



Communication 9

Routing System Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre

Jérôme Dubois
Jean-Louis Boillat

- N° 1 1986 W. H. Hager
Discharge measurement structures
- N° 2 1988 N. V. Bretz
Ressaut hydraulique forcé par seuil
- N° 3 1990 R. Bremen
Expanding stilling basin
- N° 4 1996 Dr R. Bremen
Ressaut hydraulique et bassins amortisseurs, aspects hydrauliques particuliers
- N° 5 1997 Compte-rendu du séminaire à l'EPFL
Recherche dans le domaine des barrages, crues extrêmes

- N° 6 1998 N. Beyer Portner
Erosion des bassins versants alpins suisse par ruissellement de surface
- N° 7 1998 G. De Cesare
Alluvionnement des retenues par courants de turbidité
- N° 8 1998 J. Dubois
Comportement hydraulique et modélisation des écoulements de surface
- N° 9 2000 J. Dubois, J.-L. Boillat
Routing System - Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre



Communication 9

Routing System Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre

Jérôme Dubois
Jean-Louis Boillat

PREFACE

Les aménagements hydrauliques, en particulier les aménagements hydroélectriques et de protection contre les crues, deviennent de plus en plus complexes en regard des exigences actuelles relatives à leur fonctionnement et leur intégration environnementale. Pour la planification et la gestion optimale de tels systèmes hydrauliques, des outils performants sont indispensables pour donner une vision globale et réaliser une analyse des interactions entre les éléments du réseau.

Dans la présente communication, Dr Ing. J. Dubois et Dr Ing. J.-L. Boillat décrivent le programme de calcul Routing System développé au Laboratoire de constructions hydrauliques (LCH) pour la modélisation des réseaux hydrauliques. Destiné à simuler la génération et la propagation des crues sur des bassins versants naturels ou aménagés, Routing System intègre, dans un environnement LabVIEW, des modèles hydrologiques pluie-débit, le routage dans les cours d'eau, l'influence des dérivations, des prises d'eau et des ouvrages de contrôle, le laminage par les bassins de rétention et l'addition de débits aux confluences. D'une manière générale, ce logiciel est également approprié pour la simulation et l'optimisation des systèmes à buts multiples dans le cadre des plans directeurs de l'économie des eaux. Les auteurs apportent une contribution bienvenue à la profession en mettant à la disposition de chacun un logiciel performant, convivial et extensible.

Nous remercions l'Office fédéral des eaux et de la géologie ainsi que le Comité national suisse des grands barrages pour le soutien financier apporté à ce projet.

Prof. Dr Anton Schleiss

VORWORT

Hydraulische Anlagen wie Wasserkraftanlagen und Hochwasserschutzsysteme werden wegen den vielen Anforderungen, die bezüglich Funktion und Umwelt an sie gestellt werden, immer komplexer. Zur Planung und zur Definition der optimalen Betriebsweise von solchen komplexen hydraulischen Anlagen sind Werkzeuge erforderlich, welche eine gesamtheitliche und vernetzte Betrachtung erlauben.

In der vorliegenden Mitteilung beschreiben Dr. Dipl. Bauing. J. Dubois und Dr. Dipl. Bauing. J.-L. Boillat ein Computerprogramm zur numerischen Modellierung von hydraulischen Netzen, genannt Routing System, welches am Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) entwickelt wurde. Das Programm erlaubt die Simulation der Entstehung und Dämpfung von Hochwasserabflüssen in Einzugsgebieten unter der Berücksichtigung von allfälligen hydraulischen Bauwerken. Routing System basiert auf den Routinen von LabVIEW und integriert in einer einzigen Umgebung hydrologische Niederschlags-Abflussmodelle, die Hochwasserdämpfung in Abflussgerinnen, die Berücksichtigung von Wasserfassungen, Ableitungen und Regulierorganen, der Hochwasserrückhalt in Speichern sowie den Beitrag von seitlichen Zuflüssen. Das Programm ist auch grundsätzlich zur Simulation und Optimierung von beliebigen wasserwirtschaftlichen Mehrzwecksystemen im Rahmen von Wasserwirtschaftsplänen geeignet. Damit leisten die Autoren einen willkommenen Beitrag für die Praxis, indem sie ein leistungsfähiges, einfach handhabbares und ausbaubares Computerprogramm zur Verfügung stellen.

Wir danken dem Bundesamt für Wasser und Geologie sowie dem schweizerischen Nationalkomitee für grosse Talsperren, welche das Entwicklungsprojekt finanziell unterstützt haben.

Prof. Dr. Anton Schleiss

Table des matières

Préface	1
Vorwort	2
Résumé	7
Zusammenfassung	9
Summary	11
1. INTRODUCTION	13
2. ORIGINE DU PROJET	15
2.1 Description des aménagements hydrauliques	16
2.1.1 Problématique	16
2.1.1.1 Sémantique	16
2.1.1.2 Structure	18
2.1.1.3 Modèle classique	21
2.1.2 Description fonctionnelle	22
2.1.2.1 Fonction hydraulique	22
2.1.2.2 Spécialisation et héritage	23
2.1.2.3 Fonctions hydrauliques élémentaires	24
2.1.2.4 Fonctions hydrauliques détaillées	24
2.1.3 De l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique	26
2.1.3.1 Fonctions hydrauliques complexes	26
2.1.3.2 Fonctions complexes standard	30
2.1.4 Description organique	30
2.1.5 Attributs de gestion	31
2.1.6 Données événementielles	32
2.2 LabVIEW	32
2.2.1 Description générale	33
2.2.2 Fonctionnement de LabVIEW	34

2.2.2.1	La face-avant	34
2.2.2.2	Le diagramme	35
2.2.2.3	Les palettes	36
	La palette d'outils	36
	La palette de commandes	37
	La palette de fonctions	37
2.2.2.4	Le flux de données	38
3.	CONCEPT GÉNÉRAL DE ROUTING SYSTEM	39
3.1	Routage des crues	39
3.2	Fonctions hydrauliques de base	41
3.3	Exemple de développement d'un modèle de routage	43
3.3.1	Enoncé du problème	44
3.3.2	Modélisation du bassin versant supérieur	45
3.3.3	Modélisation de l'aménagement hydroélectrique	46
3.3.4	Modélisation de l'ensemble du système	47
4.	FONCTIONS DE ROUTING SYSTEM	51
4.1	Génération	51
4.1.1	Pluies	51
4.1.1.1	Généralités	52
4.1.1.2	Talbot	54
4.1.1.3	Calcul des coefficients de Talbot	54
4.1.1.4	Averse uniforme	55
4.1.1.5	Averse triangulaire	55
4.1.1.6	Averse de Weibull	57
4.1.1.7	Averse de Chicago	61
4.1.2	Fonction de production	64
4.1.2.1	Infiltration constante	64
4.1.2.2	Infiltration proportionnelle	65

4.1.2.3	Modèle de Horton	66
4.1.2.4	GR3	70
4.1.3	Fonction de transfert	74
4.1.3.1	SWMM	74
4.1.3.2	Onde cinématique sur plan	76
4.2	Transport	80
4.2.1	Onde diffusante	82
4.2.2	Onde cinématique	87
4.3	Bifurcation	88
4.4	Confluence	90
4.5	Stockage	91
4.6	Contrôle	93
4.6.1	Déversoir	95
4.6.1.1	Déversoir à paroi mince	95
4.6.1.2	Déversoir standard	96
4.7	Utilitaires	96
4.7.1	Lecture de données	97
	Cette option effectue la lecture d'un fichier contenant une fonction de forme générale $(x;y)$ et la met à disposition de Routing System pour le calcul.	97
4.7.2	Ecriture de résultats	99
4.7.3	Changement d'échelle d'une fonction	99
4.7.4	Minimum et maximum d'une fonction	100
4.7.5	Intégration d'une fonction	100
4.7.6	Mesure de l'erreur entre deux fonctions	100
4.7.6.1	Somme des carrés des erreurs	101
4.7.6.2	Somme des carrés des erreurs pondérées	101
4.7.6.3	Fonction de Cauchy	102
4.7.7	Optimisation	102

5. EXEMPLES D'APPLICATION	105
5.1 Etude des crues à Mattmark	105
5.1.1 Modélisation hydrologique	106
5.1.2 Calage du modèle hydrologique	109
5.1.3 Comportement de l'évacuateur en cas de crue extrême	114
6. CONCLUSIONS	119
Notations	121
Abréviations	125
Bibliographie	127

Résumé

Les barrages sont souvent reliés à des constructions hydrauliques dédiées au captage, au contrôle ou au transport des eaux. De fait, le cheminement des écoulements naturels est fortement modifié dans les bassins versants aménagés. La simulation numérique du routage de crues dans ces systèmes hydrauliques complexes peut être considérablement simplifiée par la description fonctionnelle de chacun des éléments constitutifs. Fondamentalement, la description du réseau peut être effectuée à l'aide de six fonctions de base : la génération, le transport, le stockage, la séparation, l'addition et la régulation des débits.

Le logiciel "Routing System" a été développé pour simuler la formation et de la propagation des crues dans des systèmes complexes, constitués d'un ensemble de bassins versants, de prises d'eau, de réservoirs, de galeries et autres ouvrages hydrauliques. Il se fonde sur le logiciel LabVIEW de National Instruments, spécialiste de l'acquisition et du traitement de données. Tous les ouvrages sont décrits par la fonction hydraulique qu'ils exercent au sein du système, comme la dérivation, le stockage dans les réservoirs ou le transport dans les cours d'eau. Ces fonctions, représentées par des icônes, peuvent être assemblées librement sur une fenêtre. Le flux des données entre ces fonctions est réalisé en câblant les icônes entre elles à l'aide de la souris. Cette approche permet la modélisation de systèmes très grands et complexes, ainsi que l'analyse à différentes échelles par agrégation de sous-systèmes.

L'analyse globale d'un réseau hydraulique est indispensable dans de nombreux cas, par exemple pour le dimensionnement et la régulation d'un évacuateur de barrage, ou encore pour le développement et l'optimisation d'un concept de protection contre les crues. Routing System, associé à son moteur numérique LabVIEW, facilite cette analyse grâce à son langage de

programmation graphique et à son architecture entièrement ouverte
à de nouveaux développements par l'utilisateur.

Zusammenfassung

Stauanlagen sind oft Bestandteil von hydraulischen Systemen, welche hauptsächlich zur Fassung, Kontrolle und Transport von Wasser dienen. Demzufolge wird der natürliche Abfluss in solch ausgebauten Einzugsgebieten stark verändert. Die numerische Simulation vom Abflüssen in komplexen hydraulischen Systemen kann beträchtlich vereinfacht werden, indem die einzelnen Bestandteile durch hydraulische Funktionen charakterisiert werden. Grundsätzlich kann ein hydraulisches Netzwerk durch sechs verschiedene Funktionen beschrieben werden: die Entstehung, der Transport, die Speicherung, die Aufteilung, die Zusammenführung und die Regulierung von Abflüssen.

Das Computerprogramm "Routing System" wurde zur Simulation der Entstehung und der Fortpflanzung von Hochwasserwellen in komplexen, hydraulischen Systemen entwickelt, welche aus einer Kombination von Einzugsgebieten, Wasserfassungen, Stauanlagen, Triebwassersysteme und weiterer hydraulischer Bauwerke bestehen können. Das Programm basiert auf dem von National Instruments entwickelten LabVIEW Softwarepaket, welches hauptsächlich auf die Datenerfassung und Auswertung von Prozessen spezialisiert ist. Alle Anlageteile können grundsätzlich durch die elementaren hydraulischen Funktionen wie Ableitung, Rückhalt in Speichern oder Abfluss in Fliessgewässern im nachzubildenden Netzwerk beschrieben werden. Diese Funktionen, durch Symbole dargestellt, können frei in einem Bildschirmfenster zusammengefügt werden. Durch einfaches Verbinden der Symbole mit der Computermaus werden die einzelnen Funktionen zusammengehängt und dadurch der Datenfluss respektive die Fliessrichtung bestimmt. Routing System erlaubt die Modellierung von sehr grossen und komplexen Systemen sowie eine Analyse in unterschiedlichen Detaillierungsstufen, indem Untersysteme verwendet werden.

Die gesamtheitliche Betrachtung eines hydraulischen Systemes ist in vielen Fällen unumgänglich, wie zum Beispiel für die Planung und den optimalen Betrieb von Hochwasserentlastungen in hydraulischen Anlagen, sowie bei der Konzeption und Optimierung von Hochwasserschutzmassnahmen. Routing System, zusammen mit dem Softwarepaket LabVIEW, erleichtert diese komplexen Analysen dank seiner graphischen Benutzeroberfläche und einer Programmarchitektur, welche ausserdem für weitere Neuentwicklungen des Anwenders vollkommen offen ist.

Summary

Dams are often part of complex hydraulic systems, which are devoted to collect, transport and control water. Thus the flow regime is strongly modified in such catchment areas influenced by hydraulic structures. The numerical simulation of flood routing in complex hydraulic schemes can be considerably simplified when describing each element of the network by its proper hydraulic function. Fundamentally, six different functions allow the complete description of the system: formation, transport, storage, splitting, summation and control of discharges.

The computer program “Routing System” was developed to simulate flood formation and propagation in complex schemes formed of multiple watersheds, water intakes, reservoirs, waterways and control structures. It is based on the LabVIEW data acquisition software from National Instruments. All the structures are described by their hydraulic function in the simulated network, like diversion, storage in reservoirs or routing in channels. These functions, represented by module icons, can be assembled on a screen window by simply wiring the different icons together with the help of the mouse. This defines the connections between the modules and thus the flow direction of data and water. Very large and complex networks can be modeled and analyzed with Routing System, which furthermore enables analysis at different scales by the grouping of sub systems.

The global analysis of a hydraulic system is required in many cases, like the design and optimal operation control of spillways of hydraulic schemes, as well as the design and optimization of flood protection measures. Routing System, associated with its numerical engine LabVIEW, enables these analysis in a very simple way thanks to its graphical programming language and its fully open architecture for further developments by the user.

1. Introduction

Sur l'ensemble de la planète, l'utilisation de l'eau à des fins d'irrigation, d'alimentation en eau potable, de production hydroélectrique ou encore de navigation se caractérise par une grande diversité d'aménagements hydrauliques. Chaque aménagement regroupe généralement de nombreuses constructions qui influencent le cheminement naturel de l'eau à travers son bassin versant. La possibilité de modéliser l'ensemble du comportement d'un tel système autorise une meilleure gestion des aménagements aussi bien en phase d'exploitation qu'en situations de crues.

Routing System est un outil de calcul numérique développé à cette fin sur le principe d'une description fonctionnelle des éléments d'un système d'écoulements en nappe libre. Fondamentalement, six fonctions élémentaires suffisent à cette description. Il s'agit de la génération d'hydrogrammes, du transport, de la bifurcation, de la jonction, de la régulation et du stockage du débit.

Routing System a été développé dans l'environnement de programmation graphique du logiciel LabVIEW de National Instruments, qui sert d'outil de modélisation et de moteur de calcul. Cette option permet de profiter de l'ensemble des possibilités offertes par LabVIEW, que ce soit pour la construction d'un réseau ou pour l'analyse et la représentation graphique des résultats. Dans ce monde virtuel ludique, les fonctions se présentent sous forme d'icônes qu'il s'agit de relier entre elles pour permettre le flux des informations dans le sens correspondant à celui des écoulements gravitaires.

Dans ce concept de modélisation, tout est fonction. Les bassins versants ont une fonction de production, les prises d'eau ont une fonction de répartition du débit, les cours d'eau ont une fonction de

transport, les lacs et les bassins stockent, les confluences additionnent,... Les données qui circulent dans le système sont également des fonctions, par exemple les hydrogrammes, les limnigrammes, les relations hauteur-débit, hauteur-volume, débit entrant-débit dérivé,... Il en résulte une représentation descriptive où seuls les comportements hydrauliques sont considérés en faisant abstraction de la structure organique des ouvrages modélisés.

Ces considérations peuvent surprendre par l'effort d'abstraction qu'elles requièrent. Elles sont pourtant à la base de simplifications considérables dans la modélisation de systèmes complexes, dont le lecteur puis l'utilisateur ne tarderont pas à prendre conscience.

2. Origine du projet

Le concept général et l'organisation du logiciel Routing System trouvent leurs origines à la fois dans le projet HydroInvent réalisé par le LCH en 1994 et dans le programme LabVIEW de National Instruments dédié à l'acquisition et le traitement des données sur ordinateur.

En 1993, en marge du projet de recherche CRUEX, l'Office Fédéral de l'Economie des Eaux a confié au Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) le mandat de développer un concept et une structure de base de données permettant de décrire et d'inventorier les aménagements hydrauliques de Suisse. L'application de ce concept devait être orientée vers le développement d'un outil informatique permettant la saisie, la conservation et la consultation de l'information. Le potentiel hydroélectrique de la Suisse étant en majeure partie équipé, il en résulte un grand nombre d'aménagements dont la documentation est principalement chez les sociétés exploitantes, les bureaux d'ingénieurs et différents offices cantonaux et fédéraux. L'objectif visé par le projet baptisé HydroInvent était de faciliter l'accès à cette information, dont l'utilité est évidente pour les activités de contrôle et sécurité, surveillance et planification, ainsi que pour l'exploitation et le dimensionnement. Cette étude a débouché, entre autres, sur la description fonctionnelle des systèmes hydrauliques, qui est reprise dans le cadre du programme Routing System. Cette description fonctionnelle est à la base du concept de modélisation Routing System. Afin d'explicitement la différence et la complémentarité des descriptions « fonctionnelle » et « organique » des aménagements hydrauliques, le concept développé dans le cadre d'HydroInvent est résumé au paragraphe suivant.

Le second élément à l'origine de Routing System est l'environnement de programmation LabVIEW. Doté de riches bibliothèques de fonctions et dévolus en premier lieu à l'acquisition, à l'analyse et à la présentation des données, LabVIEW repose sur la technique du « Data Flow Programming » par l'intermédiaire de son langage de programmation graphique dénommé G. Cela implique que l'ordre d'exécution est déterminé par le flux des données entre les blocs, c'est-à-dire entre les procédures, et non pas par la séquence des lignes de code, ce qui permet la création de programmes multitâches qui exécutent plusieurs parties du code en parallèle.

Le chapitre 2.1 ci-dessous reprend la description des aménagements hydrauliques telle qu'elle a été élaborée dans le projet HydroInvent. Cette description est à la base du principe de modélisation de Routing System.

2.1 Description des aménagements hydrauliques

2.1.1 Problématique

2.1.1.1 Sémantique

Les ouvrages hydrauliques représentent typiquement un domaine où la normalisation est quasi inexistante. L'imagination et l'expérience accumulées par chaque constructeur sont généralement à l'origine des solutions et des choix constructifs. Il résulte de cette liberté de conception un parc d'ouvrages hydrauliques très variés et adaptés de cas en cas aux conditions locales.

L'informatique, par contre, impose une structure rigide et des définitions précises au modèle des données. Cette rigueur convient

bien aux domaines très structurés comme la comptabilité, mais s'adapte plus difficilement à la richesse constructive des ouvrages hydrauliques.

En raison de la complexité des objets qu'il décrit, le langage de l'ingénieur hydraulicien est délicat à transcrire en termes de base de données. Bien qu'il paraisse rigoureux et rationnel, il peut être dans certain cas flou, imprécis, voir paradoxal :

- Il n'y a pas de relation univoque entre les termes de l'ingénieur et les éléments qu'ils sont censés décrire.

Le concept de prise d'eau peut désigner deux objets d'essence différente. S'agit-il d'une prise d'eau en rivière ou d'une prise d'eau usinière dans une retenue ?

- La variabilité de certains éléments nommés par l'ingénieur est telle qu'une description systématique est impossible.

Concernant les prises d'eau en rivière, peut-on décrire chacune d'elle par un jeu unique de paramètres et d'attributs ? A l'évidence, la réponse est non. L'inventaire des prises d'eau risque de n'être qu'un catalogue d'exceptions par rapport à une description standard.

- La frontière, en terme d'appartenance, entre deux objets peut être délicate à tracer.

Un dessableur peut « faire partie » de la prise d'eau qui l'alimente, être « autonome », ou « faire partie » de la galerie aval. Le choix ne se fera-t-il pas sur des critères de distances ou de fonctionnement, ou plus simplement d'usage ?

- Le pouvoir agrégatif de certains termes communs peut amener à des impasses.

La locution « Barrage de Z » fait référence parfois au seul barrage de Z, mais fréquemment aussi à la retenue qu'il crée.

Dans ce cas, comment fera-t-on référence à une retenue créée par deux barrages ?

Ces difficultés sémantiques, illustrées ici par l'exemple de la prise d'eau apparaissent également pour les termes d'évacuateur, d'usine, de barrage, etc. Néanmoins, cette imprécision apparaît principalement dans la description « à grande échelle » des aménagements. Ce niveau de description générique correspond à un usage et doit donc être géré comme tel par la base de données.

A « l'échelle du détail », ces ambiguïtés disparaissent : un orifice sera toujours compris comme une ouverture dans une paroi, un déversoir restera un déversoir. Ainsi, si une description précise des aménagements basée sur des objets complexes semble impossible, il reste à décomposer ces objets en éléments simples. Le postulat énoncé ici est que tout aménagement peut être décrit sous la forme d'une combinaison d'éléments de base tels que déversoirs, transitions, jonctions, volume de stockage, etc...

Nous appellerons « élément » chaque partie physique du réseau hydraulique correspondant à l'une de ces briques de base et « objet » le groupe de paramètres le décrivant. La liste de ces briques de base, établie sous la forme d'un arbre des classes, est le premier concept développé dans HydroInvent.

Les objets complexes, ou les acceptions qu'ils représentent, sont ainsi construits comme des listes ou des agrégations d'objets atomiques. Ils seront dotés, si cela est possible et utile, de paramètres génériques.

2.1.1.2 Structure

La représentation des aménagements et organes hydrauliques doit satisfaire aux objectifs suivants :

- Le parcours de l'eau au travers les aménagements doit pouvoir être constitué.

Les précipitations tombant sur le bassin versant A contribuent à former le débit mesuré par la station X. Une partie de ce débit est captée par la prise B, acheminée par la galerie C, puis stockée dans le bassin D avant d'être turbinée à la centrale E et restituée à la rivière F.

- Les données doivent pouvoir être manipulées à des niveaux d'agrégation différents en fonction de l'échelle d'étude.

A grande échelle, la prise d'eau B est définie par le débit qu'elle capte. Observée de plus près, elle apparaît constituée d'un barrage sur le cours d'eau équipé d'un évacuateur de crues ainsi que d'un déversoir alimentant un dessableur. A l'échelle la plus fine, l'évacuateur de crues est représenté comme plusieurs déversoirs vannés, séparés par des piles arrondies. Il est suivi d'un coursier et d'un bassin amortisseur.

- Les éléments peuvent être créés ou consultés à des niveaux de richesse différents.

Suivant la richesse des informations disponibles ou désirées, le déversoir sera caractérisé par son débit de dimensionnement ou par la forme précise de sa crête et de la vanne.

Ces objectifs induisent les règles suivantes :

- La base de données doit contenir les informations topologiques permettant de lier les éléments entre eux.

Les données définissant la prise d'eau B doivent d'une part décrire ses dimensions et sa fonction, mais aussi indiquer qu'elle reçoit les eaux du bassin versant A et qu'elle alimente la galerie C.

- Les données définissant un élément doivent permettre de connaître les sous-éléments qu'il agrège.

La prise d'eau A contient la liste des sous-éléments qui la composent (le barrage, l'évacuateur, le dessableur, ...). De même, l'évacuateur est composé de plusieurs déversoirs vannés et du bassin amortisseur.

- Une description détaillée d'un élément doit contenir la description simplifiée qui le caractérise.

Le déversoir de la prise A doit être défini tant comme un déversoir de forme X surmonté d'une vanne de forme Y que comme un organe permettant d'évacuer un certain débit Q.

En conséquence, les éléments placés dans la base de données seront connectés par trois types de liens : les liens topologiques, les liens d'appartenance et les liens de richesse. C'est précisément dans la gestion de ces liens que réside la difficulté de la description et de la modélisation d'un système hydraulique quelconque (figure 1).

