT
Result = {LakeVolume LakeLevel RDL RDW EProduced Esell EcoResult};

```




HELLER Philippe
Maison La Villageoise
1058 Villars-Tiercelin
Tél : +41.21.903.54.44
Tél : +41.78 .679.77.88
Né le 29 septembre 1975
Nationalité : Suisse, Français
Etat civil : marié
Grade militaire : Premier-lieutenant
E-mail : philippe.heller@epfl.ch

Formation universitaire

2003 - 2007	Doctorat au Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL
2002	Diplôme Génie civil EPFL, travail de diplôme effectué au Colorado State University (USA)
1999 - 2001	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Génie Civil
1997 - 1999	Formation de philosophie et théologie en maison religieuse (France)
1995 - 1997	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Génie Civil

Expériences professionnelles

e-dric.ch dès 2007	Associé et administrateur, bureau d'ingénieurs-conseils spécialisé en hydrologie et hydraulique
LCH - EPFL 2002 – 2007	Assistant-doctorant au Laboratoire de Constructions Hydraulique Mandats : Modélisation numérique de l'évacuation des eaux d'incendie du tunnel du Lötschberg ; Expertise de la conduite forcée du Prabé ; Acheminement des eaux de turbinage valaisannes par un aqueduc ; Modèle d'évaluation des mesures d'assainissement des cours d'eau du Valais.
Michel Buffo 2002 – 2003	Ingénieur dans le bureau ingénieurs civils Michel Buffo (Genève) Calcul statique de la structure d'un bâtiment commercial à Zürich.
IBOIS - EPFL 2000	Stage de 2 mois, Laboratoire de Construction en Bois Modélisation numérique 3D d'une éprouvette bois - fibre de verre.
Roland Ribl SA 2000	Stage de 2 mois, bureau d'ingénieurs Roland Ribl SA (Genève) Analyse de la mobilité des deux-roues en Ville de Genève, conception et développement de mesures
2000 – 2001	Poursuite du développement par un emploi à temps partiel.

Langues	français langue maternelle allemand bonnes connaissances anglais niveau FCE
----------------	---

Informatique	Hydraulic System, Fortran, VBA, MatLab, AMPL
---------------------	--

Intérêts	violon 10 années d'étude au Conservatoire de Genève chant divers chœurs et opéras sport course à pied, ski, vélo
-----------------	--

Publications

León Armas Calderón Rosa M., Heller P., Schleiss A. (2004) "Protection des rives en courbe avec des épis submersibles, essais sur modèle physique", **Wasser Energie Luft**, 96. Jahrgang, Baden, Heft 9/10, pp. 263-268.

Heller P. (2005) "Analyse et objectifs de gestion d'un aménagement hydraulique fluvial à buts multiples", Nouveaux développements dans la gestion des crues - Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône, Martigny, 9 juin, **Communication du Laboratoire de Constructions Hydrauliques N° 21, LCH – EPFL**, pp 193-205.

Heller P., Bollaert E., Schleiss A. (2005) "Potential synergies of multipurpose run-of-river hydroelectric powerplants", **Proceedings of the XXXI IAHR Congress, Theme C, Seoul, Korea**, 11-16 September, pp. 2121-2130.

Heller P., Schleiss A., Bollaert E. (2005) "Optimal reservoir use of a multipurpose run-of-river powerplant for hydropeaking mitigation", **Proceeding of Hydro 2005: Policy into Practice**, 17-20 October, Villach, Austria, 10.03, pp. 1-8.

Heller P. (2006) "Analyse et objectifs de gestion d'un aménagement hydraulique fluvial à buts multiples" **Wasser Energie Luft**, 98. Jahrgang, Baden, Heft 1, pp.10-15.

Heller P., Pellaud M., Schlaepfer R., Bollaert E., Schleiss A. (2006) "Multi-purpose shallow reservoir: Synergies between ecology and energy production" **Proceedings of the Int. Conference on Fluvial Hydraulics**, River Flow 2006, Portugal, 6-8 September 2006, ISBN: 0-415-40815-6, pp. 2027-2035.

Heller P., Pellaud M., Bollaert E., Schleiss A. (2006) "Flussmehrzweckprojekt : Synergien zwischen Ökologie und Energieproduktion", **Proc. Symposium Graz 2006 "Stauhaltungen und Speicher - Von der Tradition zur Moderne"**, 27-30 September 2006, Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz, ISBN 3-902465-50-6, 46/1, pp.27-42.

Heller P., Bollaert E., Pellaud M., Schlaepfer R., Schleiss A. (2006) "Mehrzweckprojekt an Flüssen: Synergien zwischen Ökologie und Energieerzeugung", **Wasser Energie Luft**, 98. Jahrgang, Baden, Heft 4, décembre, pp. 329-336.

Heller P., Pellaud M., Bollaert E., Schleiss A., Schlaepfer R. (2007) "River Rehabilitation through a Multi-purpose Reservoir", **Proceedings of the XXXII IAHR Congress, Venice, Italy** 1-6 July, (accepted).