

Communication 32

Routing System II

Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques

Flow modelling in hydraulic systems

Modelización de flujos en sistemas hidráulicos

Javier García Hernández
Frédéric Jordan
Jérôme Dubois
Jean-Louis Boillat

- 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
- N° 10 2002 J. Dubois, M. Pirotton
Génération et transfert des crues extrêmes - Le logiciel Faitou
- N° 11 2002 A. Lavelli, G. De Cesare, J.-L. Boillat
Modélisation des courants de turbidité dans le bassin Nord du Lac de Lugano
- N° 12 2002 P. de Almeida Manso
Stability of linings by concrete elements for surface protection of overflow earthfill dams
- N° 13 2002 E. Bollaert
Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact
- N° 14 2003 D. S. Hersberger
Wall roughness effects on flow and scouring in curved channels with gravel bed
- N° 15 2003 Ch. Oehy
Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents
- N° 16 2004 J.-L. Boillat, P. de Souza
Hydraulic System - Modélisation des systèmes hydrauliques à écoulements transitoires en charge
- N° 17 2004 Cycle postgrade en aménagements hydrauliques
Collection des articles des travaux de diplôme postgrade
- N° 18 2004 S. Emami
Erosion protection downstream of diversion tunnels using concrete prisms - Design criteria based on a systematic physical model study
- N° 19 2004 Ph. Chèvre
Influence de la macro-rugosité d'un enrochement sur le charriage et l'érosion en courbe
- N° 20 2004 S. André
High velocity aerated flows on stepped chutes with macro-roughness elements

Communication 32

Routing System II **Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques**

Javier García Hernández
Frédéric Jordan
Jérôme Dubois
Jean-Louis Boillat

PREFACE

La modélisation hydrologique est indispensable à l'ingénieur en charge de la planification d'aménagements hydrauliques et de mesures de protection contre les crues. Toutefois, la maîtrise de bassins versants complexes requiert une technologie adéquate pour permettre la simulation des différents processus concernés. En mars 2000, le LCH-EPFL répondait à cette attente en organisant un atelier de formation pour le transfert du logiciel *Routing System* développé dans l'environnement LabVIEW.

Une nouvelle version enrichie de ce programme, baptisée *Routing System II*, est maintenant disponible en langage VB.net pour simuler la production et le transfert des débits sur un bassin versant. Il effectue les calculs de spatialisation des variables météorologiques, de formation des écoulements ainsi que du transfert dans les cours d'eau et au passage des aménagements hydrauliques.

Cette nouvelle version du programme a été développée dans le cadre du projet de recherche MINERVE, dans l'objectif de la prévision des crues sur un bassin versant aménagé. *Routing System II* est un modèle déterministe à base physique qui calcule la production et le transfert pluie-débit en intégrant l'influence des ouvrages hydrauliques. Il permet également une gestion des stocks de neige et de glace basée sur la température et les précipitations.

Dans la présente communication, J. García Hernández, F. Jordan, J. Dubois et J-L Boillat ont réuni les informations utiles à la compréhension et à l'utilisation du logiciel. Nous remercions l'Office fédéral de l'environnement ainsi que le Service des routes et des cours d'eau du Canton du Valais pour le soutien financier apporté à ce projet.