Les règles énoncées ci-dessus ont permis d'analyser un modèle de données classique et de valider le modèle fonctionnel retenu.

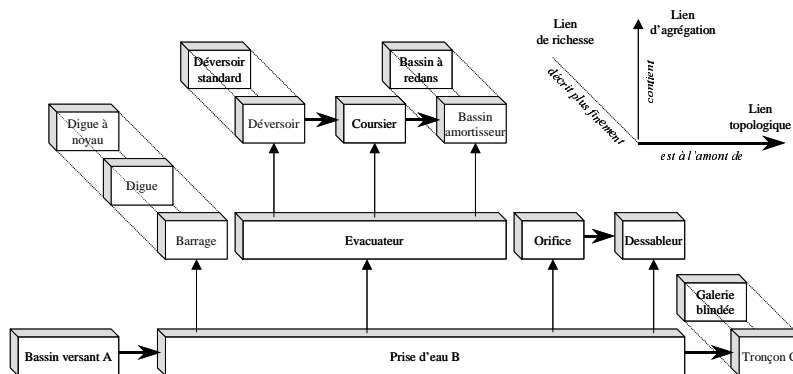


Figure 1 : Liens topologique, d'appartenance et de richesse.

2.1.1.3 Modèle classique

Les logiciels de réseaux classiques gèrent la topologie à l'aide de deux types d'éléments : les tronçons qui acheminent le débit (segment de cours d'eau, de conduite, ...) et les nœuds (chambre, singularité, retenue, ...). Les liens topologiques sont généralement stockés dans chaque tronçon sous la forme d'identificateurs des nœuds amont et aval du tronçon. Les règles correspondantes sont simples mais rigides. Chaque tronçon doit être précédé d'un seul nœud et suivi d'un seul autre.

Cette contrainte rend difficile la gestion d'éléments tels que les transitions, les vannes, etc. Ceux-ci peuvent être considérés comme des tronçons qui acheminent du débit. Sur la base de cette classification, la base de données devra contenir des nœuds fictifs sans signification physique, par exemple entre un canal et une transition ou entre une transition et un déversoir. En considérant ces éléments comme des nœuds, il faudra alors créer des tronçons fictifs, par exemple entre une transition et un déversoir.

Cette représentation « nœuds – tronçons » est incapable de gérer les liens d'appartenance. Dans cet objectif, elle peut être améliorée

afin de permettre la manipulation d'éléments composites. Il s'agirait alors de « méta-nœuds » et de « méta-tronçons » pouvant être chacun formés de plusieurs nœuds et tronçons, mais devant respecter les règles topologiques précédentes, et héritant donc des mêmes limitations.

Pour ces diverses raisons, le modèle habituel « nœuds – tronçons » ne peut être appliqué ici.

2.1.2 Description fonctionnelle

2.1.2.1 Fonction hydraulique

Selon le postulat énoncé plus haut, le réseau hydraulique peut être décomposé en éléments de base caractérisés par leur fonction hydraulique. Ces éléments de base, en plus de la description de leur fonction (acheminement, stockage, ...) doivent pouvoir être reliés à ceux qui les entourent. L'élément le plus simple, permettant de manipuler la topologie du réseau, est donc un contenant, c'est-à-dire une boîte vide pouvant avoir n entrées et m sorties de débit. En terme de base de données, cet objet n'est constitué que d'une liste de liens amont et d'une liste de liens aval (figure 2). Nous appellerons ainsi fonction hydraulique tout objet de la base de données possédant de telles listes de liens.

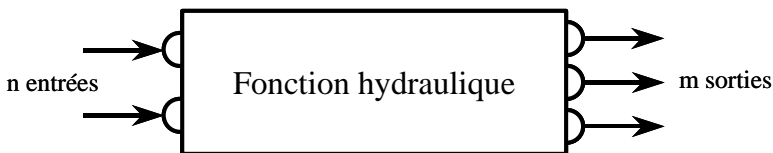


Figure 2 : Définition schématique d'une fonction hydraulique.

Suivant cette définition, l'ensemble du réseau est constitué de fonctions hydrauliques : tout est fonction !

A cet objet de base pourront être associées des méthodes de traitement ou de calcul élémentaire dans la base de données, telle que le comptage et la recherche des éléments placés en amont ou en aval. La représentation cartographique d'une fonction hydraulique générique est rigoureusement impossible. Elle peut cependant être symbolisée graphiquement par une icône ainsi que par ses liens.

2.1.2.2 Spécialisation et héritage

Telle quelle, cette brique de base ne revêt qu'un intérêt limité pour décrire un système hydraulique. Il faut donc introduire des informations supplémentaires dans cette boîte vide pour créer de nouvelles classes d'objets dérivés de la fonction hydraulique de base. Afin d'éviter toute ambiguïté et d'assurer la cohérence, cette spécialisation doit respecter les règles suivantes :

- Les objets spécialisés doivent représenter des ensembles disjoints d'éléments.
- L'ensemble des objets spécialisés doit englober l'ensemble des éléments que l'on souhaite décrire plus finement.
- Cette spécialisation doit correspondre à un enrichissement cohérent de l'information. Une description très détaillée ne doit pas apparaître au même niveau qu'une description plutôt globale.
- Chaque information doit être unique : les propriétés supplémentaires correspondant à un enrichissement ne doivent pas être redondantes avec des propriétés déjà stockées.

L'enrichissement d'une classe d'objets correspond à une classification des éléments que représente cette classe. Ces nouvelles classes d'objets, filles de l'objet fonction hydraulique, héritent des propriétés et des méthodes de leur classe parent.

2.1.2.3 Fonctions hydrauliques élémentaires

Spécialisation et héritage ne peuvent se définir que d'après une typologie des éléments rencontrés. Dans l'objectif d'une représentation hydraulique, cette typologie se base sur l'opération hydraulique propre à l'élément du réseau. L'enrichissement correspond donc à la description de l'opération réalisée. Le tableau 1 donne ces fonctions élémentaires ainsi que leurs principaux attributs.

A ce niveau de représentation, il est possible de doter les objets d'attributs géographiques permettant de positionner rigoureusement l'élément décrit. Ces objets hériteront des méthodes de l'objet « fonction hydraulique » et pourront posséder leurs méthodes propres.

2.1.2.4 Fonctions hydrauliques détaillées

Ce modèle de données peut encore être enrichi afin de décrire de plus en plus finement le fonctionnement du système. Ainsi, pour l'objet Transport, le niveau suivant de spécialisation serait de décrire ses paramètres hydrauliques. Cela fait apparaître trois classes d'objets filles de l'objet transport : les objets à section constante, les pertes de charges locales et les fonctions de transition.

L'ensemble du modèle de données ainsi défini peut être représenté sous la forme d'un arbre des classes où chaque case représente une classe d'objets et chaque lien une relation de spécialisation/héritage (figure 3).

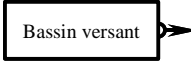



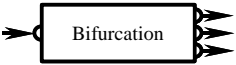

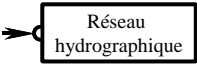
<i>Type de fonction</i>	<i>Opération hydraulique</i>	<i>Type de liens</i>	<i>Attributs graphiques</i>	<i>Information</i>
Bassin versant	Génère du débit		surface	Surface Identificateur (ID) du cours d'eau
Transport	Transporte du débit		ligne	Capacité de transport
Jonction	Ajoute des débits		Point	
Stockage	Stocke des volumes		surface	Loi Hauteur-Volume
Bifurcation	Sépare des débits		point	Loi Débit amont- Débit aval
Régulation	Transforme un débit		point	Loi Condition amont- Débit aval
Milieu naturel	Reçoit un débit		point	ID du cours d'eau

Tableau 1 : Fonctions hydrauliques élémentaires

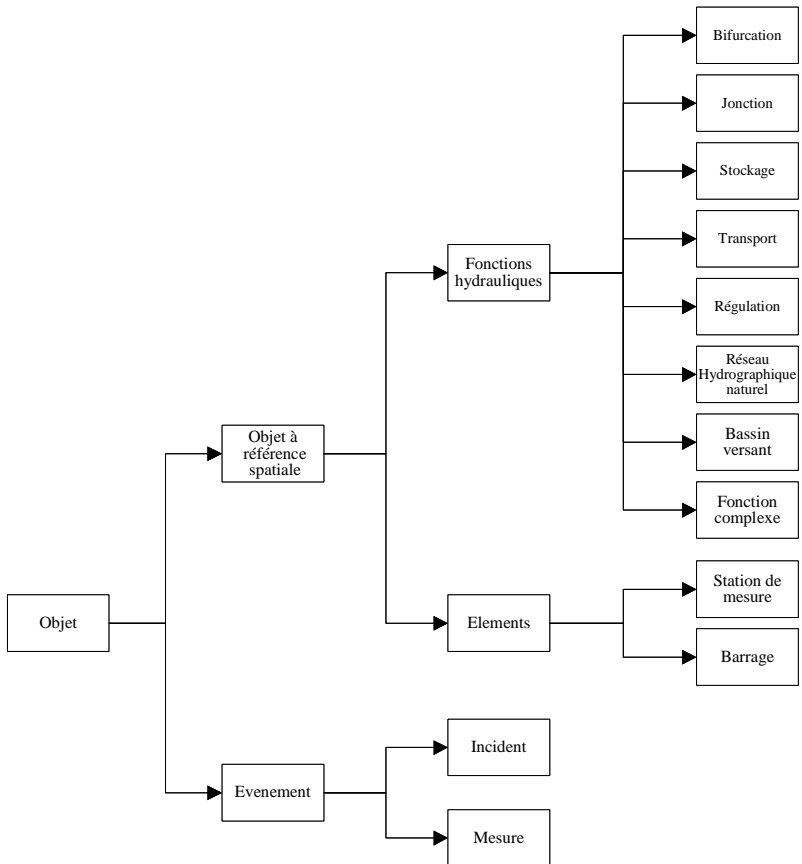


Figure 3 : Arbre des classes

2.1.3 De l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique

2.1.3.1 Fonctions hydrauliques complexes

Tel quel, le modèle des données permet de répondre aux règles concernant les liens topologiques et les liens de richesse

d'information tout en conservant une structure simple permettant de systématiser nombres de traitements.

L'analyse des aménagements hydrauliques peut donc être envisagée à différentes échelles en fonction du but recherché. Pour une consultation statistique ou l'établissement de bilans, une vision globale de l'ensemble des aménagements d'un pays ou d'une région s'avère nécessaire. Pour mesurer l'influence des ouvrages construits sur le cheminement naturel de l'écoulement, l'échelle de l'aménagement est adéquate. Elle permet, à l'image du prospectus descriptif d'un aménagement, de décrire globalement le réseau constitué par les systèmes d'adduction et les ouvrages principaux. Pour une étude de détail et pour quantifier la répartition précise des débits, la petite échelle au niveau des ouvrages devient indispensable.

Afin de satisfaire à ces multiples exigences, la notion de fonction complexe est proposée. Ce terme désigne une agrégation d'ouvrages élémentaires qui représentent une unité géographique et fonctionnelle. Ainsi, à l'échelle de l'aménagement, un barrage, sa retenue et ses ouvrages annexes ne représentent qu'une seule unité, de même qu'un ensemble de galeries, de puits, de canaux et de conduites ne forme qu'un seul collecteur d'adduction.

Les fonctions complexes servent donc principalement à la description globale du réseau composé par les ouvrages hydrauliques. Elles permettent de présenter un aménagement de manière simplifiée. Chaque fonction complexe contient la liste des fonctions hydrauliques ou des objets qu'elle agrège ainsi que les liens entre les objets agrégés et ses entrées et sorties.

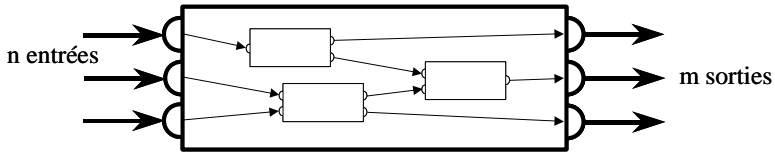


Figure 4 : Fonction complexe

Cette approche est récursive. Une fonction complexe étant une fonction hydraulique, elle peut être agrégée au sein d'une autre fonction complexe. Cela permet de créer différentes visions d'un aménagement, adaptées chacune à l'échelle d'étude en agrégeant au sein de fonction complexes tous les objets dont le détail ne présente pas d'intérêt.

Ainsi, à grande échelle, une prise d'eau est une fonction complexe dont l'attribut est la liste des fonctions agrégées (stockage, évacuateur, orifice, jonction). A une échelle plus détaillée, l'évacuateur de cette prise d'eau est perçu comme une fonction complexe contenant différentes fonctions hydrauliques, comme changement de section, déversoir, coursier et saut de ski par exemple. A l'échelle atomique, tous les objets sont considérés individuellement et leurs attributs fonctionnels et organiques peuvent être manipulés. Cette vision à différentes échelles est illustrée par l'exemple d'une prise d'eau par les figures 5 à 7.

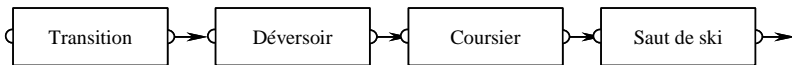


Figure 5 : Vision d'une prise d'eau à l'échelle atomique

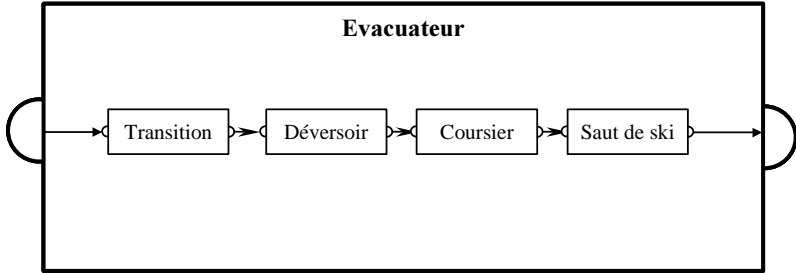


Figure 6 : Vision d'une prise d'eau à une échelle moyenne.

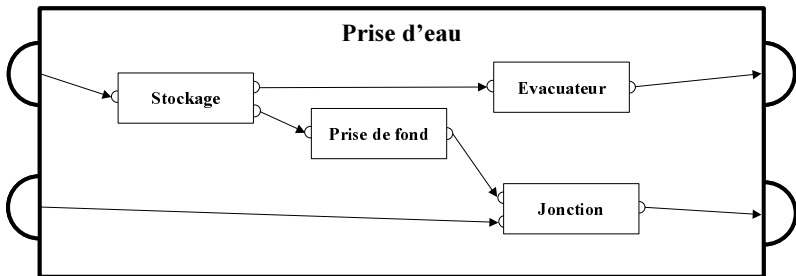


Figure 7 : Vision d'une prise d'eau à grande échelle.

La souplesse de cette structure de la base de données permet de reproduire la perception usuelle d'un aménagement. Elle permet également de gérer souplement les opérations de mise à jour et de maintenance. Faute de données, une prise d'eau peut être définie comme une fonction complexe ne contenant qu'un objet de type bifurcation. Pour affiner ultérieurement la description de cette prise d'eau, il suffira de remplacer l'objet bifurcation par une série d'objets plus détaillés, et ce sans s'occuper des liens de cette prise d'eau avec les objets qui l'entourent.

2.1.3.2 Fonctions complexes standard

Ces fonctions complexes peuvent être spécialisées afin de permettre la gestion d'objets complexes standard. Ainsi, l'objet aménagement est une fonction complexe contenant la liste des objets appartenant à cet aménagement ainsi que les attributs permettant de le définir (propriétaire, exploitant,...). L'objet prise d'eau est une fonction complexe contenant des attributs tels que débit dérivé ou type d'exploitation. fondamentalement, cinq fonctions complexes standard ont été définies :

- L'aménagement : Un aménagement représente un ensemble d'ouvrages qui appartiennent, par exemple, à un même propriétaire.
- La prise d'eau : Une prise d'eau est une combinaison variée d'ouvrages simples, comme par exemple un barrage, une retenue, un évacuateur, un dessableur, un orifice,... Elle possède des caractéristiques propres comme un débit dérivé ou un débit de dotation.
- Le tronçon : Un tronçon est un système d'adduction d'eau (galeries, canaux, etc.).
- La centrale hydroélectrique : Une centrale réunit plusieurs groupes de turbines ou de pompes.
- Le bassin versant total : Le bassin versant total est la réunion de tous les sous-bassins versants d'un aménagement.

Cette liste de fonctions complexes standard n'est pas exhaustive.

2.1.4 Description organique

L'un des objectifs du projet HydroInvent était de fournir les caractéristiques dimensionnelles nécessaires à la description du fonctionnement hydraulique des ouvrages. Ces caractéristiques

permettent par exemple le calcul des courbes hauteur-débit d'un élément ou d'un ouvrage, constitué de plusieurs éléments, dans toutes les situations possibles de fonctionnement. L'étape suivante d'enrichissement décrit les caractéristiques géométriques et physiques de l'élément. Il s'agit de la description organique du système.

Si cette description organique peut permettre de générer la description fonctionnelle par le biais de méthodes propres à l'objet, elle ne s'y substitue cependant pas. Par exemple, la section, la pente et la rugosité d'une conduite permettent de calculer sa capacité de transport, c'est-à-dire sa fonction hydraulique au sein du réseau analysé, seule information réellement nécessaire à une simulation du système.

Pour chaque élément, il est alors possible d'établir une fiche avec toutes les indications dimensionnelles et constructives indispensables au calcul hydraulique. Cette description organique peut être affinée suivant les besoins désirés de l'application et les données disponibles.

2.1.5 Attributs de gestion

La classe d'objets « fonction hydraulique », si elle permet de manipuler les éléments constitutifs du réseau hydraulique, ne suffit pas à gérer l'ensemble des informations désirées. Elle hérite des propriétés et méthodes de la classe « objet à référence spatiale » qui elle-même hérite de la classe de base « objet ». Ces classes d'objet possèdent surtout des attributs de gestion qui permettent la mise à jour et le traitement des données.

Un objet à référence spatiale est caractérisé par des coordonnées permettant de le positionner sur le territoire, par l'identificateur de l'objet aménagement auquel il appartient et par une clé permettant de déterminer sa visibilité en fonction de l'échelle d'étude.

Les objets ne faisant pas partie du réseau mais qui se trouvent sur le territoire, tels que les barrages ou les stations de mesure, héritent de la classe « objet à référence spatiale ».

Les objets n'ayant pas de référence spatiale mais devant être conservés dans la base héritent de la classe « objet ». On y retrouve la description des incidents survenus dans le système, les séries de mesures, voire les comptes rendus d'inspection des ouvrages.

2.1.6 Données événementielles

Avec la description détaillée de tous les éléments de l'aménagement, le cheminement de l'eau et la capacité des différentes parties de l'ouvrage peuvent être déterminés. Le débit de rejet peut être calculé en fonction des consignes d'exploitation et son influence sur le récepteur est donc connue. De la même manière, les débits soutirés des cours d'eau sont déterminés. Pour dimensionner des ouvrages ou pour étudier l'interaction entre le bassin versant et l'aménagement, il faut aussi connaître le débit du cours d'eau résultant de la pluie sur le bassin versant. Des événements de pluie ou de crue présentant un intérêt seront donc inclus dans l'inventaire des aménagements hydrauliques.

2.2 LabVIEW

Avant de décrire la programmation des fonctions hydrauliques de Routing System, il est utile de présenter un aperçu de l'environnement de développement LabVIEW. Cette description

s'inspire très largement du « Guide d'évaluation », édition de juillet 1998, publié par National Instruments¹, auteur de ce logiciel.

2.2.1 Description générale

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) est un environnement de développement basé sur le langage de programmation graphique G. LabVIEW est entièrement intégré pour assurer une communication avec le matériel *GPiB*, *RS-232*, *RS-485* ainsi que les cartes d'acquisition de données. LabVIEW dispose aussi de bibliothèques intégrées conçues pour les standards logiciels comme la gestion de données TCP/IP et ActiveX.

Grâce à LabVIEW, il est possible de créer des programmes compilés 32 bits qui offrent les vitesses d'exécution nécessaires pour des solutions d'acquisition de données, de test et de mesure personnalisées. Il est également possible de créer des exécutables autonomes étant donné que LabVIEW est un véritable compilateur 32 bits.

L'usage de LabVIEW ne nécessite pas une grande expérience préalable en programmation. En effet, LabVIEW utilise une terminologie, des icônes et des concepts familiers aux techniciens, scientifiques et ingénieurs. En outre, il s'inspire de symboles graphiques plutôt que du langage textuel pour décrire des opérations de programmation.

LabVIEW contient des bibliothèques étendues spécialisées dans la collecte, l'analyse, la présentation et le stockage de données. Il intègre en outre une panoplie complète d'outils de développement de programmes conventionnels, qui permettent de définir des points

¹ LabVIEW™, NI-DAQ™, natinst.com™ et National Instruments™ sont des marques déposées de National Instruments Corporation.

d'arrêt, animer l'exécution du programme pour visualiser son fonctionnement, et exécuter pas à pas le programme. Le développement et la mise au point du programme s'en trouvent ainsi facilités.

LabVIEW offre également un grand nombre de mécanismes spécialisés dans la connexion au code externe ou à des logiciels via des DLL, des bibliothèques partagées ou ActiveX, pour n'en citer que quelques-uns.

2.2.2 Fonctionnement de LabVIEW

Tous les programmes de LabVIEW, communément appelés *instruments virtuels* (VIs), se composent d'une *face-avant* et d'un *diagramme*. Les *palettes* de LabVIEW contiennent un certain nombre d'options qui servent à créer et à modifier les VIs. Cette section présente la face-avant, le diagramme et les palettes de LabVIEW. Elle fait aussi un tour d'horizon de l'exécution des programmes par *flux de données*, propre à LabVIEW.

2.2.2.1 La face-avant

La face-avant est l'interface utilisateur graphique du VI LabVIEW. Cette interface réceptionne les données entrées par l'utilisateur et affiche celles fournies, en sortie, par le programme. Cette face-avant peut contenir des boutons rotatifs, des boutons-poussoirs, des graphes, et d'autres sortes de commandes ou d'indicateurs.

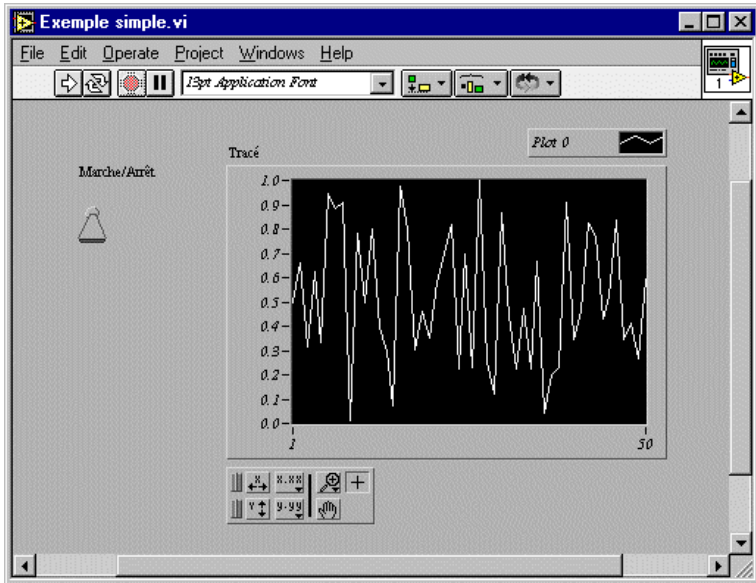


Figure 8 : Exemple d'une face-avant avec une commande (marche/arrêt) et un indicateur (Tracé).

2.2.2.2 Le diagramme

Le diagramme contient le code source graphique du VI. Il permet de programmer le VI pour contrôler et remplir des fonctions sur les entrées et sorties créées dans la face-avant.

Le diagramme peut contenir des *fonctions* et des *structures* issues des bibliothèques de VIs intégrées à LabVIEW. Il peut aussi contenir des *terminaux* associés à des commandes et à des indicateurs créés dans la face-avant.

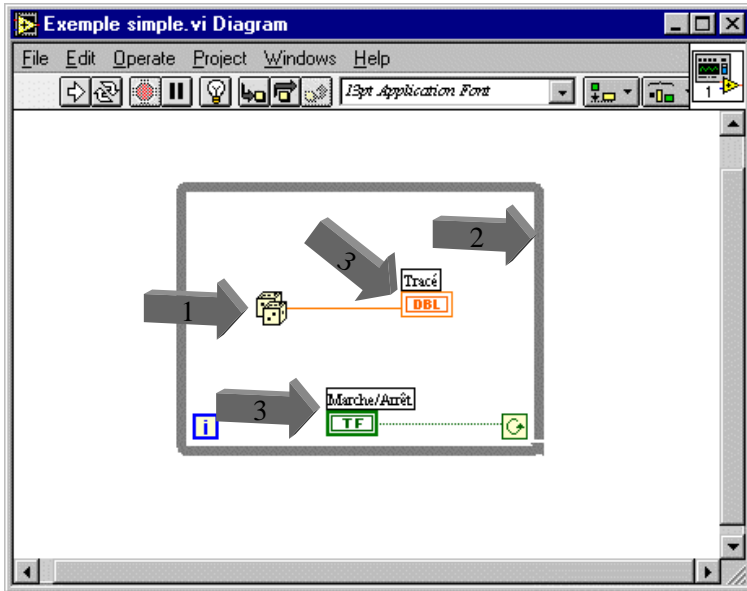


Figure 9 : Exemple d'un diagramme avec 1) une fonction ; 2) une structure et 3) les terminaux de la face-avant.

2.2.2.3 Les palettes

Les palettes de LabVIEW offrent les options nécessaires pour créer et éditer la face-avant et le diagramme.

La palette d'outils

La *palette d'outils* s'utilise aussi bien dans la face-avant que dans le diagramme. Elle contient les outils nécessaires pour éditer et mettre au point les objets du diagramme et de la face-avant.



Figure 10 : La palette des outils.

La palette de commandes

La *palette de commandes* s'utilise dans la face-avant uniquement. Elle contient les commandes et les indicateurs de face-avant qui servent à créer l'interface utilisateur.



Figure 11 : La palette de commandes.

La palette de fonctions

La *palette de fonctions* s'utilise dans le diagramme uniquement. Elle contient les objets qui servent à programmer un VI, comme par

exemple des opérations arithmétiques, d'E/S d'instrument, d'E/S sur fichiers et d'acquisition de données.



Figure 12 : La palette de fonctions.

2.2.2.4 Le flux de données

Les VIs de LabVIEW suivent le concept d'exécution de programmes par flux de données. Le diagramme se compose de *noeuds*, tels que des VIs, des structures ou des terminaux de la face-avant. Ces noeuds sont reliés entre eux par des *files*, qui définissent le flux de données à travers le programme.

L'exécution d'un nœud n'a lieu que lorsque toutes ses entrées sont disponibles. Dès qu'un nœud a fini de s'exécuter, il transfère toutes ses sorties au prochain nœud dans le chemin de flux de données.

3. Concept général de Routing System

Routing System est né durant le printemps 1996 au Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Il est le fruit du besoin d'un outil pratique et efficace pour la simulation numérique du routage de crue dans des aménagements hydrauliques complexes et de la découverte du logiciel LabVIEW.

3.1 Routage des crues

En Suisse, la majeure partie du potentiel hydroélectrique est équipée. Il en résulte un grand nombre d'aménagements hydrauliques sur le plateau et dans les Alpes. Chaque aménagement regroupe également de nombreuses constructions qui influencent le cheminement naturel de l'eau à travers son bassin versant. La possibilité de modéliser l'ensemble du comportement des bassins versants aménagés autorise une meilleure gestion des aménagements en phase d'exploitation ou en situation de crue. La sécurité des aménagements peut également être mieux évaluée en analysant globalement l'ensemble du système hydraulique.

Le système peut être complexe, avec plusieurs entrées, plusieurs sorties et un ensemble de consignes de régulation et d'exploitation. La modification d'un élément de ce système peut avoir des répercussions sur l'ensemble de l'aménagement, ceci dans des proportions difficiles à évaluer au premier abord.

Au lieu d'aborder cette complexité de front, Routing System propose une approche par une succession d'étapes simples. Pour illustrer cette démarche, un système hydraulique relativement simple est présenté à la figure 13.

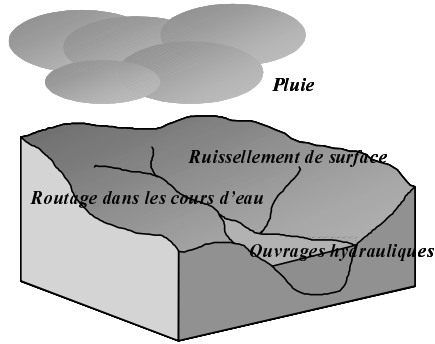


Figure 13 : Représentation schématique du bassin versant direct d'une retenue.

Ce système considère une pluie qui tombe sur le bassin versant direct d'une retenue créée par un barrage muni d'un évacuateur de crue (déversoir). Par découpage, cette situation peut être modélisée par les éléments fonctionnels décrits à la figure 14.

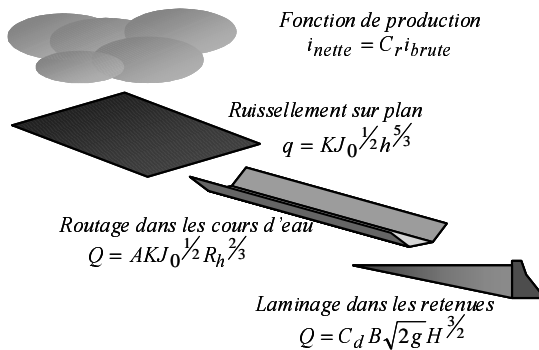


Figure 14 : Décomposition fonctionnelle de la figure 13 en éléments distincts.

La quantité de pluie nette qui tombe sur le bassin versant est décomposée en pluie brute et en infiltration à l'aide d'une fonction dite de production. Dans le cas de la figure 14, la fonction de

production admet une infiltration proportionnelle en ne considérant qu'un coefficient de ruissellement C_r constant. La pluie nette engendre ensuite un hydrogramme de crue, ici à l'aide d'un modèle d'onde cinématique sur plan. Cet hydrogramme est ensuite acheminé par un cours d'eau jusque dans la retenue. Ce transport de débit s'accompagne d'un changement de forme de l'hydrogramme entre l'amont et l'aval du cours d'eau. Finalement, la crue est laminée par la retenue, équipée d'évacuateurs de surface.

Considéré sous cet angle, le système étudié, dont la réaction globale reste complexe, n'est composé que d'éléments relativement simples à calculer. En fait, la complexité ne découle que du grand nombre d'interactions entre éléments simples.

Grâce aux réflexions présentée au chapitre 2, concernant le projet HydroInvent de base de données des aménagements hydrauliques, il est maintenant possible de définir ces éléments simples qui, une fois assemblés, peuvent décrire n'importe quel réseau hydraulique.

3.2 Fonctions hydrauliques de base

Le concept HydroInvent présenté au chapitre 2 a permis de définir les 7 fonctions hydrauliques élémentaires, présentées dans le tableau 1. D'un point de vue fonctionnel, le milieu naturel ou milieu récepteur qui y est mentionné n'est pas à proprement parlé une fonction hydraulique, mais plutôt une sortie du domaine considéré. Par conséquent, 6 fonctions hydrauliques de base peuvent être conservées :

- La génération des débits. Sous cette appellation générale se regroupent toutes les méthodes et modèles hydrologiques.
- La séparation des débits. Cette fonction générale est à même de représenter aussi bien un simple orifice disposé dans une retenue qu'une prise d'eau complexe comportant un barrage,

une retenue, un évacuateur, un dessableur, ou encore un ouvrage de déversement latéral dans un système de protection contre les crues.

- Le transport du débit. Mis à part son rôle d'acheminement du débit d'un point vers un autre, cette fonction modifie les hydrogrammes, en particulier leur débit de pointe, lorsqu'elle est considérée en comportement instationnaire.
- L'addition des débits. Cette fonction simple simule la confluence des divers flux dans un réseau hydraulique.
- Le stockage des débits. Elle permet le calcul du laminage de crue dans une retenue.
- La régulation des débits. Cette fonction particulière de Routing System permet de générer les relations fonctionnelles de différents ouvrages de régulation (déversoir, orifice, hauteur normale, hauteur critique), ainsi que les centrales hydroélectriques, pour les introduire ensuite dans les autres fonctions de base.



Figure 15 : Les 6 fonctions hydrauliques de base de Routing System.

Uniquement à l'aide de ces 6 fonctions hydrauliques de base, il est possible de modéliser n'importe quel système hydraulique, comme le montre l'exemple du chapitre suivant.

3.3 Exemple de développement d'un modèle de routage

Le mode d'exécution par flux de données d'un programme LabVIEW, *the data flow programming technique*, s'apparente admirablement bien au flux des écoulements dans un réseau hydraulique. Dès qu'une fonction a été calculée, et qu'un hydrogramme a été obtenu à sa sortie, il devient l'hydrogramme entrant dans la fonction située à l'aval, qui peut dès lors se calculer, et ainsi de suite.

Une autre fonctionnalité de LabVIEW permet de répondre aux besoins soulevés au chapitre 2 concernant l'étude à différentes échelles. Un modèle développé avec LabVIEW peut être enregistré sous la forme d'un VI (*Virtual Instrument*) et être réutilisé au sein d'un autre modèle. Ce processus permet la modélisation d'un réseau hydraulique à différentes échelles. L'assemblage de plusieurs fonctions hydrauliques de base devient ainsi une nouvelle fonction hydraulique, une fonction complexe. Cette dernière peut représenter le fonctionnement hydraulique d'une région géographique, d'une partie d'un aménagement hydraulique ou d'un aménagement dans son ensemble.

Grâce à ces deux particularités du logiciel LabVIEW, les liens topologiques et les liens d'agrégation définis sur la figure 1 peuvent être traités aisément. Les liens de richesse seront approchés en proposant différents modèles mathématiques, des plus simples aux plus détaillés, pour modéliser les fonctions hydrauliques de base.

Afin d'illustrer cette approche conceptuelle, un exemple est présenté en détail ci-dessous.

3.3.1 Enoncé du problème

Up City, une charmante cité nichée dans une région montagneuse, a souffert d'une urbanisation galopante depuis quelques décennies. Les travailleurs de la grande agglomération de Sim City apprécient tout particulièrement sa tranquillité et beaucoup d'entre eux ont choisi de s'y installer. Une des conséquences de cette urbanisation est l'augmentation des débits de pointe de la Little River qui vient de Up City et coule en direction de Sim City.

Au cœur du centre historique de Sim City se trouve un vieux pont romain, à arches, dont la capacité hydraulique est limitée à $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur est maintenant fréquemment dépassée durant les orages estivaux, ce qui entraîne des inondations importantes dans les bas quartiers.

Au début du 20^{ème} siècle, un petit aménagement hydroélectrique a été construit dans les environs de Sim City. Une prise d'eau est installée sur la Little River, juste à l'amont de la ville. En conditions normales d'exploitation, une galerie dérive $5 \text{ m}^3/\text{s}$ jusque dans un bassin de compensation. La centrale et sa restitution se trouvent à l'aval de la ville.

M. L. Croft, maire de Sim City, a décidé de mandater le bureau M&M Consultants pour étudier un concept de protection contre les crues pour sa ville. A l'aide de Routing System, ce bureau a développé en peu de temps un modèle numérique du réseau hydraulique. Il a proposé de réaliser deux bassins de rétention en série, disposés parallèlement à la rivière. Grâce aux outils d'optimisation automatique de Routing System, le niveau de la crête des déversoirs ainsi que la hauteur des digues ont été optimisés.

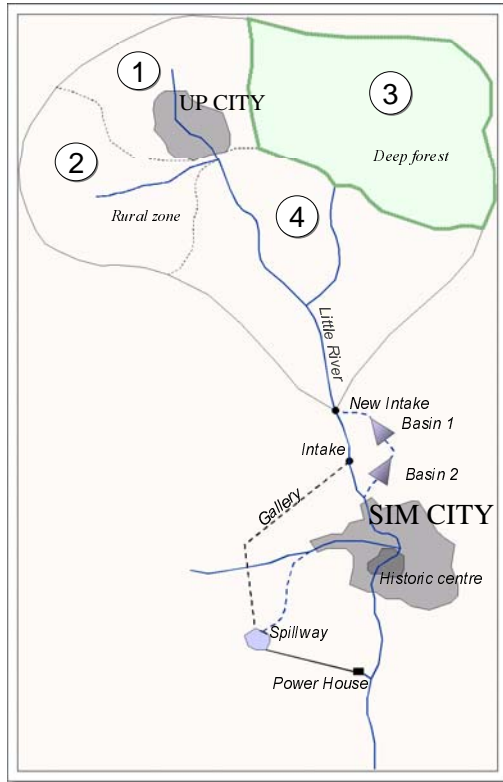


Figure 16 : Plan de la région de Up City et de Sim City.

3.3.2 Modélisation du bassin versant supérieur

Deux fonctions complexes ont été développées. La première représente le bassin versant situé à l'amont de la nouvelle prise d'eau à construire. La deuxième regroupe l'ensemble de l'aménagement hydroélectrique. Ces deux fonctions complexes sont ensuite utilisées dans le modèle global du système.

Comme représenté sur la figure 16, le bassin versant supérieur a été découpé en 4 sous-bassins aux caractéristiques différenciées. Après

la confluence des bassins 1 et 2 à l'aval de Up City, l'hydrogramme est routé dans un premier tronçon de la Little River jusqu'à la confluence avec le cours d'eau en provenance de Deep Forest. Là, après addition avec l'hydrogramme du bassin versant 3 puis celui du bassin 4, un dernier tronçon de rivière achemine le débit jusqu'à l'exutoire.

Cette fonction complexe nécessite seulement de connaître la pluie qui tombe sur cette région pour calculer l'hydrogramme de crue à l'amont de la nouvelle prise d'eau.

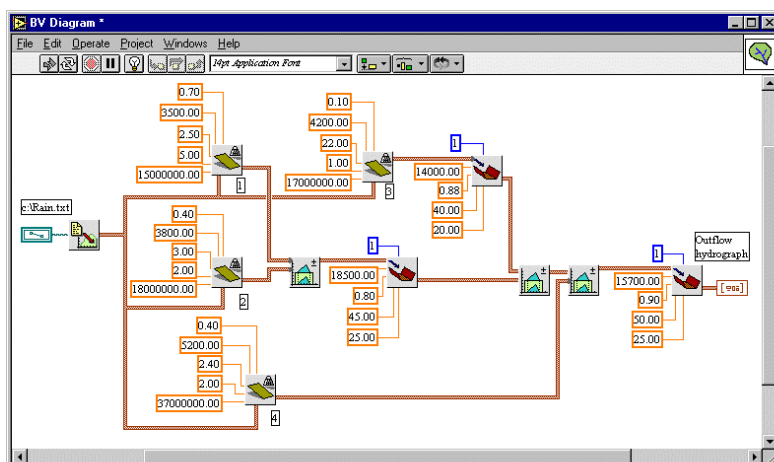


Figure 17 : Modèle Routing System du bassin versant supérieur.

3.3.3 Modélisation de l'aménagement hydroélectrique

La deuxième fonction complexe développée lors de cette étude est décrite par la figure 18. Elle représente l'ensemble de l'aménagement hydroélectrique et reçoit comme donnée l'hydrogramme qui arrive juste à l'amont de la prise d'eau. Le débit est réparti selon la relation lue dans le fichier Qu-Qd.txt.

L'hydrogramme qui continue dans la Little River (not diverted hydrograph) est un résultat de cette fonction complexe. L'hydrogramme dérivé est ensuite transporté par la galerie jusque dans le bassin de compensation. Après avoir retiré le débit turbiné par la centrale, un calcul de laminage permet de connaître le débit sortant par le déversoir de sécurité du bassin. L'eau sortant par ce déversoir rejoint un petit cours d'eau qui se jette dans la Little River juste à l'amont du centre historique de Sim City, comme le montre la figure 16.

Cette fonction complexe a donc trois sorties : l'hydrogramme qui n'est pas dérivé à la prise d'eau, l'hydrogramme sortant par le déversoir de sécurité du bassin de compensation et l'hydrogramme turbiné à la centrale.

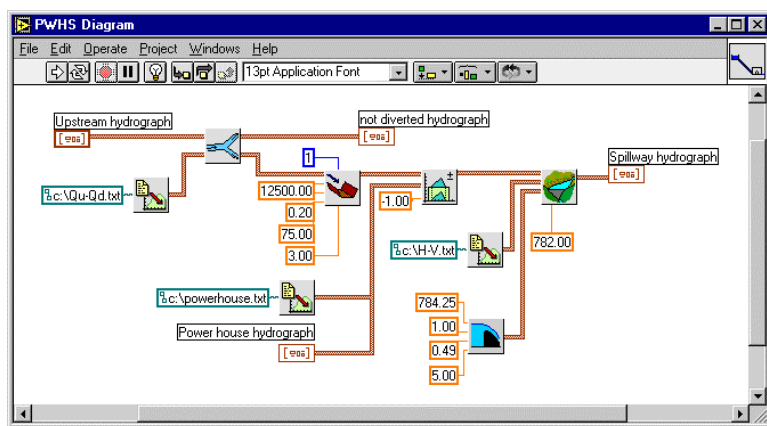


Figure 18 : Modèle Routing System de l'aménagement hydroélectrique.

3.3.4 Modélisation de l'ensemble du système

A l'aide des deux fonctions complexes développées précédemment, il devient plus aisé d'établir le modèle complet du système

hydraulique analysé, comme illustré par la figure 19. La première fonction complexe qui modélise le comportement du bassin versant supérieur est tout à l'amont du système. Elle est alimentée par un fichier (c:\rain.txt) contenant un hyétogramme et fournit l'hydrogramme à son exutoire. Le nouveau déversoir latéral à construire à l'amont de la prise d'eau de l'aménagement hydroélectrique est modélisé par une fonction de séparation des débits. L'hydrogramme qui n'est pas dérivée est celui qui entre dans la fonction complexe représentant l'aménagement hydroélectrique.

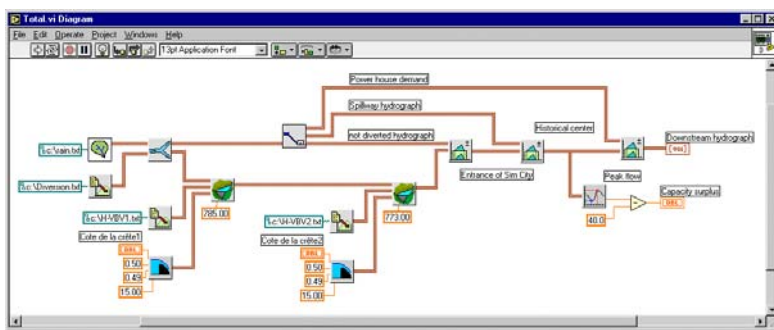


Figure 19 : Modèle Routing System de l'ensemble du réseau hydraulique analysé.

L'hydrogramme dérivé par le nouveau déversoir latéral entre dans le premier bassin de rétention équipé d'un déversoir. Le débit qui sort par ce dernier entre à son tour dans le deuxième bassin de rétention, également équipé d'un déversoir. L'hydrogramme sortant de ce système rejoint alors la Little River à l'aval de la prise d'eau existante de l'aménagement hydroélectrique. Juste avant le centre historique de Sim City, l'hydrogramme qui provient du déversement du bassin de compensation est additionné à celui de la rivière principale. Le débit de pointe de la crue à cet endroit est calculé et comparé avec la capacité hydraulique, limitée à $40 \text{ m}^3/\text{s}$, du vieux pont romain. Finalement, pour obtenir le système complet, le débit

turbiné par la centrale hydroélectrique est additionné à celui de la Little River.

Le dimensionnement hydraulique du système se résume à trouver les caractéristiques optimales des deux déversoirs des nouveaux bassins de rétention, en particulier les cotes des crêtes. Si ces déversoirs sont situés trop bas, l'effet de rétention sera trop faible et la valeur de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ sera toujours dépassée dans le centre historique de Sim City. Par contre, si ces déversoirs sont trop hauts, l'objectif de protection sera atteint mais pour un coût de réalisation trop important.

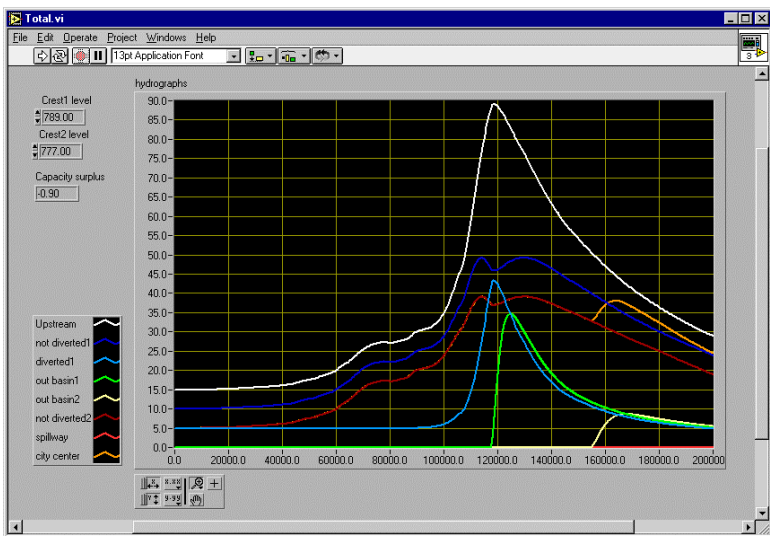


Figure 20 : Résultats de la simulation Routing System du système optimisé de protection contre les crues de Sim City.

La figure 20 présente les différents hydrogrammes obtenus avec le système optimisé. L'hydrogramme *Upstream* est celui calculé par la fonction complexe qui simule le comportement du bassin versant. Il présente un débit de pointe de près de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ qu'il s'agit de

diminuer avant la traversée du centre ville à une valeur inférieure à $40 \text{ m}^3/\text{s}$. L'hydrogramme `not diverted1` est celui qui continue dans la Little River à l'aval du nouveau déversoir latéral. Sa pointe se situe aux environs de $50 \text{ m}^3/\text{s}$. La différence entre ces deux hydrogrammes constitue celui dénommé `diverted1`, qui entre dans le premier bassin de rétention. L'effet de rétention de ce bassin est bien mis en évidence par l'hydrogramme sortant de ce bassin nommé `out basin1`. L'hydrogramme `out basin2` n'est pas nul et présente encore une pointe de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ environ, mais très décalée dans le temps par rapport à la pointe de l'hydrogramme naturel. Cet hydrogramme est additionné à celui qui n'est pas dérivé par la prise d'eau de la centrale (`not diverted2`) pour obtenir l'hydrogramme qui traverse le centre historique (`city center`).

Malgré le fait que le deuxième bassin de rétention n'est pas en mesure de contenir tout le volume qui y entre, en laissant sortir un débit de près de $10 \text{ m}^3/\text{s}$ qui s'additionne directement à l'hydrogramme traversant le centre ville, ce dernier ne dépasse pas la valeur limite de $40 \text{ m}^3/\text{s}$.

4. Fonctions de Routing System

Le chapitre précédent a présenté une description générale de Routing System. La figure 15, en particulier, dresse la liste des 6 fonctions de base qui permettent de modéliser un quelconque système hydraulique selon la description fonctionnelle présentée au chapitre 2.

Le présent chapitre décrit avec plus de détails chacune de ces fonctions. Comme ces dernières peuvent être très générales, comme la fonction de génération par exemple, elles regroupent un ensemble de sous-fonctions spécialisées selon le concept de lien de richesse présenté sur la figure 1.

4.1 Génération

Sous l'appellation « génération », Routing System regroupe toutes ses fonctionnalités hydrologiques permettant de générer des débits. Ces diverses fonctionnalités peuvent être classées en trois catégories principales qui concernent la définition de l'intensité et de la structure temporelle des pluies, la transformation de ces pluies nettes en pluies brutes et finalement la transformation des pluies brutes en hydrogrammes de crues.