Prof. Dr Anton Schleiss

Table des matières

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 3 |
| CONCEPT GENERAL DE <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 5 |
| APERÇU DES POSSIBILITES DU PROGRAMME | 5 |
| <i>Interface utilisateur</i> | 5 |
| <i>Simulation des écoulements</i> | 5 |
| PLAN DU MANUEL | 6 |
| ASPECTS THEORIQUES | 7 |
| CONCEPT DE MODELISATION | 8 |
| FONCTIONS LIEES AUX OBJETS | 8 |
| <i>Production - Modèle de neige</i> | 8 |
| <i>Production - Modèle d'infiltration GR3</i> | 10 |
| <i>Production - Modèle glaciaire</i> | 12 |
| <i>Transfert - Modèle de ruissellement SWMM</i> | 14 |
| <i>Routage de débit dans un cours d'eau</i> | 15 |
| <i>Modèle GSM – Socont</i> | 21 |
| <i>Séparation des débits</i> | 23 |
| <i>Addition des débits</i> | 24 |
| <i>Stockage dans un réservoir</i> | 25 |
| <i>Déversoir</i> | 26 |
| <i>Turbine / Pompe</i> | 26 |
| <i>Capteur</i> | 27 |
| <i>Régulation / Etat</i> | 27 |
| <i>Station virtuelle</i> | 28 |
| RECOMMANDATIONS D'INSTALLATION | 29 |
| CONFIGURATIONS MATERIELLES ET LOGICIELLES REQUISES | 30 |
| PROCEDURE D'INSTALLATION ET DESINSTALLATION | 30 |
| UTILISATION DE <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 31 |
| BARRE DE MENUS | 32 |
| BARRE D'OUTILS | 33 |
| PALETTE D'OBJETS | 34 |
| <i>Objets</i> | 35 |
| BASE DE DONNEES | 40 |
| TRAVAILLER AVEC <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 42 |
| DEMARRAGE DU LOGICIEL | 43 |
| CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE | 44 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Création des objets</i> | 44 |
| <i>Liaison entre objets</i> | 44 |
| DEMARRAGE D'UNE SIMULATION NUMERIQUE | 44 |
| VISUALISATION DES RESULTATS | 45 |
| EXEMPLES D'APPLICATION | 47 |
| EXEMPLE 1 – TRANSFERT ET ROUTAGE | 48 |
| <i>Résolution de l'Exemple 1</i> | 50 |
| EXEMPLE 2 – PRODUCTION, TRANSFERT ET ROUTAGE | 53 |
| <i>Résolution de l'Exemple 2</i> | 55 |
| EXEMPLE 3 – CONSTRUCTION DE SOUS-MODELES | 58 |
| <i>Résolution de l'Exemple 3</i> | 61 |
| BIBLIOGRAPHIE | 69 |

Chapitre 1

Introduction

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 (Boillat et al., 2000). 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.

Le logiciel *Routing System II* a été développé par Jérôme Dubois au sein du Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Ce logiciel a été conçu pour simuler la formation et la propagation des écoulements dans des systèmes à surface libre. Il permet la modélisation hydrologique et hydraulique selon un schéma de type conceptuel semi-distribué et par une approche orientée objets. Il permet la prise en compte non seulement de processus hydrologiques particuliers tels la fonte de neige et glaciaire, les écoulements de surface et de sub-surface sur un bassin versant, mais aussi la modélisation d'ouvrages régulés tels que retenues, vannes, évacuateurs réglables, prises d'eau, turbines ou pompes, galeries et autres ouvrages hydrauliques. Il est écrit en langage VB.Net, compétent pour la programmation orientée objets.

Son principe général associe chaque objet à une fonction hydraulique, représentée par une icône qui peut être assemblée manuellement avec ses voisins selon une topologie définie par l'utilisateur.

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 II*, associé à son moteur numérique VB.Net, facilite cette analyse grâce à son interface utilisateur conviviale et à son architecture entièrement ouverte à de nouveaux développements.

Le logiciel *Routing System II* est destiné à remplacer la version initiale de *Routing System*, développée dans l'environnement LabVIEW (Dubois, Boillat, 2000)

Contenu

- Concept général de *Routing System II*
- Aperçu des possibilités du programme
- Plan du manuel

Concept général de *Routing System II*

Routing System II, écrit en Visual Basic .Net, est un logiciel qui utilise le concept de programmation orientée objets. Il a été développé pour réaliser la simulation de crues dans des systèmes complexes, constitués d'un ensemble de bassins versants, de prises d'eau, de réservoirs, de galeries et autres ouvrages hydrauliques. Tous les écoulements sont en nappe libre.

Les objets sont décrits par la fonction hydraulique qu'ils exercent au sein du système. Fondamentalement, la description du réseau peut être effectuée à l'aide de six fonctions de base : la génération, le transport dans les cours d'eau, le stockage, la dérivation, l'addition et la régulation des débits. Ces fonctions, représentées par des icônes, peuvent être assemblées librement sur une fenêtre. Le flux des données entre ces fonctions est réalisé en reliant les icônes entre elles à l'aide de la souris.