4.1.1 Pluies

Routing System est capable de traiter n'importe quelle pluie dans une étude hydrologique. Il peut être utilisé aussi bien pour des simulations événementielles que continues. Des séries de pluies historiques peuvent être introduites à partir d'un fichier ou d'une

base de données. Des pluies de projet peuvent également être générées à l'aide des fonctions proposées.

Routing System propose un certain nombre de modèles pour générer une pluie synthétique. Ils se fondent tous sur une analyse statistique Intensité – Durée – Fréquence (IDF) des pluies pour un endroit et une période de retour donnés. Afin de pouvoir calculer numériquement l'intensité moyenne de la pluie, connaissant sa durée et sa fréquence, il est indispensable de traduire la représentation graphique IDF en une expression analytique. L'expression généralisée de Talbot offre à la fois la précision et la souplesse recherchées.

4.1.1.1 Généralités

Le modèle de Talbot (Musy 1999) postule que l'intensité moyenne i_m de la pluie s'obtient en fonction de sa durée t_p au moyen de l'expression :

$$i_m = \frac{a}{(t_p + b)^c} \quad (1)$$

où a , b et c sont trois constantes qui dépendent du lieu et de la période de retour.

En Suisse, la formule de Hörler-Rhein (1962) est plus largement répandue. Elle s'écrit :

$$i_m = \frac{a}{t_p + b} \quad (2)$$

Elle est de même forme mathématique que la formule de Talbot pour $c = 1$. Le tableau ci-dessous présente les valeurs des coefficients a et b de quelques villes suisses pour différentes périodes de retour. Il convient de relever que ce tableau a été établi en ne considérant les pluies que jusqu'en 1962. Il mériterait une mise à jour incluant la

quarantaine d'années de mesures supplémentaires aujourd'hui disponibles.

Localité	a (m)							b (s)
	Période de retour (ans)							
	1	2	5	10	15	20	30	
Altorf	0.001488	0.002112	0.002772	0.003336	0.003690	0.003960		720
Bâle	0.001725	0.002153	0.002791	0.003331	0.003667	0.003924	0.004296	480
Berne	0.002400	0.002990	0.003890	0.004678	0.005182	0.005525	0.006130	720
Davos	0.001170	0.001463	0.001895	0.002257	0.002477	0.002638	0.002893	600
Lausanne	0.001895	0.002286	0.002856	0.003336	0.003641	0.003836	0.004187	720
Locarno-Monti	0.004241	0.005068	0.006251	0.007226	0.007824	0.008286	0.008927	1380
Neuchâtel	0.001590	0.001938	0.002439	0.002862	0.003114	0.003304	0.003585	600
Oberiberg	0.001800	0.002280	0.003000	0.003600	0.003984	0.004260	0.004710	600
Rorschach	0.002040	0.002638	0.003547	0.004337	0.004841	0.005222	0.005785	600
St-Gall	0.002401	0.003064	0.004072	0.004951	0.005513	0.005943	0.006567	840
Schaffouse	0.001800	0.002304	0.003078	0.003744	0.004164	0.004518	0.005004	600
Sion	0.000630	0.000804	0.001068	0.001296	0.001443	0.001557	0.001716	360
Thoune	0.002332	0.002924	0.003817	0.004570	0.005048	0.005402	0.005932	840
Uster	0.002040	0.002568	0.003354	0.004023	0.004445	0.004761	0.005226	600
Zürich	0.001822	0.002198	0.002741	0.003188	0.003463	0.003668	0.003964	480
Bregenz	0.002700	0.003394	0.004468	0.005397	0.005994	0.006434	0.007106	900
Como	0.003805	0.004582	0.005715	0.006647	0.007234	0.007660	0.008288	1620

Tableau 2 : Valeur des coefficient a et b pour diverses localités suisses et pour différentes périodes de retour. Pour ces valeurs, le coefficient c = 1. (D'après Boillat 1980)

Une autre méthode (Sinniger 1995) de détermination des coefficients a, b et c repose sur l'hypothèse souvent admise qu'une courbe IDF se présente sous la forme d'une droite lorsqu'elle est dessinée sur un graphique en double échelle logarithmique. Dans ce cas, son expression mathématique devient :

$$i_m = \frac{a}{t_p^c} \quad (3)$$

A nouveau, il s'agit d'un cas particulier de la formule de Talbot où $b = 0$. La lecture de deux couples Intensité – Durée, $(i_1; t_1)$ et $(i_2; t_2)$, de la pluie sur une courbe IDF permet alors le calcul des coefficients a et c :

$$c = \frac{\ln i_2 - \ln i_1}{\ln t_1 - \ln t_2} \quad (4)$$

$$a = i_1 t_1^c \quad (5)$$

Si trois couples sont lus sur la courbe IDF, les trois coefficients de la formule de Talbot peuvent être déterminés. Malheureusement, la solution analytique de ce problème n'existe pas, mais il peut être résolu numériquement.



4.1.1.2 Talbot

Cette fonction applique simplement la formule de Talbot, connaissant ses trois paramètres et la durée de la pluie, pour fournir l'intensité moyenne.



4.1.1.3 Calcul des coefficients de Talbot

Cette fonction permet le calcul des coefficients a , b et c de la formule de Talbot (1) à partir d'un certain nombre de couples « Durée de la pluie – Intensité moyenne » lus sur une courbe IDF. Ces couples sont donnés sous la forme $(t; i)$ dans l'environnement Routing System.

Si deux couples sont donnés, cette fonction calcule a et c à l'aide des équations (4) et (5) avec $b = 0$. Par contre, si trois couples ou plus sont fournis, les trois paramètres a , b et c sont calculés par optimisation numérique et par la méthode des moindres carrés (chapitre 4). Il est conseillé de toujours garder un œil critique sur la valeur du coefficient b ainsi obtenue. En effet, ce paramètre n'est

vraiment influent, et donc sensible à une optimisation, que pour les très courtes durées de pluie. Pour les durées habituellement considérées, le tableau 2 montre que la variation de ce paramètre n'est pas significative, du moins en Suisse, et qu'une valeur $b = 750$ peut être choisie en première approximation.



4.1.1.4 Averse uniforme

L'averse uniforme est certainement la pluie de dimensionnement la plus simple et probablement celle qui a été la plus utilisée dans le passé pour les études hydrologiques. Les paramètres d'entrée de cette fonction sont les trois coefficients de la formule de Talbot et la durée de la pluie. Le résultat se présente sous la forme d'un hyétoگرامme d'intensité constante, comme illustré à la figure 21.

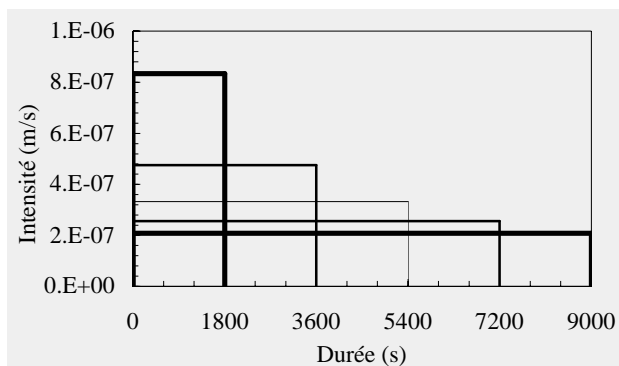


Figure 21 : Averses uniformes pour différentes durées de pluie, avec $a = 0.002$, $b = 600$ et $c = 1$.



4.1.1.5 Averse triangulaire

Dans une progression lente vers des structures temporelles plus évoluées, l'averse triangulaire offre une variation temporelle linéaire

des intensités de pluie. Ce modèle de pluie a été abondamment utilisé pour les études hydrologiques liées aux dimensionnement des organes d'évacuation des grands barrages. La méthode de structuration temporelle des intensités est illustrée à la figure 22.

Pour conserver le volume de l'averse, l'intensité maximale $i_{max} = 2 i_m$. Un nouveau paramètre r est introduit, dont la valeur est toujours comprise entre 0 et 1. Il permet de choisir la position de la pointe du hyétogramme sur la durée de la pluie. Ce paramètre est défini par la relation :

$$r = \frac{t^*}{t_p} \quad (6)$$

où t^* est le temps de montée du hyétogramme.

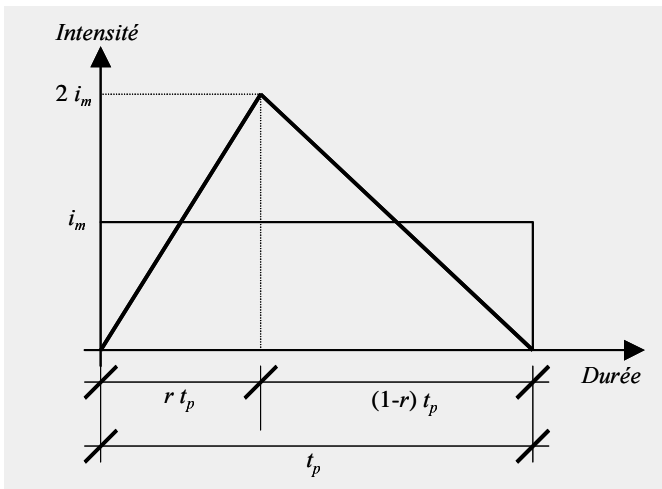


Figure 22 : Méthode de structuration temporelle de l'averse triangulaire.

La valeur du paramètre r est souvent choisie à $r = 0.3$, ce qui conduit à des familles de hyétogrammes tels que celle présentée à la figure 23. Des analyses d'averses mesurées aux Etats Unis ont permis de proposer quelques valeurs types présentées dans le tableau 3 ci-dessous.

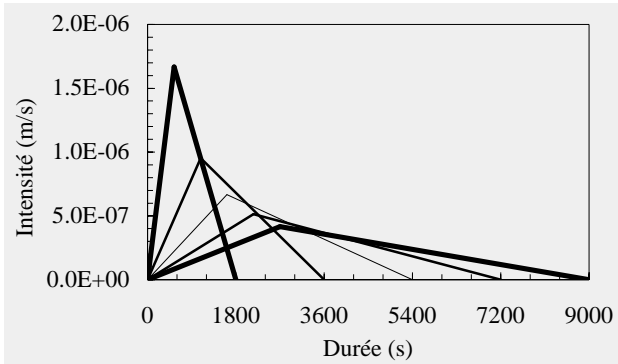


Figure 23 : Averses triangulaires pour différentes durées de pluie, avec $a = 0.002$, $b = 600$, $c = 1$ et $r = 0.3$.

Lieu	r	Source
Chicago	0.375	Keifer et Chu (1957)
Philadelphie	0.414	Mc Pherson (1958)
Baltimore	0.399	Mc Pherson (1958)
Cincinnati	0.325	Preul et al. (1973)
Ontario	0.488	Marsalek (1978)

Tableau 3 : Valeurs du paramètre r proposées (d'après Musy 1999)



4.1.1.6 Averse de Weibull

Plusieurs méthodes de dimensionnement des organes d'évacuation des grands barrages se fondent sur une forme d'averse exprimée

par une distribution de Weibull (Hager 1988), dont la formulation analytique s'écrit :

$$i(t) = i_{\max} \left[\frac{t}{t^*} e^{\left(1 - \frac{t}{t^*}\right)} \right]^n \quad (7)$$

où i_{\max} est l'intensité de précipitation maximale et t^* le temps de montée du hyétogramme correspondant à i_{\max} . Dans cette relation, n est un facteur de forme dont l'influence est montrée sur la figure 24 dans laquelle l'intensité de précipitation et la durée de l'averse ont été adimensionalisées par rapport aux valeurs respectives correspondant au maximum de la fonction.

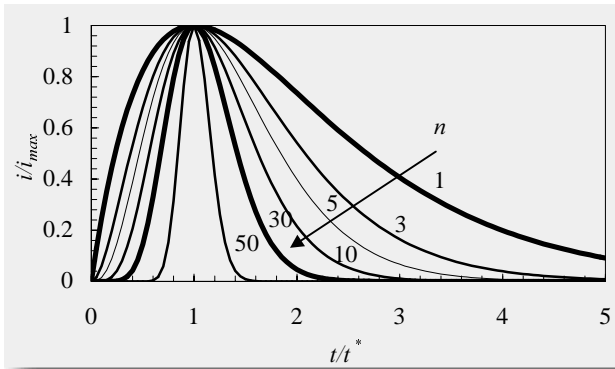


Figure 24 : Effet du facteur de forme n sur la distribution normalisée de Weibull.

La construction de cette distribution temporelle à partir de l'intensité moyenne et d'une durée de précipitation devient moins triviale que pour l'averse triangulaire. Comme dans ce dernier cas, le paramètre r permet de déterminer le temps de montée du hyétogramme $t^* =$

$r \cdot t_p$. Cette distribution est schématiquement représentée sur la figure 25.

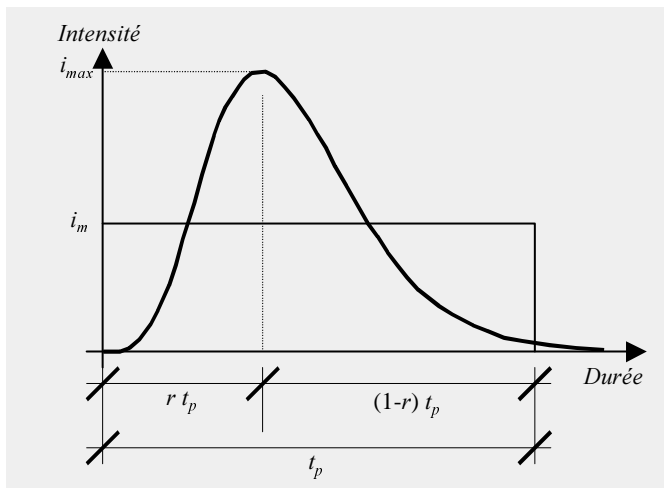


Figure 25 : Méthode de structuration temporelle pour une averse de Weibull.

La définition de l'intensité maximale i_{max} se fonde sur l'égalité du volume \forall de pluie entre l'averse uniforme et l'averse de Weibull. Le volume de l'averse uniforme vaut simplement :

$$\forall = i_m t_p \quad (8)$$

Le volume de l'averse de Weibull s'obtient par intégration de l'équation (7) :

$$\forall = \int_0^{\infty} i(t) dt = i_{max} t^* e^n \frac{\Gamma(n+1)}{n^{n+1}} \quad (9)$$

La fonction gamma Γ est définie d'une manière générale par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt \quad (10)$$

La solution analytique de cette intégrale n'existe pas. Seule une résolution numérique permet d'obtenir la valeur cherchée. Mais si x est un nombre entier, la fonction gamma se réduit à :

$$\Gamma(x+1) = x! \quad (11)$$

où $x!$ représente la factorielle de x .

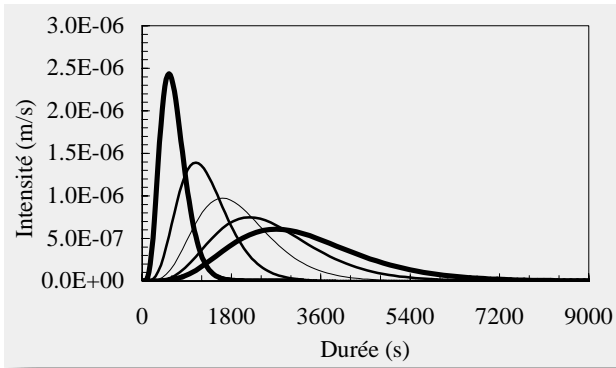


Figure 26 : Averses de Weibull pour différentes durées de pluie, avec $a = 0.002$, $b = 600$, $c = 1$, $r = 0.3$ et $n = 5$.

Par définition, le temps de montée t^* du hétéogramme s'écrit :

$$t^* = r t_p \quad (12)$$

L'égalité des équations (8) et (9) et l'équation (12) permettent d'obtenir la valeur de l'intensité de pluie maximale :

$$i_{\max} = \frac{i_m n^{n+1}}{r e^n \Gamma(n+1)} \quad (13)$$

La fonction « Averse de Weibull » de Routing System nécessite la connaissance des paramètres a , b et c de la formule de Talbot, du paramètre r , de la durée de la pluie t_p et du facteur de forme n . Le résultat est un hyétogramme, dont la forme générale est illustrée à la figure 26.



4.1.1.7 Averse de Chicago

La méthode qui permet de calculer une averse de Chicago a été développée par Keifer et Chu (1957). L'idée est de construire une averse qui satisfasse l'intensité moyenne donnée par la courbe IDF pour toute durée s inférieure ou égale à la durée de la pluie. Le principe de construction est illustré par la figure 27.

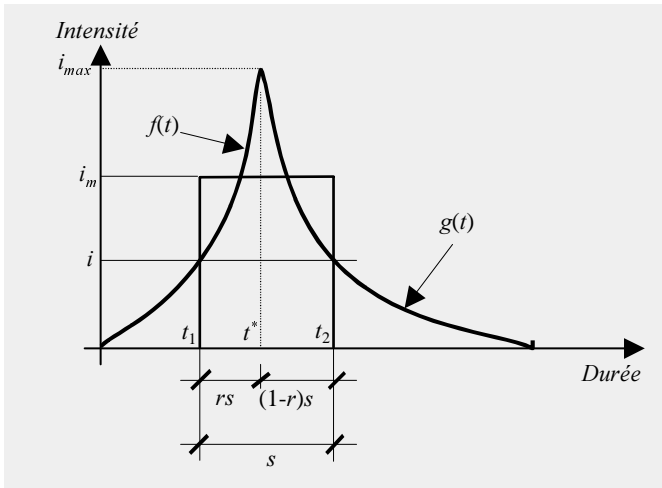


Figure 27 : Méthode de structuration temporelle pour une averse de Chicago

Sur l'intervalle s , le volume de la pluie vaut :

$$\forall = \int_{t_1}^{t^*} f(t) dt + \int_{t^*}^{t_2} g(t) dt = \int_{t^*-rs}^{t^*} f(t) dt + \int_{t^*}^{t^*+(1-r)s} g(t) dt \quad (14)$$

En connaissant l'intensité moyenne, ce volume s'écrit simplement :

$$\forall = i_m s \quad (15)$$

L'équation (14) peut se dériver grâce à la relation générale :

$$\int_{u(t)}^{v(t)} f(u) du = \frac{dv}{dt} f(v(t)) - \frac{du}{dt} f(u(t)) \quad (16)$$

Appliquée à l'équation (14), cette identité permet d'écrire :

$$\frac{d\forall}{ds} = r f(t^* - rs) + (1-r) g(t^* + (1-r)s) \quad (17)$$

En posant $t^* - rs = t_1$ et $t^* + (1-r)s = t_2$, et en sachant que $f(t_1) = g(t_2)$, l'équation (17) devient :

$$\frac{d\forall}{ds} = r f(t_1) + (1-r) g(t_2) = f(t_1) = g(t_2) = i \quad (18)$$

La dérivée par rapport à s de l'équation (15) s'écrit :

$$\frac{d\forall}{ds} = s \frac{di_m}{ds} + i_m \quad (19)$$

L'égalité des équations (18) et (19) permet de calculer l'intensité i qui se retrouve de part et d'autre de la pointe du hétéogramme, ceci pour n'importe quelle expression de l'intensité moyenne i_m en fonction de la durée de la pluie. Si l'expression de Talbot est retenue et à l'aide de l'équation (18), l'équation (19) devient :

$$i = \frac{a[(1-c)s + b]}{(s + b)^{(c+1)}} \quad (20)$$

Cette dernière équation permet de calculer l'intensité i pour chaque intervalle s , comme illustré sur la figure 19.

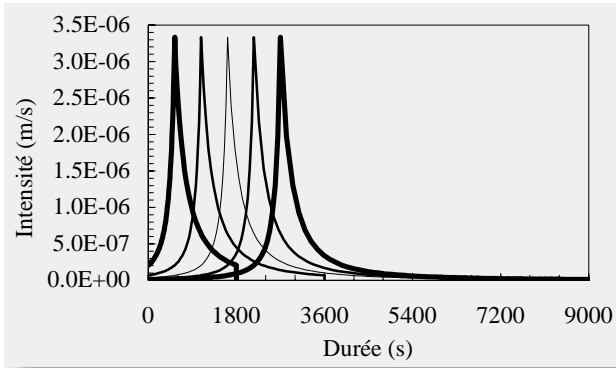


Figure 28 : Averses de Chicago pour différentes durées de pluie, avec $a = 0.002$, $b = 600$, $c = 1$, $r = 0.3$ et $n = 5$.

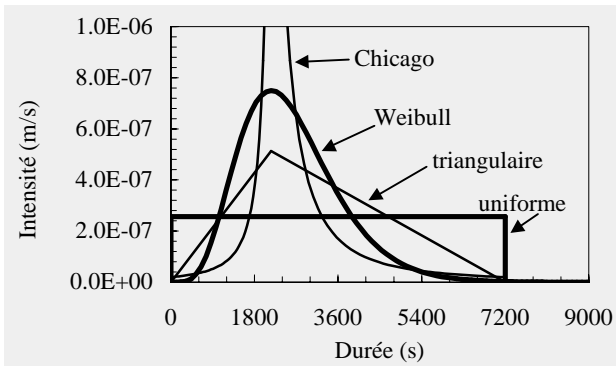


Figure 29 : Comparaison des averses uniforme, triangulaire, de Weibull et de Chicago.

A titre de comparaison, la figure 29 présente la synthèse des différentes pluies de projet que Routing System peut générer à partir d'une relation IDF.

4.1.2 Fonction de production

Une fonction de production permet de déterminer la part de la pluie tombée qui participe au ruissellement de surface. Une fonction de production transforme donc une pluie brute en pluie nette. Trois familles de fonctions de production peuvent être distinguées ; celle appliquant la notion de coefficient de ruissellement (Infiltration constante et infiltration proportionnelle), celle reposant sur des modèles empiriques ou à base physique (modèles de Horton, de Green et Ampt et de Philip) et celle des modèles conceptuels (GR3).

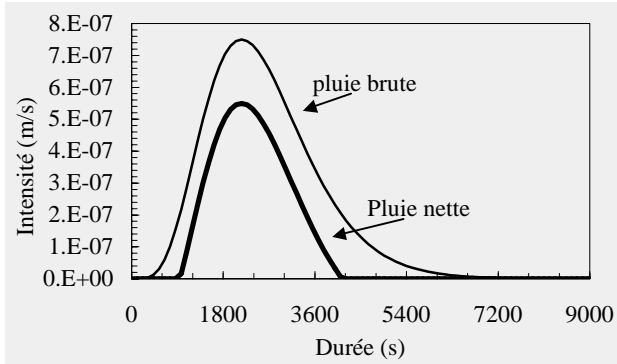


4.1.2.1 Infiltration constante

Le modèle le plus simple consiste à supposer que la capacité d'infiltration i_{inf} est constante dans le temps. Ce modèle permet de calculer la pluie nette i_{nette} à partir de la pluie brute i selon la relation :

$$i_{nette} = \begin{cases} i - i_{inf} & \text{pour } (i - i_{inf}) > 0 \\ 0 & \text{pour } (i - i_{inf}) < 0 \end{cases} \quad (21)$$

Cette fonction demande un hyétogramme et la capacité d'infiltration i_{inf} pour fournir le hyétogramme modifié.



**Figure 30 : Transformation d'une pluie brute en pluie nette.
Méthode de l'infiltration constante avec $i_{inf} = 2^E - 7$.**



4.1.2.2 Infiltration proportionnelle

L'infiltration proportionnelle se fonde directement sur la définition du coefficient de ruissellement C_r qui s'écrit :

$$C_r = \frac{i_{nette}}{i} \quad (22)$$

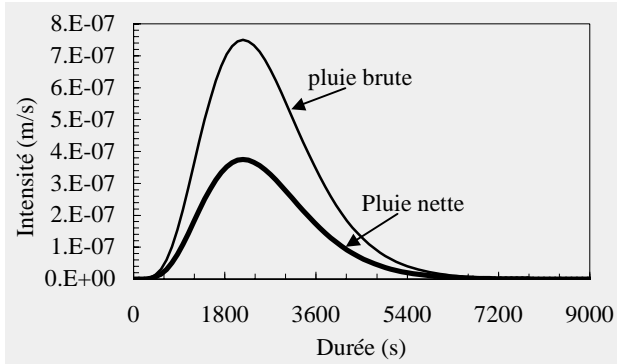
La pluie nette s'obtient très simplement par la relation :

$$i_{nette} = C_r i$$

Le taux d'infiltration i_{inf} varie donc dans le temps proportionnellement à l'intensité de la pluie selon la relation :

$$i_{inf} = (1 - C_r) i \quad (23)$$

Un exemple d'application de la méthode d'infiltration proportionnelle est présenté sur la figure 31.



**Figure 31 : Transformation d'une pluie brute en pluie nette.
Méthode de l'infiltration proportionnelle avec $C_r = 0.5$.**



4.1.2.3 Modèle de Horton

Le modèle empirique de Horton (1933) reproduit mathématiquement la décroissance temporelle de l'infiltration, due à l'augmentation de la teneur en eau du sol (figure 32). Ce modèle, décrit schématiquement à la figure 33, compte trois paramètres : i_0 le taux d'infiltration initial, i_f le taux d'infiltration limite et γ un paramètre dont dépend la rapidité de décroissance de l'infiltration. L'équation de Horton s'écrit :

$$i_{\text{inf}} = i_f + (i_0 - i_f) e^{-\gamma t} \quad (24)$$

Dès lors, l'intensité de pluie nette s'obtient par :

$$i_{\text{nette}} = \begin{cases} i - i_{\text{inf}} & \text{si } i > i_{\text{inf}} \\ 0 & \text{si } i \leq i_{\text{inf}} \end{cases} \quad (25)$$

Le Soil Conservation Service (SCS 1975) a établi une classification des types de sols et propose des valeurs caractéristiques pour les coefficients i_0 et i_f .

Type de sol	Groupe	i_0 (m/s)	i_f (m/s)	
			min	max
Sable, silt	A	6.9E-05	2.2E-06	3.3E-06
Limon sableux	B	5.6E-05	1.1E-06	2.2E-06
Limon argileux	C	3.6E-05	2.8E-07	1.1E-06
Argiles, sols salins	D	2.1E-05	0.0E+00	2.8E-07

Tableau 4 : Valeurs des coefficients i_0 et i_f pour diverses classes de sols, proposées par le SCS. (D'après Musy 1999)

La valeur du paramètre γ (s^{-1}) est comprise, pour des terrains agricoles, entre $2.2 \cdot 10^{-4}$ et $5.6 \cdot 10^{-4}$ (El-Jabi 1987).

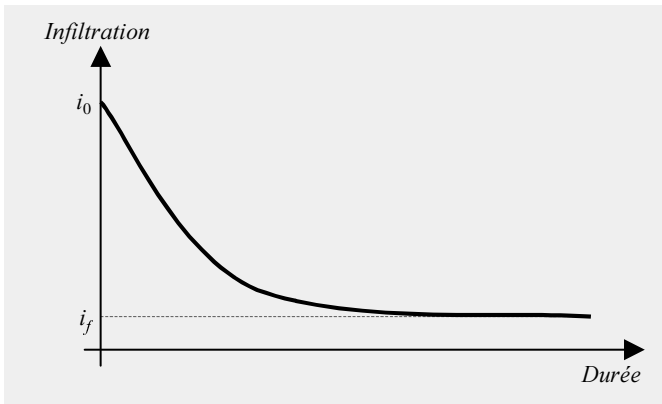


Figure 32 : Evolution temporelle de l'infiltration selon Horton et définition schématique des paramètres i_0 et i_f .

L'équation (24) représente l'évolution temporelle de la capacité d'infiltration d'un sol soumis à une pluie d'intensité supérieure ou égale à i_0 . Si l'intensité de la pluie est inférieure à cette capacité, seule une partie de cette dernière est « utilisée » et l'évolution temporelle de l'infiltration ne présente plus le même aspect. En

considérant un cas limite, il est évident que la capacité d'infiltration n'est pas diminuée si aucune pluie ne tombe sur le sol.

Cette difficulté peut être résolue de la manière suivante. L'infiltration s'écrit, par définition :

$$i_{inf} = i - i_{nette} \quad (26)$$

L'infiltration cumulée \forall_c au cours du temps s'obtient par intégration de l'équation (26) :

$$\forall_c(t) = \int_0^t (i(s) - i_{nette}(s)) ds \quad (27)$$

Selon l'équation de Horton (24) et avec la condition initiale $\forall_c(0) = 0$, elle s'écrit également :

$$\forall_c(t) = \int_0^t i_{inf}(s) ds = \frac{i_0 - i_f}{\gamma} (1 - e^{-\gamma t}) + i_f t \quad (28)$$

A un instant t_i , l'infiltration cumulée peut être calculée par l'équation (27). L'équation (28) peut alors être résolue numériquement pour obtenir un pseudo-temps t_{pseudo} . L'infiltration au temps t_i est alors calculée par l'équation de Horton (24) avec $t = t_{pseudo}$. Cette procédure est illustrée à la figure 33.

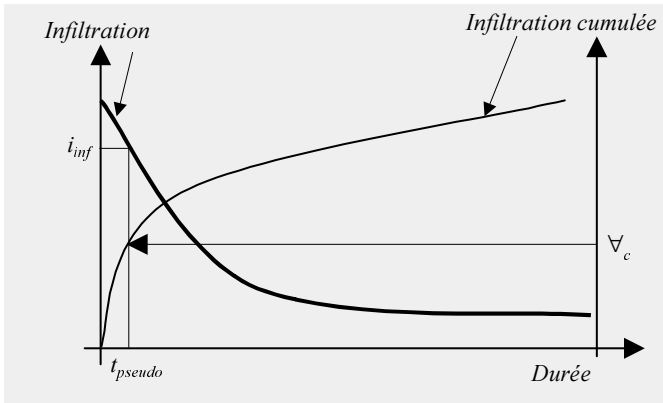
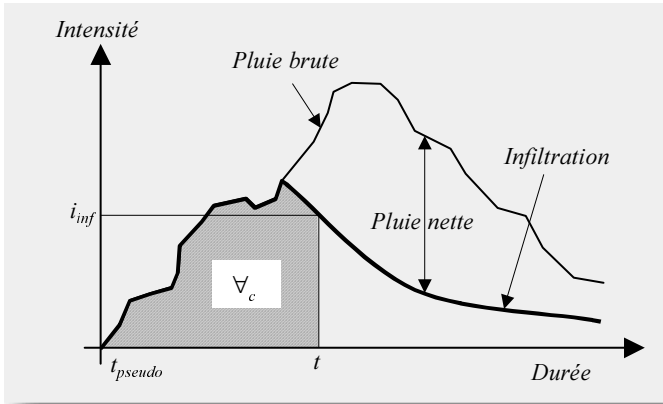
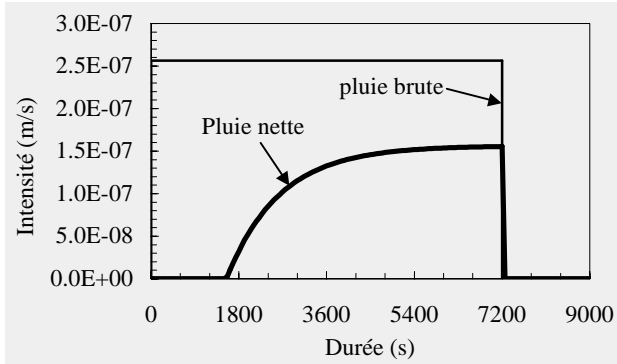


Figure 33 : Description schématique du calcul de l'infiltration.

Un exemple d'application de la méthode de Horton est présenté à la figure 34 pour une pluie d'intensité constante.



**Figure 34 : Transformation d'une pluie brute en pluie nette.
Méthode de Horton.**



4.1.2.4 GR3

Le modèle dénommé GR3 (Michel 1988, Consuegra 1998) est une fonction de production fondée sur un modèle de réservoir. Il permet à la fois de transformer une pluie brute en pluie nette, de calculer un débit de base et une évapotranspiration réelle. Ses divers paramètres sont représentés sur la figure 35.

Le paramètre h est la hauteur d'eau dans le réservoir de hauteur totale h_{max} , ETR est l'évapotranspiration réelle et Q_{base} est le débit de base sortant du réservoir.

L'évolution de la hauteur d'eau dans le réservoir est décrite par l'équation de continuité :

$$\frac{dh}{dt} = i_{inf} - \left(ETR + \frac{Q_{base}}{A} \right) \quad (29)$$

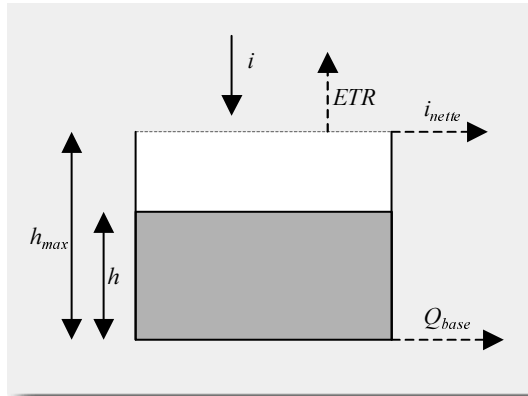


Figure 35 : Description schématique du modèle GR3 et de ses paramètres.

où A représente la surface du bassin versant. L'infiltration i_{inf} est calculée au moyen de la relation :

$$i_{inf} = i \left(1 - \left(\frac{h}{h_{max}} \right)^2 \right) \quad (30)$$

tandis que l'évapotranspiration réelle se déduit de l'évapotranspiration potentielle selon la fonction :

$$ETR = ETP \sqrt{\frac{h}{h_{max}}} \quad (31)$$

Le débit de base Q_{base} est une fonction linéaire de la hauteur d'eau h et s'écrit :

$$Q_{base} = K^* Ah \quad (32)$$

où K^* est la constante de tarissement qui s'exprime en (s^{-1}). Il est d'usage dans ce modèle de travailler avec une constante K sans dimensions, définie selon la relation :

$$K = K^* \Delta t \quad (33)$$

où Δt est le pas de temps de l'intégration numérique. De fait, le paramètre K dépend du pas de temps choisi pour effectuer l'intégration numérique de l'équation (29). Pour lever cette possible ambiguïté, le modèle GR3 requiert la valeur K_1 qui correspond à un pas de temps horaire. Si le calcul s'effectue avec un autre pas de temps Δt , le coefficient K s'obtient par la relation :

$$K = 1 - e^{\Delta t \ln(1-K_1)} \quad (34)$$

L'équation de continuité (29) est une équation différentielle ordinaire du premier ordre de forme générale :

$$\frac{dh}{dt} = f(t, h) \quad (35)$$

L'algorithme de Runge-Kutta a été choisi pour sa résolution avec la condition initiale :

$$h(t = t_0) = h_0 \quad (36)$$

Dans le cas particulier de l'équation (29), la fonction f s'écrit, en tenant compte des différentes relations ci-dessus, :

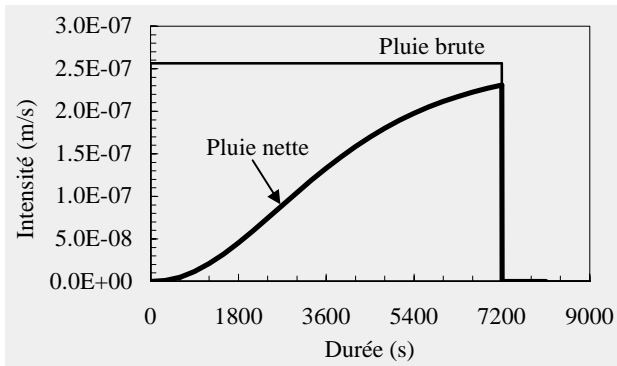
$$f(t, h) = i \left(1 - \left(\frac{h}{h_{\max}} \right)^2 \right) - ETP \sqrt{\frac{h}{h_{\max}}} - K^* h \quad (37)$$

Dès lors, et sous forme récursive, l'algorithme de Runge-Kutta du 4^{ème} ordre s'écrit :

$$\begin{aligned}
 h_{i+1} &= h_i + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\
 k_1 &= \Delta t f(t_i, h_i) \\
 k_2 &= \Delta t f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, h_i + \frac{k_1}{2}\right) \\
 k_3 &= \Delta t f\left(t_i + \frac{\Delta t}{2}, h_i + \frac{k_2}{2}\right) \\
 k_4 &= \Delta t f(t_i + \Delta t, h_i + k_3)
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

Ce modèle demande un hyétogramme de pluie ainsi qu'une série temporelle décrivant l'évapotranspiration potentielle. Les autres paramètres sont la surface A du bassin versant, la hauteur h_{max} du réservoir et la constante de tarissement K_1 . La condition initiale est donnée au moyen d'un débit de base initial qui permet, à l'aide de l'équation (32), de déterminer h_0 en $t = t_0$.

Trois séries temporelles sont fournies : l'intensité de pluie nette (figure 36), l'évapotranspiration réelle et le débit de base.



**Figure 36 : Transformation d'une pluie brute en pluie nette.
Modèle GR3.**

Le modèle GR3 est particulièrement bien adapté aux simulations hydrologiques continues par le fait que sa capacité d'infiltration augmente lors des périodes sans pluies et par la prise en compte de l'évapotranspiration, indispensable à l'établissement de bilans hydriques à long terme.

4.1.3 Fonction de transfert

En hydrologie, une fonction de transfert permet de calculer un hydrogramme de crue à partir d'une pluie nette. Deux familles principales de fonctions de transfert se distinguent : les modèles conceptuels ou globaux et les modèles à base physique. La méthode de l'hydrogramme unitaire est un exemple largement utilisé de modèle global linéaire, tout comme le modèle SWMM non-linéaire. Par contre, la fonction d'onde cinématique sur plan est un modèle à base physique.



4.1.3.1 SWMM

Le modèle SWMM (prononcer Swimm) (Metclaf 1971, Consuegra 1998) est un modèle de réservoir non-linéaire résultant de la combinaison d'une loi de frottement empirique, celle de Manning-Strickler en l'occurrence, et de l'équation de continuité. Dans ce cas, la loi de frottement devient la loi de vidange du réservoir.

D'une manière générale, l'équation de rétention d'un réservoir s'écrit :

$$\frac{d\forall}{dt} = Q_e - Q_s \quad (39)$$

où \forall est le volume du réservoir, Q_e le débit entrant et Q_s le débit sortant.

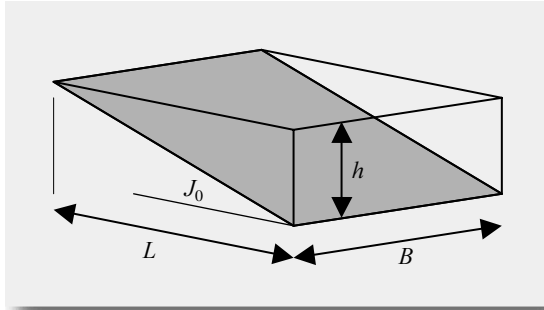


Figure 37 : Description schématique du modèle SWMM.

Le modèle SWMM (figure 37) propose la relation suivante pour calculer le volume du réservoir en fonction de la hauteur d'eau h à l'aval du plan:

$$\forall = \frac{1}{2}LBh = \frac{1}{2}Ah \quad (40)$$

avec A est la surface du bassin versant. Le débit sortant n'est rien d'autre que le débit calculé à l'aide de la formule de Manning-Strickler :

$$Q_s = BK\sqrt{J_0}h^{5/3} \quad (41)$$

avec K le coefficient de Strickler et J_0 la pente du plan. Le débit entrant est simplement lié à l'intensité de la pluie nette par la relation :

$$Q_e = i_{nette}A \quad (42)$$

En introduisant les équations (40), (41) et (42) dans l'équation (39), et après simplification par A , l'équation de rétention devient :

$$\frac{dh}{dt} = 2 \left(i_{nette} - \frac{K \sqrt{J_0} h^{5/3}}{L} \right) \quad (43)$$

Comme pour le cas du modèle GR3, il s'agit à nouveau de résoudre une équation différentielle ordinaire du premier ordre. L'algorithme numérique de résolution est toujours celui de Runge-Kutta du 4^{ème} ordre.

Connaissant une pluie nette, le modèle SWMM fournit un hydrogramme de crue à l'aval du bassin versant considéré.



4.1.3.2 Onde cinématique sur plan

Le modèle Ranoc (Dubois 1998), pour résolution analytique de l'onde cinématique, est une fonction de transfert qui résout l'équation de l'onde cinématique sur un plan. La géométrie du bassin versant est schématisée par un plan de même surface, d'une longueur caractéristique et d'une pente moyenne. Contrairement au modèle SWMM, la géométrie du volume d'eau retenu sur le plan n'est pas fixée *a priori* mais découle d'un calcul hydraulique non-uniforme et non-stationnaire. Les différentes variables du modèle sont représentées sur la figure 38.

Pour un écoulement plan unidimensionnel, l'équation de l'onde cinématique s'écrit :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} = i_{nette} \quad (44)$$

et:

$$J_0 = J_f \quad (45)$$

où u est la vitesse moyenne, x la coordonnée cartésienne longitudinale et J_f la pente de frottement.

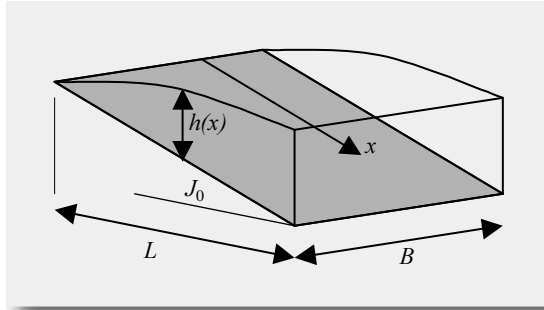


Figure 38 : Description schématique du modèle Ranoc.

La relation entre la vitesse moyenne de l'écoulement u et la hauteur d'eau h peut s'exprimer sous la forme générale :

$$u = \alpha h^{m-1} \quad (46)$$

où α et m sont deux coefficients qui dépendent du régime d'écoulement ainsi que de l'expression de perte de charge considérés.

La solution analytique d'un écoulement laminaire sur un plan (Dubois 1998) montre que :

$$\alpha = \frac{g J_0}{3\nu}; \quad m = 3 \quad (47)$$

avec ν la viscosité cinématique du fluide.

Pour les écoulements turbulents, un grand nombre de formules empiriques ont été établies. Les plus fréquemment utilisées sont celle de Chézy pour laquelle :

$$\alpha = C J_0^{1/2}; \quad m = \frac{3}{2} \quad (48)$$

avec C le coefficient de Chézy, et celle de Manning-Strickler où :

$$\alpha = K J_0^{1/2}; \quad m = \frac{5}{3} \quad (49)$$

avec K le coefficient de Strickler.

A l'aide de l'équation (46), (44) et (45) deviennent :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \frac{\partial h^m}{\partial x} = i \quad (50)$$

Pour une intégration plus aisée, l'équation aux dérivées partielles peut être transformée en dérivée ordinaire pour sa résolution par la méthode des caractéristiques.

$$\frac{dh}{dt} = i_{nette} \quad (51)$$

$$\frac{dx}{dt} = \alpha m h^{m-1} = mu \quad (52)$$

L'équation (52), dénommée « équation caractéristique », définit une courbe dans le plan espace – temps. Elle explicite le transport de l'information sur les épaisseurs de lame et laisse dès lors apparaître une célérité exprimée comme un multiple de la vitesse. L'équation (51) n'est valable que sur cette courbe caractéristique et décrit l'évolution temporelle de la hauteur d'eau.

Les détails de l'intégration numérique des équations (51) et (52) sont présentés dans Dubois (1998). Le principe de résolution consiste à calculer une courbe caractéristique afin d'obtenir un couple temps – débit à l'aval du plan. Pour bénéficier d'une bonne résolution temporelle de l'hydrogramme, il est évidemment nécessaire de répéter ce processus autant de fois que nécessaire.

Comme cela est souvent le cas en numérique, il est plus aisé de calculer des caractéristiques espacées d'un dx constant pour celles provenant de la condition initiale, et d'un dt constant pour celles provenant de la condition limite amont. Il faut cependant préciser que

malgré cette apparente régularité, la non-linéarité des équations cinématiques entraîne un pas de temps variable pour l'hydrogramme aval.

La figure 39 présente le résultat de cette fonction pour un plan de 600 m de longueur et de 1000 m de largeur, de 20% de pente et de coefficient de Strickler $K = 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$. Ce plan est arrosé par la pluie nette également montrée sur la figure 39. Dans ces conditions, le calcul de la caractéristique « frontière » entre le domaine influencé par la condition initiale et celui dépendant de la condition limite amont fournit le temps de concentration t_c de ce plan pour la pluie considérée, à savoir dans ce cas, $t_c = 8'918 \text{ s}$.

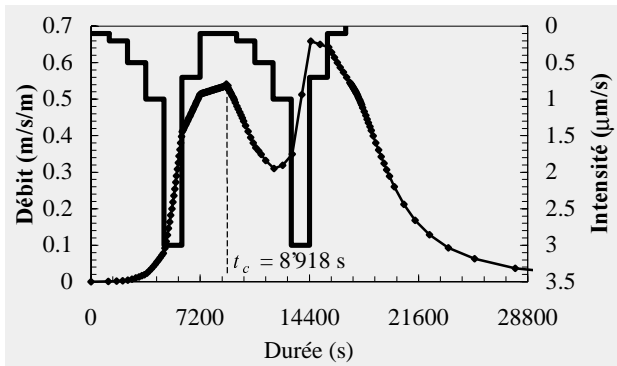


Figure 39 : Exemple d'hydrogramme calculé analytiquement. Cent caractéristiques ont été intégrées à partir de la condition initiale, de même qu'à partir de la condition limite amont. La caractéristique frontière entre ces deux domaines fournit le temps de concentration t_c du plan pour cette pluie particulière.

Dans cet exemple, aucune condition initiale ni hydrogramme amont n'ont été introduits. Si une condition initiale différente de $h = 0$ au début du calcul se présente relativement rarement dans des cas concrets, il n'en est pas de même pour l'hydrogramme amont. En

effet, il est possible de modéliser un bassin versant par une cascade de plans présentant chacun des conditions géométriques différentes. Un hydrogramme calculé sur un plan situé à l'amont devient alors la condition limite du plan aval.

Sans entrer dans les détails (Dubois 2000), il convient de mentionner la possibilité de générer un choc cinématique lorsqu'un hydrogramme amont est fourni à ce modèle. En effet, selon les hypothèses cinématiques, il est possible d'obtenir un déferlement, c'est-à-dire trois hauteurs d'eau simultanées au même endroit. De toute évidence, cette solution analytique des équations de l'onde cinématique ne correspond pas à la réalité physique. Ce phénomène se produit, par exemple, dans le cas d'un plan à forte pente suivi d'un plan à faible pente.

4.2 Transport

Sous l'appellation « Transport », Routing System regroupe ses modèles de routage de crue dans les canaux, les rivières ou les galeries à écoulement libre.

Plusieurs modèles mathématiques sont envisageables pour la simulation des écoulements en nappe libre (Piroton 1995). Le modèle 1D complet en non-stationnaire est décrit par le système d'équations de St-Venant,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (53)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gl_1 \right) = gA(J_0 - J_f) + gl_2 \quad (54)$$

où A est la surface mouillée du profil en travers.

L'équation (53) exprime la conservation de masse tandis que l'équation (54) assure la conservation de la quantité de mouvement. Le terme l_1 tient compte de la forme du profil en travers et se calcule par :

$$l_1 = \int_0^h (h - \eta) b(\eta) d\eta \quad (55)$$

Le terme b désigne la largeur de la section à la cote η , qui est une variable d'intégration, comme représenté sur la figure 40.