Cette approche permet la modélisation de systèmes avec une topologie complexe, ainsi que l'analyse à différentes échelles par agrégation de sous-systèmes.

Aperçu des possibilités du programme

Interface utilisateur

Utilisé comme un programme exécutable standard, *Routing System II* offre tout le confort d'une interface graphique moderne. Cette interface permet la création du modèle hydrologique ainsi que sa simulation numérique. Un effort particulier a été consenti à la visualisation graphique de toutes les données et des résultats à référence temporelle, fonctionnalité indispensable à la vérification du modèle de calcul et à l'analyse des résultats.

Comme éléments d'interface, *Routing System II* propose tous les standards comme la *Barre de Menu* et la *Barre d'outils*, ainsi qu'une *Palette d'objets*.

Simulation des écoulements

La simulation de l'ensemble des écoulements se produisant dans les modèles est effectuée par la résolution des différentes équations qui seront présentés pour chaque objet dans le prochain chapitre.

Plan du manuel

Le manuel utilisateur est l'élément principal de la documentation accompagnant le logiciel *Routing System II*. Il est organisé de la manière suivante :

- Le chapitre 1 offre un aperçu du concept et des fonctionnalités du logiciel *Routing System II*.
- Le chapitre 2 présente une revue générale des aspects théoriques.
- Les chapitres 3 et 4 contiennent les instructions concernant les configurations matérielles et logicielles requises et la procédure d'installation du logiciel, ainsi que les différents menus, options et objets existants dans *Routing System II*.
- Les chapitres 5 et 6 décrivent comment travailler avec *Routing System II* et présentent quelques exemples d'application.

Chapitre 2

Aspects théoriques

Sur des bassins versants ayant une complexité morphologique élevée, un grand nombre de processus hydrologiques peuvent se dérouler. En région de montagne, la présence de glaciers et de neige a une forte influence sur la réponse hydrologique du bassin versant. La fonte de neige et des glaciers doit donc être considérée, tout comme l'infiltration et le ruissellement de surface. De plus, les possibilités de stockage dans des réservoirs, les déversements, les turbinages et les pompages, le routage dans les cours d'eau, les prises d'eau et les bifurcations doivent être créés, puis reliés entre eux pour permettre le flux des informations dans le sens approprié.

Tous les ouvrages sont décrits par leur fonction hydraulique à l'aide des six objets de base (génération, transport, stockage, dérivation, addition et régulation).

Les modèles hydrologiques Neige, Glacier, GR3, SWMM et GSM-Socont ont été développés dans le cadre de différents projets de recherche, dont les projet CRUEX¹ (Bérod, 1994), SWURVE² (Schäfli & al., 2005) et MINERVE³ (Hamdi & al., 2005).

Contenu

- Concept de modélisation
- Fonctions liées aux objets

¹ Projet CRUEX : modélisation des crues extrêmes dans les bassins versants alpins.

² Projet SWURVE : étude de l'influence des changements climatiques sur les bassins versants alpins.

³ Projet MINERVE : modèle de prévision et de gestion des crues par opérations préventives des aménagements hydroélectriques à accumulation.

Concept de modélisation

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

Fonctions liées aux objets

Production - Modèle de neige

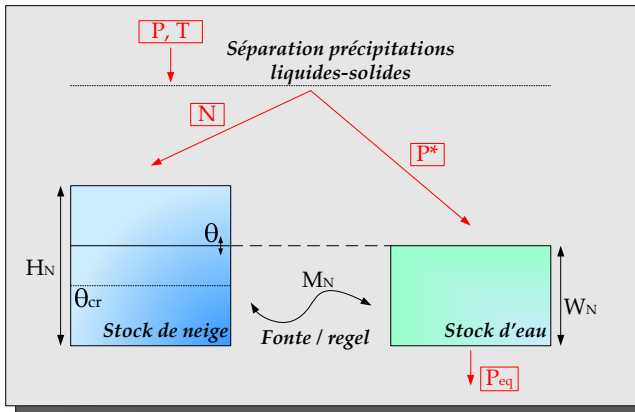


Figure 1 : Modèle de neige

Le modèle de neige (Figure 1) est composé de deux réservoirs qui simulent l'évolution temporelle du stock de neige (accumulation et fonte) en fonction de la température (T) et de la précipitation (P) et

produisent une précipitation équivalente (P_{eq}) qui peut être utilisée comme entrée par le modèle d'infiltration ou par le modèle glaciaire.