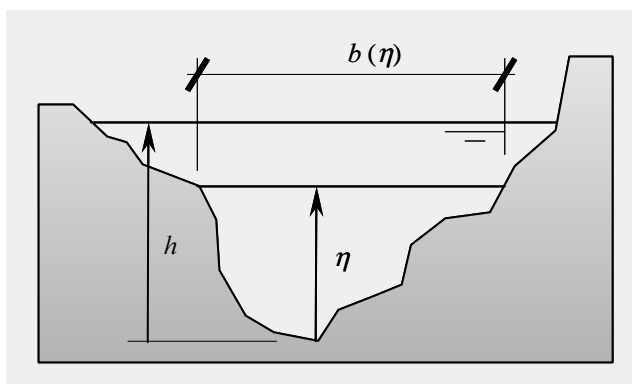


Figure 40 : Description schématique des paramètres utilisés dans le calcul du terme l_1 .

Le terme l_2 tient compte de la variation de la section le long de la rivière. Il est nul dans le cas d'un canal prismatique. D'une manière générale, il s'écrit :

$$l_2 = \int_0^h (h - \eta) \left. \frac{\partial b}{\partial x} \right|_{h=\eta} \quad (56)$$

Selon la situation physique à modéliser, certains termes des équations dynamiques complètes peuvent être négligés pour aboutir à des expressions simplifiées, sans pour autant perdre en qualité.

La philosophie générale de Routing System est de ne pas tenir compte de l'influence exercée par l'aval, puisque celle-ci est négligeable dans une grande majorité de problème de routage de crues. Ainsi, seuls les modèles non influencés par l'aval sont actuellement proposés.



4.2.1 Onde diffusante

En négligeant les deux premiers termes de l'équation (54), celle-ci devient

$$\frac{\partial I_1}{\partial x} = A(J_0 - J_f) + I_2 \quad (57)$$

et correspond à l'approximation de l'onde diffusante. Avec l'hypothèse supplémentaire d'un canal prismatique, il est possible (Cunge 1991) d'écrire (57) sous la forme :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{Q}{BD} \frac{dD}{dh} \right) \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{D^2}{2B|Q|} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (58)$$

où B est la largeur du profil et D la débitance définie par :

$$Q = DJ_0^{1/2} \quad (59)$$

L'équation (58) est une équation aux dérivées partielles de type parabolique, représentant la convection et la diffusion de la variable Q . Ainsi, le débit est transporté à une vitesse c :

$$c = \frac{Q}{BD} \frac{dD}{dh} \quad (60)$$

et diffusé avec un coefficient de diffusion δ :

$$\delta = \frac{D^2}{2B|Q|} \quad (61)$$

En faisant encore l'hypothèse d'une relation univoque entre le débit Q et la hauteur d'eau h , l'équation (58) se réduit à :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (62)$$

Cette équation est appelée « équation de l'onde cinématique. » Elle décrit la convection simple du débit à la vitesse c , telle que définie par l'équation (60). Elle peut être résolue par le schéma numérique en différences finies suivant :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1+X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{\Delta t} \quad (63)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{\frac{1}{2}(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1}{2}(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} \quad (64)$$

Appliqué à l'équation (62), ce schéma permet d'écrire :

$$\frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1+X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{c\Delta t} + \frac{0.5(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + 0.5(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} = 0 \quad (65)$$

La résolution de cette équation pour l'inconnue Q_{j+1}^{n+1} aboutit à :

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^{n+1} + C_2 Q_j^n + C_3 Q_{j+1}^n \quad (66)$$

avec :

$$C_1 = - \frac{KX - \frac{\Delta t}{2}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}}$$

$$C_2 = \frac{KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (67)$$

$$C_3 = \frac{K(1-X) - \frac{\Delta t}{2}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}}$$

et :

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (68)$$

L'hydraulicien reconnaît ici la formule Muskingum (Boillat 1980), du nom de la rivière des Etats Unis sur laquelle cette méthode a été appliquée pour la première fois. Ainsi, la méthode Muskingum représente une approximation en différences finies de l'équation de l'onde cinématique. Ceci n'est qu'une apparence car en fait, en développant les termes de (65) en série de Taylor autour du point (j,n) , en admettant que $\Delta x/\Delta t = c$, et en négligeant les termes en Δx^2 et supérieurs, cette équation peut être écrite sous la forme :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} - cB \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (69)$$

où :

$$B = \Delta x \left(\frac{1}{2} - X \right) \quad (70)$$

Il ressort de cette analyse, proposée par Cunge (1969), que l'équation Muskingum est une écriture en différences finies de

l'équation de l'onde diffusante (58) à condition de poser correctement la valeur des paramètres K et X . K est défini par l'équation (68) et X doit s'écrire, avec la définition de la célérité c et de l'équation (70) par :

$$X = \frac{1}{2} - \frac{D^3}{2\Delta x |Q| Q \frac{dD}{dh}} \quad (71)$$

Cette fonction de l'onde diffusante de Routing System est actuellement capable de résoudre l'équation de Muskingum-Cunge pour les 4 géométries de profil en travers représentés sur la figure 41.

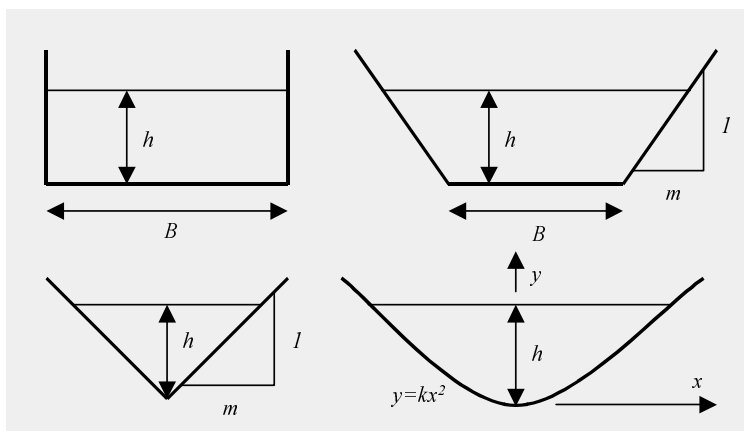


Figure 41 : Profils en travers disponibles dans Routing System pour le calcul de routage.

Le paramètre d'entrée « Type section » permet de sélectionner une des 4 géométries disponibles : 1 : rectangulaire, 2 : trapézoïdale, 3 : triangulaire et 4 : parabolique. Le paramètre « Largeur » correspond, dans le cas du profil parabolique, au paramètre k de l'équation du

profil $y = kx^2$. Le paramètre « m » n'est utilisé que dans les profils 2 et 3 pour définir la pente des talus latéraux selon la relation 1 vertical pour m horizontal.

Les autres paramètres plus classiques sont la longueur du cours d'eau, sa pente et son coefficient de Strickler ainsi que l'hydrogramme amont. Il existe également un paramètre optionnel « Nbre profils » qui permet de choisir la discrétisation spatiale selon la relation $\Delta x = \text{Longueur}/\text{Nbre profils}$. Comme le modèle mathématique de Muskingum-Cunge est soumis à plusieurs critères de stabilité numérique, il est possible que le nombre de profils réellement utilisé pour la simulation se révèle inférieur à ce qui a été demandé.

La figure 42 présente un exemple de routage d'une crue triangulaire où les effets de convection (translation dans le temps) et de diffusion (aplatissement de la pointe) sont bien visibles.

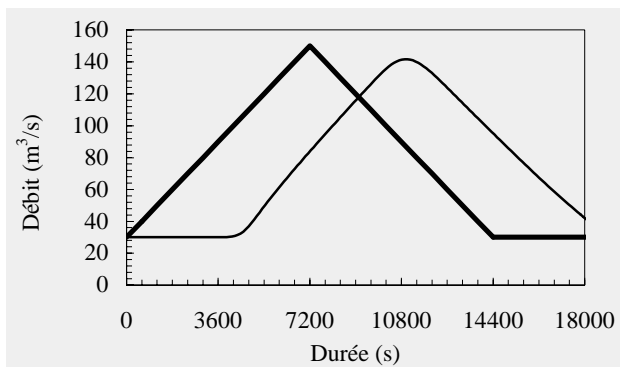


Figure 42 : Exemple de routage par la méthode Muskingum-Cunge.

**Le cours d'eau a une longueur de 20 km, une pente de 1%
un coefficient de Strickler de $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
et un profil rectangulaire de 5 m de largeur.**



4.2.2 Onde cinématique

Le modèle de l'onde cinématique (Boillat 1980) est le modèle de routage le plus simple. Les termes d'inertie et de pression des équations complètes de St-Venant sont négligés. Par conséquent, l'hypothèse cinématique postule que les forces de gravité sont identiques, mais de signe opposé, aux forces de frottement. Cela implique qu'il existe une relation unique entre le débit et la hauteur d'eau, à savoir la hauteur normale.

L'équation de l'onde cinématique, déjà présentée au chapitre précédent, s'écrit :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (72)$$

Il s'agit d'une équation de convection simple qui indique que le débit Q est transporté vers l'aval à une célérité c qui vaut :

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} \quad (73)$$

L'équation (73) se calcule pour une hauteur d'eau h qui est la hauteur normale correspondant au débit Q . Ce modèle très simple transporte à la vitesse c chaque point de l'hydrogramme amont jusqu'à l'aval du cours d'eau. Puisqu'il n'apparaît plus de terme diffusif dans cette équation, le débit de pointe reste strictement constant et n'est pas diminué. Par contre, l'aspect général de la crue est modifié puisque les grands débits sont transférés vers l'aval à une vitesse plus grande que les petits.

Les paramètres d'entrée sont identiques à ceux du modèle d'onde diffusante, à l'exception du nombre de profils qui n'a plus de sens ici. En particulier, cette fonction considère la même géométrie pour les profils en travers que celle décrite au chapitre précédent. La figure 43 présente le même exemple de routage que celui de la figure 42 avec le modèle de l'onde cinématique. Contrairement au modèle de

l'onde diffusante, aucune réduction du débit de pointe n'est observée.

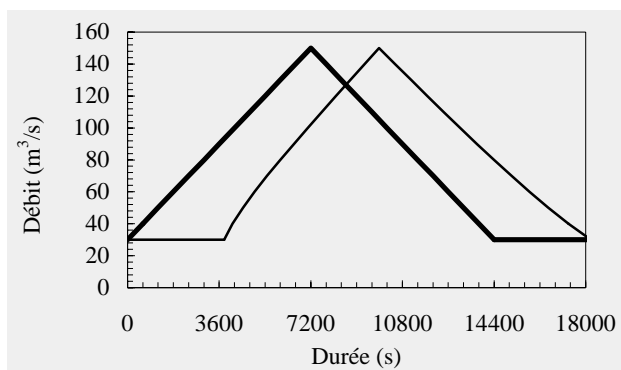


Figure 43 : Exemple de routage par le modèle de l'onde cinématique. Le cours d'eau présente les mêmes caractéristiques que celui de la figure 42.



4.3 Bifurcation

La fonction « Bifurcation » de Routing System est certainement celle qui illustre le mieux le potentiel de la modélisation fonctionnelle telle que décrite au chapitre 2. En effet, aucune normalisation ne peut être envisagée en ce qui concerne les prises d'eau. Il n'est pas envisageable non plus de dresser la liste des paramètres physiques qui permettraient le calcul complet d'une prise d'eau. Cette dernière peut être un simple orifice implanté latéralement sur un cours d'eau. Elle peut également être constituée par un déversoir latéral, avec ou sans ouvrage de contrôle. Elle peut aussi être constituée d'une retenue, équipée d'évacuateurs de crues et d'une station de pompage, comme cela est généralement le cas derrière un barrage.

Tous ces ouvrages hydrauliques d'aspect fort différent partagent cependant une même fonctionnalité au sein d'un réseau hydraulique, celle de séparer des débits.

Mis à part l'hydrogramme entrant, cette fonction requiert la connaissance de la relation « Débit entrant – Débit dérivé », comme illustré à la figure 44. D'une manière générale, cette relation qui décrit le comportement de la prise d'eau n'est pas produite par Routing System. L'utilisateur doit effectuer un calcul du comportement de la prise d'eau et créer ensuite un fichier décrivant la relation Débit entrant-Débit dérivé. Pour certains cas simples, les fonctions de contrôle décrites plus loin peuvent être directement utilisées pour générer cette relation.

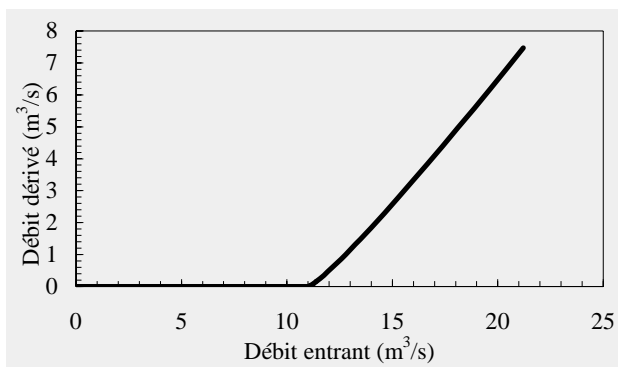


Figure 44 : Exemple de relation Débit entrant-Débit dérivé, calculée pour un déversoir latéral.

Avec cette information, la fonction « Bifurcation » de Routing System est à même de calculer l'hydrogramme dérivé et l'hydrogramme qui continue « tout droit », comme le montre la figure 45.

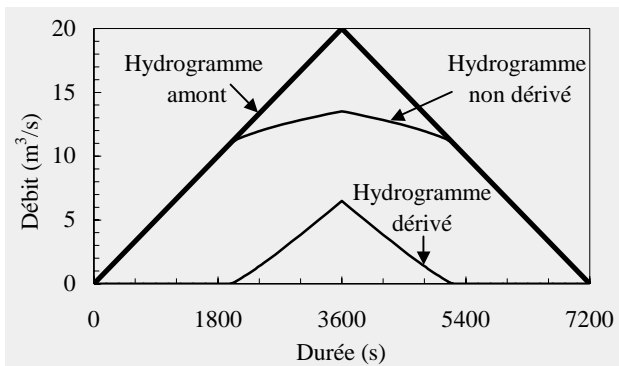


Figure 45 : Exemple de calcul d'une bifurcation.

Cet exemple illustre bien le comportement non-linéaire d'une prise d'eau équipée d'un déversoir latéral. En effet, même pour une crue amont linéaire, les hydrogrammes calculés contiennent suffisamment de points pour décrire correctement le comportement non-linéaire du déversoir.



4.4 Confluence

La fonction « Confluence » de Routing System permet de calculer, de manière générale, l'addition de deux fonctions. Elle permet en particulier d'additionner deux hydrogrammes à une confluence.

D'apparence très simple pour ne pas dire triviale, cette opération est cependant relativement complexe car les fonctions circulant dans un modèle Routing System ne sont ni définies à pas de temps constant, ni synchronisées. Par conséquent, cette fonction effectue plusieurs interpolations pour obtenir le résultat correct.

Si une fonction décrite par n points est additionnée à une autre comportant m points, et si aucun de ces points n'est synchronisé, la fonction résultat comprendra $n + m$ points. Si deux points des fonctions sont synchronisés, le résultat n'en conserve qu'un seul pour éviter des doublons.

Mis à par les deux fonctions à traiter, la boîte « Confluence » comporte un troisième paramètre d'entrée *Coeff* qui permet d'obtenir le résultat suivant :

$$fct_{résultat} = fct_1 + Coeff * fct_2 \quad (74)$$

Si *Coeff* = -1, la fonction « Confluence » permet donc d'effectuer une soustraction.

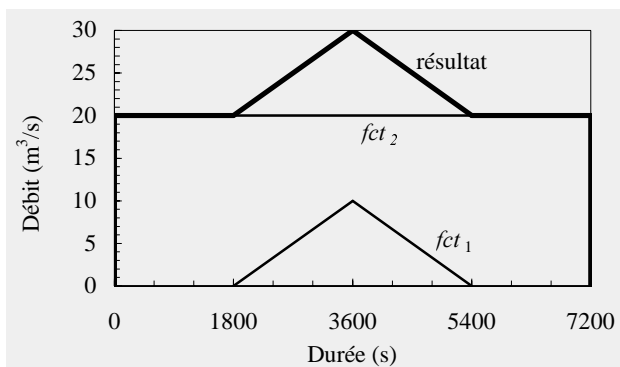


Figure 46 : Exemple d'addition d'un hydrogramme rectangulaire et d'un hydrogramme triangulaire dont les points ne sont pas synchronisés.



4.5 Stockage

L'évolution temporelle du volume d'eau \forall dans une retenue est décrite par l'équation de rétention qui s'écrit :

$$\frac{dV}{dt} = Q_e - Q_s \quad (75)$$

Q_e est le débit entrant dans la retenue et Q_s le débit sortant.

La majorité des retenues sont équipées d'évacuateurs de crues qui sont souvent des déversoirs ou des orifices. Dans ce cas, le débit sortant est fonction du niveau d'eau dans la retenue. Pour résoudre l'équation (75), il est indispensable de pouvoir exprimer ce débit sortant en fonction du volume d'eau V dans la retenue. Cette opération est possible si la relation entre le niveau d'eau et le volume est connue. Dès lors, l'équation (75) est une équation différentielle ordinaire en fonction du temps et du volume. En connaissant encore le niveau d'eau initial, et donc le volume initial, elle est résolue numériquement par la méthode de Runge-Kutta, déjà présentée pour la résolution de la fonction GR3.

Les données à fournir à cette fonction sont au nombre de quatre : l'hydrogramme entrant, la relation Niveau d'eau-Volume, la relation Niveau d'eau-Débit sortant et le niveau d'eau au début du calcul. Les résultats obtenus sont l'hydrogramme sortant de la retenue et le limnigramme de la retenue, c'est-à-dire l'évolution temporelle du niveau d'eau.

Ce calcul de rétention est facilement résolu par les méthodes classiques de l'analyse numérique (figure 47). Cet exemple purement théorique met bien en évidence l'effet de laminage dû à la rétention ainsi que celui lié au niveau initial de remplissage.

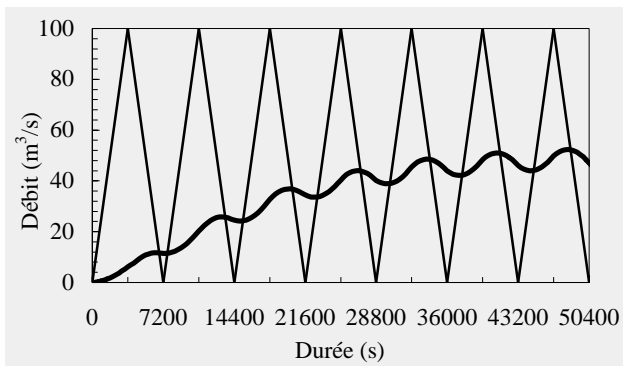


Figure 47 : Exemple d'un calcul de rétention.

L'hydrogramme entrant est une succession de crues triangulaires.

L'hydrogramme sortant est celui représenté en trait épais.

Ce calcul a été effectué pour un bassin rectangulaire de 500'000 m² équipé d'un déversoir standard de 10 m de largeur et initialement plein.

4.6 Contrôle

Dans le contexte général du routage des crues, les fonctions de contrôle de Routing System sont quelque peu particulières. En effet, celles-ci ne participent pas directement au calcul de la propagation des crues, mais servent à alimenter en conditions d'entrée les autres fonctions. Par exemple, la fonction de contrôle « Déversoir » peut servir à générer la relation Niveau-Débit sortant d'un réservoir pour un calcul de rétention ou encore, après certaines manipulations, la relation Débit entrant-Débit dérivé d'une prise d'eau.

Contrairement à l'approche générale du routage de crues dans Routing System, basée sur une description fonctionnelle, les fonctions de contrôle s'appuient sur les dimensions précises des

ouvrages simulés, en d'autres termes, sur leur description organique. Cette concession conceptuelle a été accordée pour deux raisons.

Tout d'abord, les boîtes de contrôle fournissent des résultats sous forme fonctionnelle, par exemple des relations Hauteur-Débit, en parfaite conformité avec le concept de ce logiciel. Ensuite, ces outils deviennent extrêmement utiles lors de l'optimisation d'un système. L'exemple présenté au chapitre 3 va servir à illustrer cette deuxième raison.

Dans cet exemple relatif à la protection contre les crues, l'objectif était de déterminer les dimensions et la cote des déversoirs qui équipent les deux bassins de rétention. Les relations Hauteur-Débit de ces déversoirs peuvent être calculées à l'aide d'un tableur et introduite sous forme de fichiers dans Routing System. Evidemment, l'optimisation d'un système est un processus itératif. Cela signifie qu'après un premier essai, des modifications doivent être apportées aux dimensions des déversoirs pour que le système satisfasse aux objectifs de protection. En présence d'un système complexe, les modifications pertinentes à apporter ne découlent plus de la simple intuition « pifométrique ». C'est pour cette raison que Routing System propose une fonction d'optimisation automatique présentée à la rubrique des fonctions utilitaires.

Grâce aux fonctions de contrôle, cette optimisation peut s'effectuer directement sur les paramètres dimensionnels des ouvrages hydrauliques. Dans l'exemple qui nous guide, si les relations Niveau-Débit sortant sont calculées à l'aide de la fonction « Déversoir » dans Routing System, l'optimisation peut être effectuée directement sur leur cote et leur largeur. Dans le cas contraire, si ces relations sont déterminées dans un tableur et importées dans Routing System, l'optimisation du système ne peut être que manuelle.

Dans l'état actuel, Routing System ne propose que deux fonctions de contrôle, permettant de calculer la relation Niveau-Débit d'un

déversoir à paroi mince ou d'un déversoir standard. Il est bien sûr envisageable de développer de la même manière d'autres fonctions de contrôle, décrivant par exemple un orifice, la hauteur normale ou encore la hauteur critique dans un profil en travers.

4.6.1 Déversoir

Deux fonctions de Routing System permettent de calculer la relation Niveau-Débit d'un déversoir. La première dans le cas d'une paroi mince, la seconde pour un déversoir standard. Pour une description plus complète de la théorie des déversoirs, le lecteur est renvoyé à Sinniger (1988).



4.6.1.1 Déversoir à paroi mince

Le débit Q s'écoulant par un déversoir peut être calculé à l'aide de la relation :

$$Q = C_d B \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (76)$$

C_d est appelé coefficient de débit, B est la largeur du déversoir et h est la hauteur d'eau amont mesurée à partir de la crête du déversoir. Pour calculer le coefficient de débit C_d , Routing System utilise la formule de Rehbock :

$$C_d = 0.4023 \left[1 + \frac{0.135 h}{w} \right] \left[1 + \frac{0.0011}{h} \right]^{3/2} \quad (77)$$

w est la pelle du déversoir, c'est-à-dire la distance qui sépare le fond du canal de la crête déversante.

Les paramètres de cette fonction sont la cote du fond du canal, la hauteur de la pelle w et la largeur B du déversoir. Par défaut, la relation Hauteur-Débit est calculée jusqu'à une hauteur d'eau amont égale à trois fois la hauteur de la pelle w .



4.6.1.2 Déversoir standard

Pour le calcul de la relation Hauteur-Débit d'un déversoir standard, Routing System utilise la même équation de base que pour le déversoir à paroi mince, à savoir l'équation (76). Par contre, le coefficient de débit est exprimé en fonction de la charge H sur le déversoir:

$$C_d = C_{dD} \left(\frac{H}{H_D} \right)^{0.12} \quad (78)$$

C_{dD} est le coefficient de débit de dimensionnement. Pour la géométrie traditionnelle d'un déversoir standard, telle que définie dans Sinniger (1988), $C_{dD} = 0.494$. H_D représente la charge de dimensionnement.

Cette fonction permet également de tenir compte de l'effet de contraction des piles et des murs bajoyers en calculant une largeur efficace B_e selon la relation :

$$B_e = B - 2K_p H \quad (79)$$

K_p est un coefficient de réduction qui varie en fonction de la géométrie des piles et de la charge. Routing System le considère cependant constant pour toutes les charges car sa variation demeure modeste. La gamme des valeurs de K_p pour des piles rectangulaires, circulaires, en calotte ou triangulaires est environ – $0.03 \leq K_p \leq 0.1$.

4.7 Utilitaires

Les fonctions de Routing System regroupées sous l'appellation « Utilitaires » ne sont pas des fonctions hydrauliques, mais elles permettent ou facilitent la mise en œuvre d'un modèle de routage.



4.7.1 Lecture de données

D'une manière générale, les données scalaires d'un modèle de routage sont directement intégrées dans Routing System sous forme de constantes numériques. Elles peuvent également résulter d'une autre fonction située plus à l'amont ou de tout autre traitement.

En présence d'une donnée ayant la forme d'une fonction, comme un hydrogramme, un hyétogramme ou la relation Niveau-Volume d'une retenue, il est souvent plus commode de créer un fichier comprenant cette relation et de le lire à partir de Routing System à l'aide de la fonction suivante.

Cette option effectue la lecture d'un fichier contenant une fonction de forme générale $(x;y)$ et la met à disposition de Routing System pour le calcul.

Le fichier à créer suit les règles de formatage suivantes. En premier lieu, il s'agit d'un fichier *texte*, et non pas binaire, pour des raisons évidentes de simplicité. Chaque point $(x;y)$ de la fonction se trouve sur une ligne, une tabulation séparant la valeur y de la valeur x . L'intervalle Δx séparant deux points peut être variable et finalement, aucune limite n'est imposée sur le nombre de points donnés, si ce n'est celle de la mémoire vive disponible sur l'ordinateur.

Ce type de fichier peut aisément être créé en copiant deux colonnes contenant les données dans un tableur et en collant le tout dans le bloc-notes (Notepad) de Windows. Ce fichier doit se présenter de la même manière que celui montré à la figure 48.

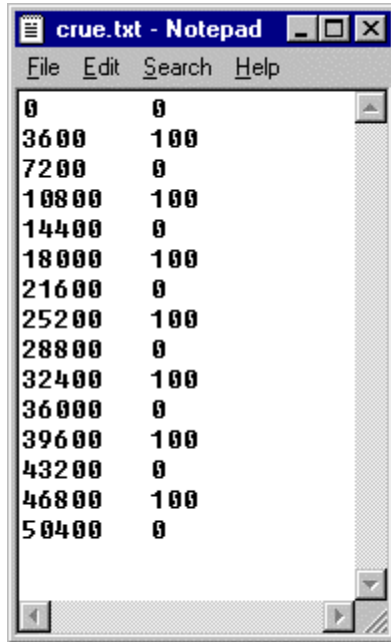


Figure 48 : Exemple d'un fichier texte décrivant l'hydrogramme entrant de la figure 47.

Le seul paramètre d'entrée de cette boîte est le chemin d'accès complet du fichier, par exemple *C:\Data\Crue.txt*. Si ce paramètre n'est pas fourni, une boîte de dialogue s'affiche, qui permet la sélection d'un fichier.

Cette dernière option peut sembler très élégante et pratique. Il faut cependant l'utiliser avec parcimonie. En effet, si le modèle de routage doit lire plusieurs fonctions, il va afficher plusieurs fois la boîte de dialogue qui permet de sélectionner un fichier. Et comme l'ordre d'exécution d'un programme LabVIEW n'est pas connu *a priori*, il devient dès lors impossible de savoir quel fichier est demandé.



4.7.2 *Ecriture de résultats*

Toutes les fonctions circulant dans un modèle Routing System sont certes nécessaires au calcul, mais ne présentent pas forcément un grand intérêt en termes de résultats. Il doit donc être possible de sélectionner celles qui seront enregistrées et celles qui ne le seront pas, ceci afin d'éviter une surcharge du disque dur. Dans ce but, Routing System propose deux options qui permettent cette sélection et l'écriture de la fonction sur un fichier.

Cette option effectue exactement l'opération inverse de la « Lecture d'une fonction ». Il suffit de lui donner une fonction et un nom complet de fichier pour que ce dernier soit créé. Le nouveau fichier *texte* possède un format identique à celui décrit à la figure 48.

A nouveau, si le nom du fichier à créer n'est pas donné, une boîte de dialogue apparaît pour la saisie de ce nom. La même mise en garde que celle formulée pour la « Lecture d'une fonction » s'applique lorsque cette option est choisie.



4.7.3 *Changement d'échelle d'une fonction*

Ce simple utilitaire transforme chaque point (x;y) de la relation donnée en un point ($x_{new};y_{new}$) selon les équations :

$$\begin{aligned}x_{new} &= a_1 + b_1x \\ y_{new} &= a_2 + b_2y\end{aligned}\quad (80)$$

a_1 , a_2 , b_1 et b_2 sont les paramètres à spécifier.

Les utilisations possibles de cette fonction sont soit l'amplification par un facteur, soit le décalage temporel d'un hyétogramme ou d'un hydrogramme.



4.7.4 *Minimum et maximum d'une fonction*

Comme son nom le laisse supposer, cette fonction trouve le minimum et le maximum absolus des y_i d'une relation. Elle cherche ces extrema dans toutes les valeurs y_i de la relation et donne également les valeurs de x associés avec y_{min} et y_{max} .

Dans le cas d'un hydrogramme, par exemple, cette fonction est capable de déterminer le débit de pointe et le temps correspondant.



4.7.5 *Intégration d'une fonction*

Egalement très simple, cette fonction effectue le calcul de l'intégrale d'une relation entre deux bornes x_{inf} et x_{sup} selon l'expression mathématique :

$$\text{Résultat} = \int_{x_{inf}}^{x_{sup}} y \, dx \quad (81)$$

L'intégration d'une relation permet, entre autres, de déterminer la hauteur totale de la pluie tombée à partir d'un hyétogramme ou le volume d'une crue à partir de son hydrogramme.

4.7.6 *Mesure de l'erreur entre deux fonctions*

Une phase importante du processus de modélisation numérique des écoulements est la phase de calage des paramètres. Afin d'aider au mieux l'utilisateur lors de cette étape délicate, Routing System offre deux catégories de fonctions utilitaires : la mesure de l'erreur entre deux fonctions et l'optimisation.

Un algorithme d'optimisation travaille sur une fonction objectif et cherchera à en maximiser ou minimiser le résultat. Cette fonction objectif doit donc représenter une mesure pertinente de la qualité du modèle.

D'une manière générale, la fonction objectif est propre au problème modélisé. Dans un contexte financier, par exemple, elle peut découler d'un calcul de rentabilité d'investissements et s'exprime en francs qu'il s'agit de maximiser. Pour un système hydraulique, l'objectif peut être relativement simple, comme minimiser le débit de pointe à un certain endroit.

Plus fréquemment, lors du calage des paramètres d'un modèle, il est souhaité que toute la série temporelle des débits simulés s'approche au mieux de la série temporelle des débits observés. Dans ce cas, une estimation de l'erreur entre les deux relations est requise.



4.7.6.1 Somme des carrés des erreurs

La méthode la plus simple et la plus couramment utilisée pour mesurer l'erreur err entre n valeurs observées $y_{o,i}$ et n valeurs simulées $y_{s,i}$ est la méthode qui consiste à sommer les erreurs au carré selon l'expression :

$$err = \sum_{i=1}^n (y_{o,i} - y_{s,i})^2 \quad (82)$$

Les valeurs $y_{o,i}$ et $y_{s,i}$ doivent évidemment partager un x_i commun. Ce critère est assuré automatiquement par cette fonction.



4.7.6.2 Somme des carrés des erreurs pondérées

Il est parfois souhaité de donner plus de poids aux débits de pointes, ou aux grandes valeurs en général, lors d'une optimisation. Dans ce cas, l'erreur entre les deux relations décrites par n points peut s'estimer par :

$$err = \sum_{i=1}^n \frac{W_i (y_{o,i} - y_{s,i})^2}{n} \quad (83)$$

W_i est le poids du point i et s'obtient par :

$$W_i = \frac{y_{o,i} + y_m}{2y_m} \quad (84)$$

où y_m est la valeur moyenne des $y_{i,o}$.



4.7.6.3 Fonction de Cauchy

La fonction de Cauchy calcule l'erreur selon l'expression :

$$err = \sum_{i=1}^n \ln\left(1 + (y_{o,i} - y_{s,i})^2\right) \quad (85)$$

Elle est proche de l'expression du maximum de vraisemblance



4.7.7 Optimisation

Cette option de la catégorie des utilitaires effectue l'optimisation, en fait la minimisation, d'une fonction $f(\mathbf{x})$ où \mathbf{x} est un vecteur de n variables scalaires. Cette fonction f est en fait un VI de LabVIEW dont les connexions doivent être strictement identiques à celles de la figure 49.

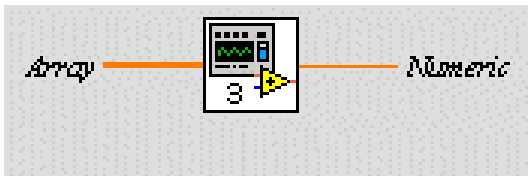


Figure 49 : Structure des connexions strictement imposées pour le VI à optimiser.

Ce VI doit posséder un vecteur de paramètres d'entrée qui seront optimisés, et il doit fournir un seul résultat. Mathématiquement parlant, cet VI est la fonction objectif à minimiser.

Si le problème est soumis à une série de contraintes, alors la fonction objectif doit les gérer elle-même. Une des possibilités consiste à fortement pénaliser le résultat de cette fonction lorsque l'un des paramètres se situe en dehors de son domaine de validité. Par exemple, si la variable z est soumise à la contrainte $z \leq a$ et que la fonction objectif reçoit, au cours des itérations de l'optimisation, une valeur $z > a$, la fonction peut alors retourner la valeur $100'000 + 1'000(x - a)$. Dans cette expression, la constante 100'000 pénalise fortement la fonction objectif lorsqu'une contrainte n'est pas satisfaite et le produit $1'000(x - a)$ permet à l'algorithme de déterminer un gradient, et donc la direction vers laquelle il doit se diriger pour trouver le minimum.

La boîte « Optimisation » de Routing System demande trois paramètres d'entrée : le nom du VI à optimiser, qui possède la structure des connexions indiquée à la figure 49 et qui doit être ouverte, le vecteur des valeurs initiales des paramètres à optimiser et la précision ou critère de convergence qui permet de terminer l'optimisation. Les résultats fournis par cette boîte sont le vecteur des paramètres optimisés et la valeur de la fonction objectif correspondante.

L'algorithme d'optimisation est appelé « Downhill Simplex Method ». Sa description détaillée peut être trouvée dans Walters et al. (1991). Il faut cependant garder à l'esprit que cette méthode ne trouve qu'un minimum local de la fonction et non pas le minimum global. Le minimum local trouvé dépend de la valeur initiale des paramètres.

La performance de ce type d'algorithme dépend fortement de la qualité de la fonction objectif. Si celle-ci présente un minimum évident, la méthode du Simplex va le trouver à partir de n'importe quel jeu de valeurs initiales. Par contre, si plusieurs minimum locaux

apparaissent dans la fonction objectif, la méthode du Simplex va tomber sur l'un d'eux et n'en ressortira peut être plus.

Pour choisir un bon jeu de valeurs initiales, il est donc toujours utile de tracer les surfaces de réponse de la fonction objectif en explorant systématiquement le domaine de validité de ses paramètres.

5. Exemples d'application

La description théorique de Routing System peut paraître abstraite et conceptuelle. Afin de démontrer la réelle simplicité de cette approche, un exemple concret est développé. Il servira de base pour la discussion des différents modèles proposés dans la palette de Routing System et donnera un aperçu de la manière de travailler avec ce logiciel.

Le but de cet exemple est d'illustrer la façon de travailler avec Routing System. Bien qu'il se fonde sur les données réelles d'un aménagement hydroélectrique, les résultats sont uniquement indicatifs et ne doivent pas être considérés comme une référence pour cet aménagement.

5.1 Etude des crues à Mattmark

La société des Forces Motrices de Mattmark S.A. a pour but l'exploitation des forces hydrauliques de la Viège de Saas dans le canton du Valais en Suisse. Le bassin d'accumulation de Mattmark constitue l'ouvrage principal de l'aménagement. D'une hauteur de 120 m, une digue en terre et en enrochements ferme la vallée au pied du glacier de l'Allalin et crée une retenue d'un volume utile de 100 mio de m³.

Le bassin versant naturel de Mattmark occupe 37 km² au fond de la vallée de la Viège de Saas et présente des caractéristiques alpines typiques : altitudes de 2200 m à près de 3900 m pour une pente moyenne de 21% environ. La majeure partie du bassin est composée de rochers et de sols incultes, les glaciers occupant 22% de la surface. La figure 50 présente, sous forme schématique, le plan de cet aménagement.

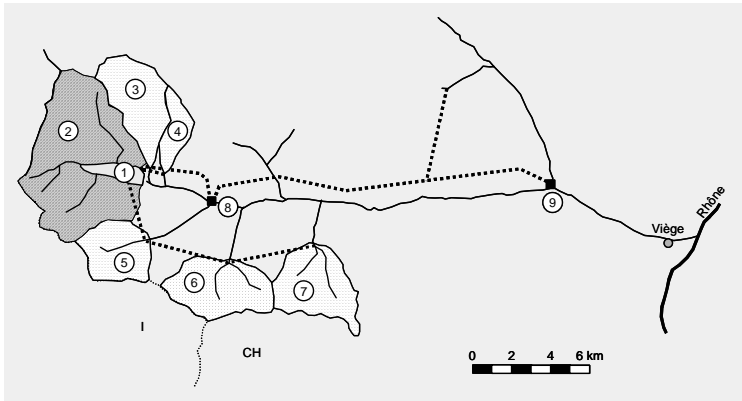


Figure 50 : Vue schématique de l'aménagement de Mattmark.

- ① retenue de Mattmark
- ② bassin versant direct
- ③-⑦ bassins versants latéraux
- ⑧ Centrale de Zermeigern
- ⑨ Centrale de Stalden

La retenue de Mattmark est équipée d'un ouvrage d'évacuation des crues composée d'un déversoir suivi d'une auge latérale et d'une galerie. Lors de la construction, le débit de dimensionnement de cet ouvrage a été fixé à $150 \text{ m}^3/\text{s}$. Dans cet exemple, le système complet Bassin versant, Retenue et Evacuateur va être modélisé pour analyser son comportement en situation de crues extrêmes. Pour des raisons de simplicité, les débits turbinés dans les centrales et les adductions latérales ne sont pas considérés.

5.1.1 Modélisation hydrologique

La première étape consiste à élaborer un modèle hydrologique du bassin versant direct de la retenue. Comme cet exemple ne concerne que les crues extrêmes et également dans un but de

simplicité, il peut être admis de négliger les apports des adductions latérales.

Toute modélisation repose sur un certain nombre de choix. Le bassin versant peut être analysé globalement ou découpé en sous-bassins. L'infiltration peut être considérée ou non, tout comme l'effet du routage des crues dans le réseau hydrographique. Pour que cet exemple reste simple et facilement abordable, il a été choisi de modéliser globalement le bassin versant direct de la retenue de Mattmark avec le modèle GR3 comme fonction de production et le modèle Ranoc comme fonction de transfert.

Les détails concrets concernant l'usage de LabVIEW ne sont pas traités ici. Le lecteur peut se reporter sur la très complète et abondante documentation qui accompagne ce logiciel.

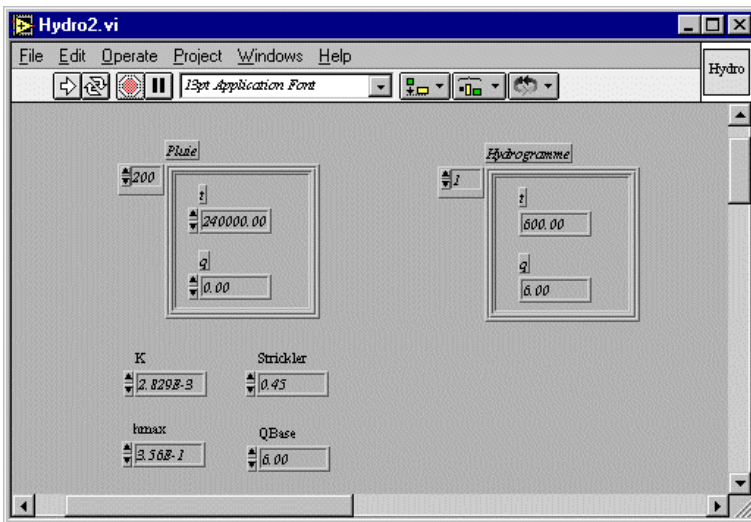


Figure 51 : Face avant de la « boîte » dédiée à l'hydrologie.

L'aspect de la face avant (*front panel*) du VI dédié au calcul hydrologique est montré sur la figure 51.

Les données nécessaires sont regroupées sur la gauche. Elles concernent le hétérogramme qui décrit l'évolution temporelle de la pluie, les paramètres de calage du modèle GR3 qui sont K , h_{max} et Q_{base} , et le coefficient de Strickler du modèle Ranoc. Le résultat fourni est l'hydrogramme de crue entrant dans la retenue.

Il faut préciser que seuls les paramètres variables et ajustables des modèles sont visibles sur la face avant, ceci dans le but de faciliter la modification de leur valeur. Les autres paramètres fixes sont introduits directement comme constantes dans le bloc diagramme correspondant, représenté sur la figure 52.

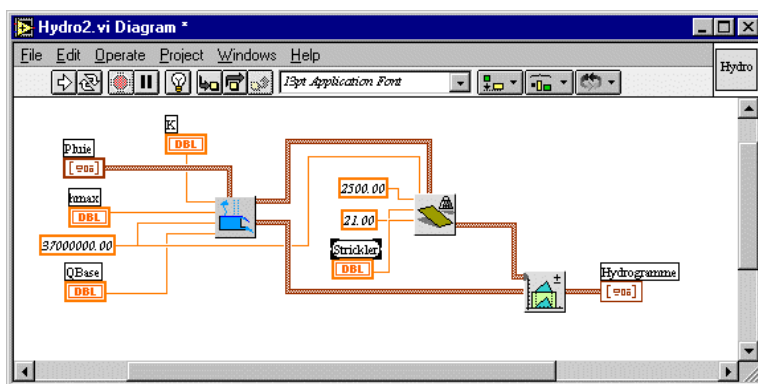


Figure 52 : Bloc diagramme de la modélisation hydrologique.



La première icône à gauche est le modèle GR3 qui calcule une pluie nette à partir d'une pluie brute ainsi qu'un débit de base. Ses paramètres sont K , h_{max} et Q_{base} dont les valeurs se trouvent sur la face avant. La pluie brute qui est également fournie à cette fonction de production se trouve aussi sur la face avant. La surface du bassin versant de 37 mio de km^2 et donnée sous la forme d'une constante.



La première série temporelle qui sort du modèle GR3 est la pluie nette, qui devient une donnée de la fonction de transfert Ranoc.

Cette dernière exige également la connaissance du coefficient de Strickler du plan, qui provient de la face avant, ainsi que la longueur (2'500 m) et la pente moyenne (21%) donnés sous forme de constantes.



L'hydrogramme « rapide » calculé par Ranoc doit ensuite être additionné à l'hydrogramme de base calculé par GR3, au moyen de la fonction « Confluence ». Son résultat est l'hydrogramme de crue entrant dans la retenue.

Ainsi formé, ce système est capable de calculer une crue à partir de n'importe quelle pluie qui lui est fournie. Mais avant de pouvoir l'utiliser valablement, il est indispensable d'effectuer une opération de calage de ses paramètres.

5.1.2 Calage du modèle hydrologique

La fonction d'optimisation automatique de Routing System est utilisée dans ce processus de calage. Comme elle fait appel à certaines techniques un peu évoluées de LabVIEW, et non pas seulement à Routing System, le lecteur non initié peut éprouver quelques difficultés de compréhension. Cependant, il pourra toujours se référer par la suite à ce chapitre comme base de travail pour ses propres analyses.

Le calage d'un modèle est une opération parfois longue et délicate et qui demande un maximum d'informations concernant le comportement du système analysé. Dans le cas d'un modèle hydrologique, il faudrait idéalement disposer d'un grand nombre de mesures pluie-débit, en sélectionner aléatoirement la moitié pour effectuer le calage des paramètres et utiliser l'autre moitié pour valider ce calage. Concrètement, des mesures de pluie et de débit de bonne qualité sont souvent rares, voire parfois inexistantes sur les bassins versants alpins de ce type, en particulier en situations de

crues. Dans ce cas, le calage d'un modèle hydrologique devient très délicat et repose principalement sur l'expérience.

La région de Mattmark a connu une importante crue durant le mois de septembre 1993. Cet événement a été largement commenté et documenté. Il sera utilisé dans cet exemple pour le calage du modèle hydrologique développé plus haut. La figure 53 présente les données de pluie et de débit disponibles pour l'événement précité.

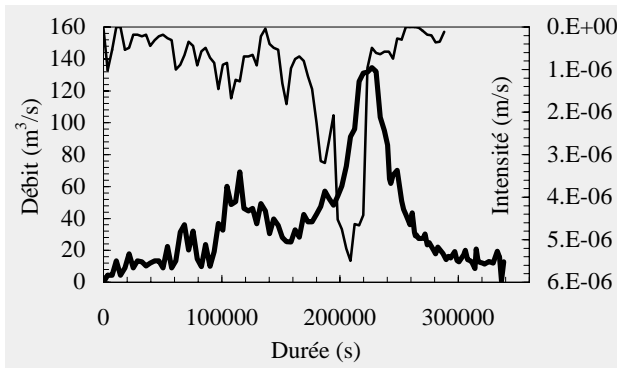


Figure 53 : Hyétogramme et hydrogramme de la crue historique de septembre 1993 dans la région de Mattmark.

Avant de pouvoir utiliser la boîte « Optimisation », il est nécessaire de développer la fonction objectif à minimiser. Pour rappel, cette fonction doit se présenter sous la forme d'un VI LabVIEW qui présente un vecteur de nombres réels en entrée et un seul nombre réel comme résultat. La figure 54 présente le bloc diagramme de la fonction objectif développée pour notre exemple.

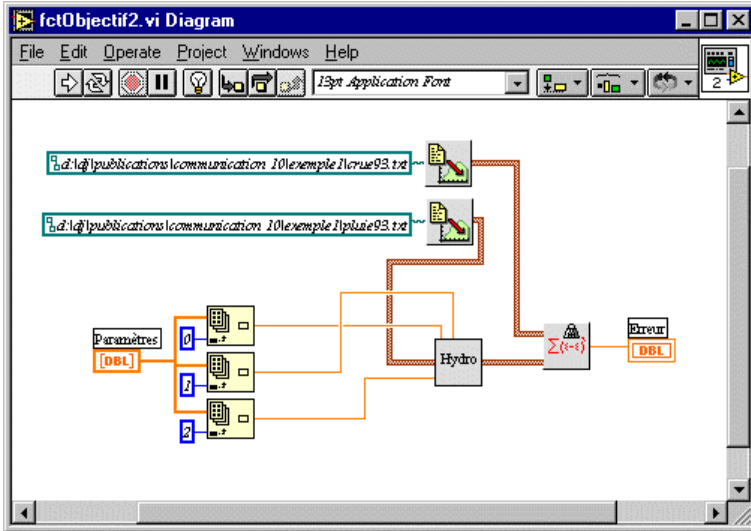


Figure 54 : Bloc diagramme de la fonction objectif à minimiser dans le processus de calage des paramètres du modèle hydrologique.

Hydro

La boîte située au centre de ce diagramme représente le modèle hydrologique du bassin versant de Mattmark, dont le bloc diagramme a été présenté à la figure 52. Ses paramètres d'entrée, qui se situent sur la face avant visible à la figure 51, sont la pluie et les coefficients K , h_{max} et *Strickler*. Son résultat est l'hydrogramme entrant dans la retenue.



Pour l'événement historique qui sert au calage, la pluie est une donnée qui n'est pas modifiée. Elle est directement lue dans le fichier *pluie93.txt* grâce à la boîte « Lecture d'une fonction ».

L'optimisation doit s'effectuer sur les trois paramètres du modèle hydrologique, à savoir K , h_{max} et *Strickler*. Le vecteur des paramètres contient donc ces trois éléments. Ce vecteur est indicé, à l'aide des fonctions natives de LabVIEW, pour en extraire les éléments et les

transmettre au modèle hydrologique. Aucun test de validité de ces paramètres n'est effectué ici.



La qualité du modèle se calcule ensuite en comparant la crue mesurée, qui est lue par la deuxième boîte de « Lecture d'une fonction » dans le fichier *Crue93.txt*, et la crue simulée, fournie par la boîte « Hydro ». La fonction d'erreur choisie est celle basée sur la somme des erreurs carrées pondérées.