Tout d'abord, la précipitation est décomposée en précipitation solide (N) et liquide (P^*) en fonction de la température (équations 1 à 3) :

$$P^* = \alpha \cdot P \quad (1)$$

$$N = (1 - \alpha) \cdot P \quad (2)$$

avec P^* : précipitation liquide [m/s]; α : facteur de séparation; P : précipitation [m/s]; N : précipitation solide [m/s].

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 & \text{si } T < T_{cp1} \\ \alpha &= (T - T_{cp1}) / (T_{cp2} - T_{cp1}) & \text{si } T_{cp1} < T < T_{cp2} \\ \alpha &= 1 & \text{si } T > T_{cp2} \end{aligned} \quad (3)$$

avec T : température [°C]; T_{cp1} : température critique minimale pour la précipitation liquide [°C]; T_{cp2} : température critique maximale pour la précipitation solide [°C].

Quand la température observée est inférieure à T_{cp1} il y a seulement une précipitation solide, quand elle est supérieure à T_{cp2} il n'y a que la précipitation liquide. Quand la température observée se trouve entre les deux valeurs critiques, la précipitation liquide ainsi que la précipitation solide sont produites. La précipitation solide (N) est utilisée comme input pour le stock de neige, en variant son contenu en fonction de la fonte ou la congélation. La fonte de neige est calculée comme suit :

$$\begin{aligned} M_N &= A_n \cdot (1 + b_p \cdot P^*) \cdot (T - T_{cr}) & \text{si } T > T_{cr} \\ M_N &= A_n \cdot (T - T_{cr}) & \text{si } T \leq T_{cr} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dH_N / dt &= N - M_N \\ M_N &\leq N + H_N / dt \\ M_N &\geq -W_N / dt \end{aligned} \quad (5)$$

avec M_N : fonte ou congélation de la neige [m/s]; A_n : coefficient degré-jour [m/s/°C]; b_p : coefficient de fonte lors de précipitation [s/m]; T_{cr} : température critique de fonte de neige [°C]; H_N : hauteur de neige [m]; W_N : hauteur d'eau [m]; dt : pas de temps [s].

La résolution de l'équation différentielle 5 selon Euler (premier ordre) est faite selon le schéma suivant:

$$H_N^{n+1} = H_N^n + (N^n - M_N^n) \cdot \Delta t \quad (6)$$

avec les exposants n et $n+1$ représentant l'instant de temps; Δt : pas de temps [s].

La précipitation équivalente (P_{eq}) est produite par le contenu en eau de la neige (équations 7 à 9) :

$$\theta = W_N / H_N \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{eq} &= P^* + W_N / dt && \text{si } H_N = 0 \\ P_{eq} &= 0 && \text{si } H_N > 0 \text{ et } \theta \leq \theta_{cr} \\ P_{eq} &= (\theta - \theta_{cr}) \cdot H_N / dt && \text{si } H_N > 0 \text{ et } \theta > \theta_{cr} \end{aligned} \quad (8)$$

$$dW_N / dt = P^* + M_N - P_{eq} \quad (9)$$

avec θ : contenu relatif d'eau dans le stock de neige; θ_{cr} : contenu minimum d'eau dans le stock de neige, à partir duquel la précipitation est produite.

L'équation différentielle 9 est résolue de la même façon que précédemment:

$$W_N^{n+1} = W_N^n + (P^* + M_N^n - P_{eq}^n) \cdot \Delta t \quad (10)$$

Les variables d'état initiales associées à ce modèle sont θ et H_N . Le paramètre à caler est A_n . Les autres paramètres ($b_p = 0.0125$, $\theta_{cr} = 0.1$, $T_{cp1} = 0$ °C, $T_{cp2} = 6$ °C, $T_{cr} = 0$ °C) sont admis constants.

Les entrées du modèle sont donc la précipitation et la température, et les sorties la précipitation équivalente.