Tous les outils sont maintenant disponibles pour procéder à une optimisation qui est effectuée par le VI dont la face avant est présentée à la figure 55.

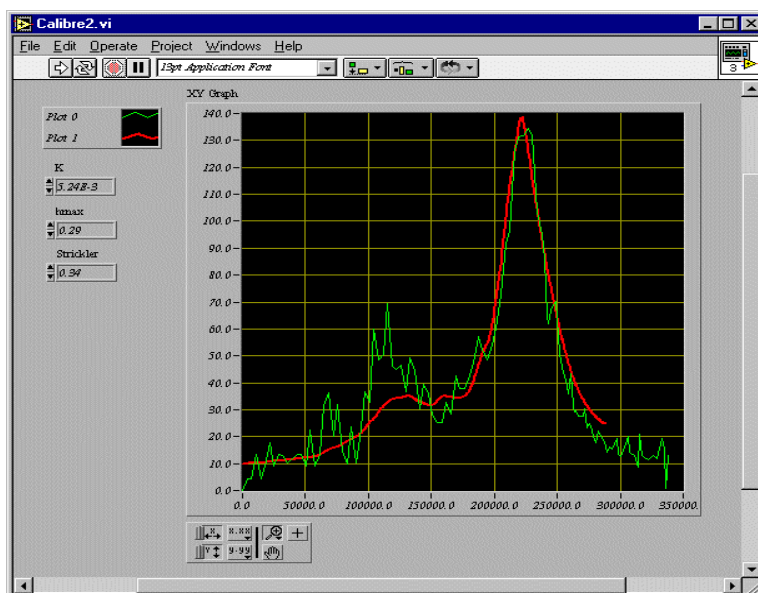


Figure 55 : Face avant du VI qui effectue l'optimisation automatique des paramètres du modèle hydrologique.

Les valeurs initiales des paramètres sont fournies par l'intermédiaire de trois cases de contrôle. Le résultat graphique de l'optimisation est

également visible avec la crue mesurée en vert et la crue simulée en rouge.

Le bloc diagramme qui permet d'obtenir ce résultat est présenté sur la figure 56.

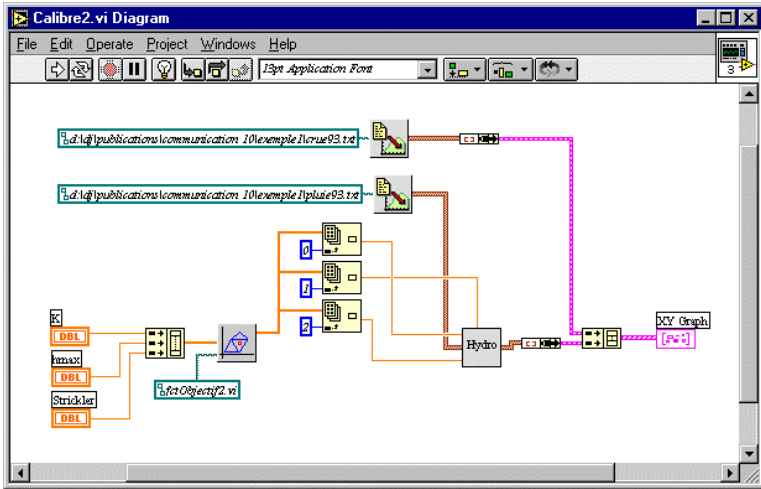


Figure 56 : Bloc diagramme qui effectue l'optimisation des paramètres et le calcul de la crue historique avec les paramètres optimisés.



La boîte « Optimisation » est alimentée par le vecteur contenant les valeurs initiales des paramètres ainsi que par le nom du VI à traiter. Son résultat est le vecteur des paramètres optimisés.



Le modèle hydrologique du bassin versant de Mattmark est à nouveau calculé avec les paramètres optimisés et la pluie mesurée, lue toujours dans le fichier *Pluie93.txt*. L'hydrogramme simulé est ensuite comparé graphiquement avec l'hydrogramme mesuré, lu dans le fichier *Crue93.txt*.

Malgré l'approche très simple retenue pour cet exemple, la figure 54 indique une très bonne concordance entre la mesure et la

simulation. Le calage a proposé $K = 2.83^E-3$, $h_{max} = 0.36$ et *Strickler* = 0.45. De toute évidence, la validation de ce modèle devrait être effectuée sur plusieurs autres événements mesurés. Cependant, dans le cadre de cet exemple, le modèle hydrologique est considéré comme opérationnel.

La suite de la modélisation va considérer la présence de la retenue et son effet de laminage sur les crues afin d'analyser le comportement de l'évacuateur en situation de crue extrême.

5.1.3 Comportement de l'évacuateur en cas de crue extrême

Une étude sur les précipitations extrêmes dans la région de Mattmark (CRUEX 1995) a permis de trouver les coefficients de la formule de Talbot pour quantifier la pluie extrême en fonction de sa durée :

$$i_m = \frac{0.02354}{t_m^{0.75}} \quad (86)$$

Quelle est la durée de pluie qui conduit au débit maximum entrant dans la retenue ? Quelle est la durée de pluie qui conduit à la surélévation maximale du plan d'eau, et donc au débit sortant maximum ? La réponse à ces questions est apportée par le modèle suivant, dont la face avant est présentée à la figure 57

Ce modèle permet d'introduire une durée de pluie et affiche graphiquement l'hydrogramme entrant dans la retenue et l'hydrogramme laminé sortant par l'évacuateur de crues. Son bloc diagramme est présenté sur la figure 58.

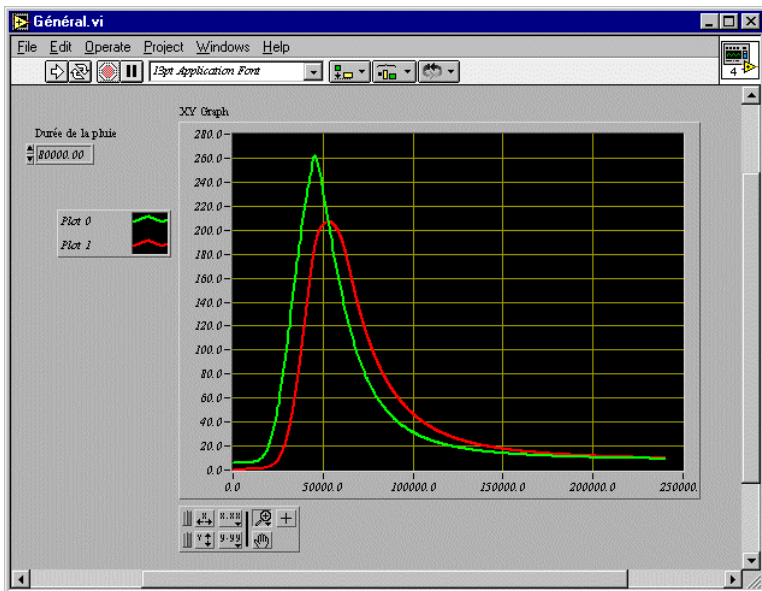


Figure 57 : Face avant du modèle complet pour l'étude des crues extrêmes à Mattmark.



La pluie de projet est structurée temporellement selon une distribution de Weibull. Les paramètres correspondant à la courbe I-D-F « extrême » sont donnés sous forme de constantes. La boîte « Averse de Weibull » fournit la pluie brute pour le modèle hydrologique.



La boîte « Stockage » effectue le calcul du laminage. Les relations Hauteur-Volume et Hauteur-Débit sortant sont lues dans deux fichiers. Elles ont été calculées de manière indépendante à Routing System. La retenue est supposée pleine au début de la crue. Son niveau initial est donc imposé à 2197 ms.m. qui correspond à la cote de la crête du déversoir. Finalement, la crue entrante et la crue sortante par l'évacuateur sont assemblées pour être affichées sur le même graphique.

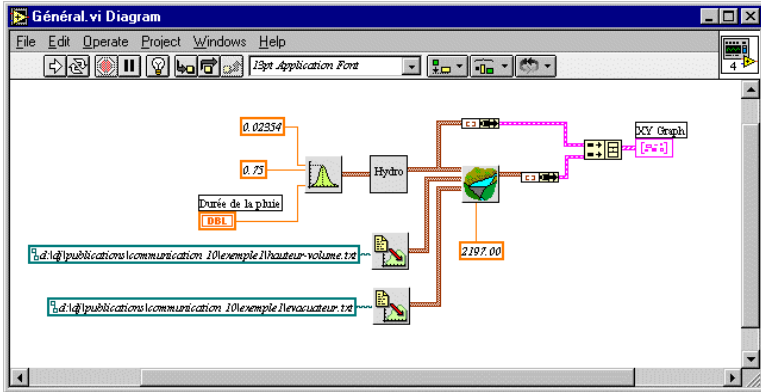


Figure 58 : Bloc diagramme du modèle complet.

Ce modèle d'apparence simple permet néanmoins une intéressante analyse du système. Pour chaque durée de pluie, le modèle fournit le maximum du débit entrant et le maximum du débit sortant. En faisant varier cette durée de pluie et en traçant les maxima en fonction de la durée de la pluie, on obtient le graphique de la figure 59.

Il ressort de cette figure que la durée de pluie qui produit le plus grand débit, supérieur à $260 \text{ m}^3/\text{s}$, à l'entrée de la retenue est d'environ 20 heures. Selon l'approche hydrologique traditionnelle, cette durée serait considérée comme le temps de concentration du bassin et la crue correspondante serait utilisée par la suite pour le dimensionnement de l'évacuateur.

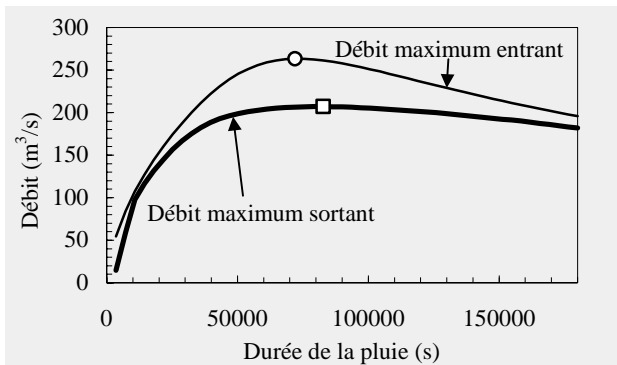


Figure 59 : Représentation graphique des débits maxima entrant et sortant en fonction de la durée de la pluie.

En fait, le point le plus intéressant correspond au débit sortant maximum qui est atteint pour une pluie d'une durée de 24 heures, plus longue que le temps de concentration du bassin versant. Ce phénomène est dû à l'effet de rétention de la retenue qui ne dépend pas seulement du débit de pointe, mais aussi du volume de l'hydrogramme entrant. Le débit sortant maximum est alors de 207 m³/s. Bien que cette valeur soit supérieure aux 150 m³/s pris en compte lors du dimensionnement, un calcul hydraulique détaillé de cet ouvrage indique un fonctionnement sans problème.

Ce simple exemple, dont il convient de rappeler la valeur purement illustrative, met bien en évidence la nécessité de considérer l'ensemble du système bassin versant-retenu. Cette analyse globale est possible à l'aide des outils mis à disposition par Routing System.

6. Conclusions

Le concept de modélisation fonctionnelle et le logiciel Routing System présentés dans ce document permettent une modélisation à la carte des systèmes hydrauliques, aussi complexes soient-ils. Cette grande souplesse de modélisation, liée à la fois à la description fonctionnelle du système et à la qualité de l'environnement graphique de programmation, facilite le passage d'un état à un autre, d'une variante d'aménagement à une autre. Elle facilite également de manière très significative la comparaison des résultats et les études de sensibilité.

Routing System offre une transparence totale de la modélisation. A l'opposé des programmes « boîtes noires », le choix des modèles mathématiques qui décrivent le comportement des éléments du système incombe directement à l'utilisateur. Cette procédure qui exige un engagement conceptuel de l'utilisateur est le garant d'une simulation numérique consciente. La transparence de Routing System ressort de la programmation graphique qui permet une lecture quasi immédiate du modèle, compréhensible pour tout utilisateur averti.

Par le seul recours à ses fonctions de base, Routing System offre déjà un important potentiel d'analyse. Ce dernier peut être renforcé considérablement par le recours à des fonctions additionnelles, comme la fonction d'optimisation *ad hoc*, ou encore des fonctions spécialisées de LabVIEW disponibles sous forme de toolkits. S'agissant d'un langage de programmation complet, il est évident que Routing System conserve un fort potentiel de développement.

De nombreux exemples, développés par différents utilisateurs, témoignent de la convivialité et de la performance de ce logiciel. Ces qualités se mesurent surtout par la rapidité de modélisation d'un

systeme, ainsi que par la facilite de gestion et d'interpretation des resultats obtenus.

Notations

<i>Symbole</i>	<i>Unité</i>	<i>Définition</i>
α		Coefficient de la relation générale hauteur-vitesse
Γ		Fonction gamma
γ	(1/s)	Paramètre de décroissance de l'infiltration
δ	(m ² /s)	Coefficient de diffusion
ν	(m ² /s)	Viscosité cinématique
\forall	(m ³)	Volume
\forall_c	(m)	Infiltration cumulée
Δt	(s)	Pas de temps de l'intégration numérique
Δx	(m)	Pas d'intégration spatiale
A	(m ²)	Surface du bassin versant
a, b, c		Coefficients de la formule de Talbot
B	(m)	Largeur du plan Miroir du profil
B_e	(m)	Largeur efficace du déversoir
c	(m/s)	Célérité d'une onde
C	(m ^{1/2} /s)	Coefficient de Chézy
C_1, C_2, C_3	(-)	Paramètres du modèle Muskingum
C_d	(-)	Coefficient de débit du déversoir
C_{dD}	(-)	Coefficient de débit de dimensionnement
C_r	(-)	Coefficient de ruissellement
D	(m ³ /s)	Débitance
ETP	(m/s)	Evapotranspiration potentielle
ETR	(m/s)	Evapotranspiration réelle
g	(m/s ²)	Coefficient de gravitation
H	(m)	Charge hydraulique
h	(m)	Hauteur d'eau
h_0	(m)	Hauteur d'eau initiale
H_D	(m)	Charge de dimensionnement

h_{max}	(m)	Hauteur maximale (capacité) du réservoir sol du modèle GR3
i	(m/s)	Intensité de la pluie
i_0	(m/s)	Taux d'infiltration initial
i_{brute}	(m/s)	Intensité de pluie brute
i_f	(m/s)	Taux d'infiltration limite à saturation
i_{inf}	(m/s)	Taux d'infiltration
i_m	(m/s)	Intensité moyenne de pluie
i_{max}	(m/s)	Intensité maximale de la pluie
i_{nette}	(m/s)	Intensité de pluie nette
J_0	(-)	Pente de fond
J_f	(-)	Pente de frottement
K	($m^{1/3}/s$)	Coefficient de Strickler
K	(s)	Coefficient du modèle Muskingum
K^*	(1/s)	Constante de tarissement du modèle GR3
K_1	(-)	Paramètre de vidange du modèle GR3
K_p	(-)	Coefficient de piliers
L	(m)	Longueur du plan
m		Coefficient de la relation générale hauteur-vitesse
n	(-)	Facteur de forme de la distribution de Weibull
Q	(m^3/s)	Débit
Q_{base}	(m^3/s)	Débit de base
Q_e	(m^3/s)	Débit entrant
Q_s	(m^3/s)	Débit sortant
r	(-)	Facteur de forme
s	(s)	Intervalle de temps
		Surface mouillée du profil en travers
t	(s)	Temps
t^*	(s)	Temps de montée du hyétogramme
t_p	(s)	Durée de la pluie
u	(m/s)	Vitesse moyenne de l'écoulement
w	(m)	Pelle du déversoir

X	(-)	Coefficient du modèle Muskingum
x	(m)	Coordonnée cartésienne longitudinale

Abbréviations

<i>Abbréviation</i>	<i>Description</i>
ActiveX	Nom commercial du Component Object Model (COM) à la base des systèmes d'exploitations de Microsoft.
CNSGB	Comité National Suisse des Grands Barrages.
CRUEx	Projet de recherche concernant les CRUes Extrêmes et la sécurité des grands barrages.
DLL	Dynamic Link Library. Un module logiciel contenant du code exécutable.
E/S	Entrée/Sortie. En Anglais I/O pour Input/Output.
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
G	Langage de programmation graphique du logiciel LabVIEW.
GPIB	General Purpose Interface Bus, également dénommé bus IEEE 488. Protocole standard de communication entre un instrument électronique et un ordinateur.
GR3	Modèle hydrologique développé par le Centre National du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et de la Forêt (CEMAGREF).

HydroInvent	Projet de recherche du LCH destiné à concevoir une base de donnée des aménagement hydrauliques en Suisse.
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Nom commercial d'un logiciel d'acquisition et de traitement de données.
LCH	Laboratoire de Constructions Hydrauliques.
National Instruments	Société basée à Austin, Texas, qui produit, entre autres, le logiciel LabVIEW.
OFEE (OFEG)	Office Fédéral de l'Economie des Eaux. (Dès 2000, Office Fédérale des Eaux et de la Géologie)
RANOC	Résolution Analytique de l'Onde Cinématique. Modèle hydrologique développé par le LCH.
Routing System	Librairie de fonctions hydrauliques développée par le LCH dans l'environnement LabVIEW.
RS-232	Port série d'un ordinateur.
RS-485	Port série (parfois sur MacIntosh)
SWMM	Storm Water Managment Model, développé par le US Environmental Protection Agency (EPA).
TCP-IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol.
VI	Virtual Instrument. Un module de code créé par le logiciel LabVIEW.

Bibliographie

- Bérod D. (1995) « Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes. Apport de la description géomorphologique pour la simulation des processus. » *Thèse No 1319*, EPFL.
- Boillat J.-L., (1980) Polycopié « Hydraulique urbaine », Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Boillat J.-L., Dubois J. (1998) « Application of the PMP-PMF methodology to the Mattmark scheme » Proc. Of Int. Symp. On new trends and guideline on dam safety, pp 1221-1228, Barcelona, 17-19 june.
- Boillat J.-L., Dubois J. (1999) « Approche méthodologique PMP-PMF. Application au barrage des Toules. » Colloque international sur la sécurité des barrages, Liège.
- Boillat J.-L., Dubois J., Schleiss A. (2000) « Utilisation possible de la retenue de Mattmark pour la protection contre les crues et la production d'énergie. » *Proc. XX Congress ICOLD*, Q. 77-R.23, pp. 341-357, Beijing.
- Boillat J.-L., Mardini R., Ihly T., (1997) « Flood modeling related to land development. » DHI software user conference, Copenhagen.
- Chow, V., T. (1988) "Applied Hydrology", Civil Engineering Series, *Mc Graw-Hill International Edition*.
- Consuegra D., Niggli M., Musy A. (1998) "Concepts méthodologiques pour le calcul des crues. Application au bassin versant supérieur du Rhône. », *Wasser, Energie, Luft – eau, énergie, air*, Heft 9/10, pp. 223-231.

- CRUEX (1995) "Cinquième rapport intermédiaire. Exercice de coordination de Mattmark. » LCH, LASEN, IATE, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Cunge J.A., (1969) « Au sujet d'une méthode de calcul de propagation des crues (Méthode Muskingum) » *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), pp. 205-230.
- Cunge J.A., (1991) Polycopié « Simulation des écoulements non-permanents dans les rivières et canaux. » Institut National Polytechnique de Grenoble, Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble.
- Dubois J. (1998) « Comportement hydraulique et modélisation des écoulements de surface. » Thèse No 1980, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne et Communication No 8, Laboratoire de Constructions Hydrauliques.
- Dubois J., Boillat J.-L. (1999) « Numerical simulation of flood routing in complex schemes. The Routing System computer program." *Proc. XXVIII IAHR congress 22-27 August, Graz, Austria.*
- Dubois J., Bollaert E., Boillat J.-L. (1999) « Optimisation of detention basin systems using the data flow programming technique. » *Proc. 2nd Inter-Regional Conference on Environment-Water, Lausanne.*
- Dubois J., Piroton M. (2000) « Modélisation numérique des écoulements de surface. Le logiciel Faitou. » Communication No 10, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (en préparation).
- El-Jabi N., Rousselle J., (1987) « Hydrologie fondamentale. » Génie Civil, Ecole Polytechnique de Montréal.
- Hager W.H., Sinniger R.O. (1988) « Reservoir storage effect on design flood." *Proc., Seizième Congrès des Grands Barrages, Q. 63-R. 80, pp. 1375-1399, San Francisco.*

- Hörlér A., (1962) « Canalisation. », Tiré à part du manuel de l'ingénieur, tome II.
- Horton R. E. (1933) "The role of infiltration in the hydrologic circle." *Trans. Amer. Geophys. Union*, 14, 446-460.
- Jordan J.-P., Bathurst J.-C., Musy A. (1987) "Modélisation hydrologique à base physique sur un bassin versant rural en climat tempéré." » *Proc. of the Symposium AISH*, Vancouver.
- Keifer J.-C., Chu H.H. (1957) "Synthetic storm patterns for drainage design." *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 83, No 4.
- Kölla E. (1986) « Zum Abschätzung von Hochwassern in Fließgewässern an Stellen ohne Direkmessungen. », *Mitteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, ETH Zürich, 163 p.
- Metcalf and Eddy, Inc., University of Florida, and Water Resources Engineers, Inc. (1971), Storm Water Management Model, Vol. I. Final Report, 11024DOC07/71 (NTIS PB-203289), U.S. EPA, Washington, DC, 20460.
- Michel C., Edijatno, (1988) « Réflexion sur la mise au point d'un modèle pluie-débit simplifié sur plusieurs bassins versants représentatifs et expérimentaux. », *CEMAGREF* Antony.
- Musy A., Higy C., (1999) Polycopié "Hydrologie appliquée". Hydrologie et Aménagements, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Nash J. E. (1957) "The form of the instantaneous unit hydrograph." *Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 45, 3, 1114-1121.
- Pirotton M. (1995) " Modélisation des discontinuités en écoulement instationnaire à surface libre. Du ruissellement hydrologique en fine lame à la progression d'ondes consécutives aux ruptures de barrages. » Thèse de doctorat, Facultés des Sciences Appliquées, Université de Liège, 479 pages.

- Singh V. P. (1995) "Computer models of watershed hydrology." *Water Ressources Publications*, 1129 pp.
- Sinniger R. O., Boillat J.-L. Dubois J. (1995) « L'hydrogramme de crue critique d'une retenue avec évacuateur de surface. », *Symposium CNSGB Recherche et développements dans le domaine des barrages*, Crans-Montana, 7-9 septembre, pp. 653-664.
- Sinniger R.O., Hager W.H. (1989) « Constructions Hydrauliques. Ecoulements stationnaires » *Traité de Génie Civil*, Vol. 15, Presses Polytechniques Romandes.
- Soil Conservation Service (1975) "National Engineering Handbook, section 4, Hydrology." *United States Department of Agriculture (USDA)*.
- Vischer D. (1980) "Das höchstmögliche Hochwasser und der empirische Grenzabfluss." *SIA 40/80*, pp 981-985.
- Walters F.H. (1991) "Sequential Simplex Optimisation" *CRC Press LLC*, Florida.
- Williams J. R., Hann R. W. (1973) "HYMO, A Problem-Oriented Computed Language for Hydrologic Modeling." *User's manual*, ARS-S-9, United States Department of Agriculture (USDA).
- Zeller J., Geiger H., Rothlisberger G. (1980) « Starkniederschläge des schweizerischen Alpen und Alpenrandgebietes." *Eidg. Anstalt für forstliche Versuchswesen*, Birmensdorf.

Communications du Laboratoire de constructions hydrauliques
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Editeur: Prof. Dr A. Schleiss



ÉCOLE POLYTECHNIQUE
FÉDÉRALE DE LAUSANNE

Prof. Dr A. Schleiss
Laboratoire de constructions hydrauliques - LCH
EPFL, CH-1015 Lausanne
<http://lchwww.epfl.ch>
e-mail: secretariat.lch@epfl.ch