Production - Modèle d'infiltration GR3

Une intensité brute (ou précipitation équivalente P_{eq} provenant du modèle de neige) est introduite dans le modèle GR3 (Michel, Edijatno, 1988; Consuegra et al., 1998), qui prend aussi en compte l'évapotranspiration potentielle (ETP), selon la Figure 2 :

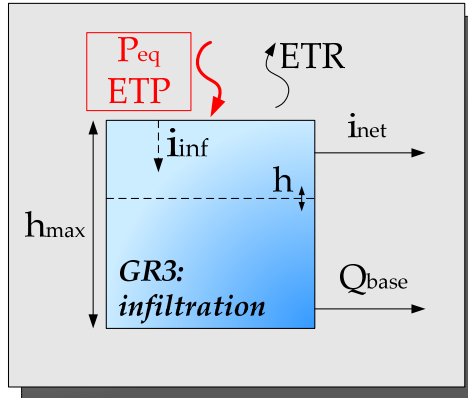


Figure 2 : Modèle d'infiltration

Le réservoir d'infiltration est calculé comme suit :

$$\begin{aligned} i_{\text{inf}} &= P_{eq} \cdot (1 - (h/h_{\text{max}})^2) & \text{si } h \leq h_{\text{max}} \\ i_{\text{inf}} &= 0 & \text{si } h > h_{\text{max}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} ETR &= ETP \cdot \sqrt{h/h_{\text{max}}} & \text{si } h \leq h_{\text{max}} \\ ETR &= ETP & \text{si } h > h_{\text{max}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$i_{\text{net}} = P_{eq} - i_{\text{inf}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{base}} &= k \cdot h \cdot S & \text{si } h \leq h_{\text{max}} \\ Q_{\text{base}} &= k \cdot h_{\text{max}} \cdot S & \text{si } h > h_{\text{max}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$dh/dt = i_{\text{inf}} - ETR - Q_{\text{base}}/S \quad (15)$$

avec ETP: évapotranspiration potentielle [m/s]; i_{inf} : intensité d'infiltration [m/s]; h : hauteur d'eau du réservoir-sol [m]; h_{max} : capacité d'infiltration du réservoir-sol [m]; ETR : évapotranspiration réelle [m/s]; Q_{base} : débit de base [m^3/s]; k : coefficient de vidange du réservoir-sol [1/s]; S : surface [m^2]; i_{net} : intensité de pluie nette [m/s].

La résolution de l'équation différentielle 15 est faite de nouveau selon Euler premier ordre avec l'équation suivante:

$$h^{n+1} = h^n + (i_{\text{inf}}^n - ETR^n - Q_{\text{base}}^n / S) \cdot \Delta t \quad (16)$$

La variable d'état initiale associée à ce modèle est h . Les paramètres à caler sont k et h_{max} . Le paramètre S est supposé constant.

Les entrées du modèle sont la précipitation équivalente (ou intensité brute) et l'ETP. L'intensité nette, le débit de base et l'évapotranspiration réelle sont fournis en sortie.

Production - Modèle glaciaire

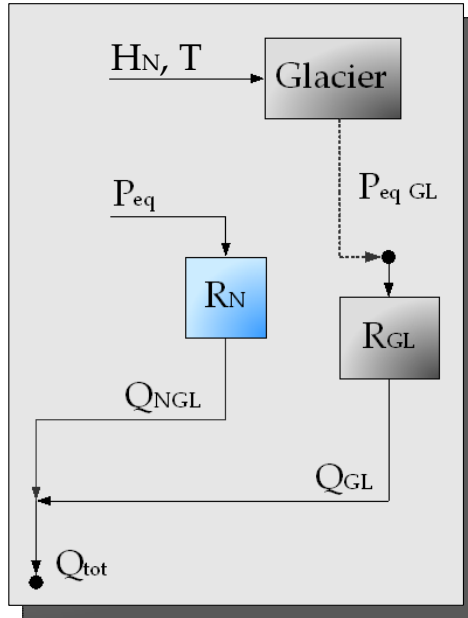


Figure 3 : Modèle de fonte et écoulement glaciaire

La fonte glaciaire (Figure 3) dépend de la température et de la présence de neige sur le glacier. Le débit total du glacier dépend également des processus de transfert dans les réservoirs linéaires de neige R_N et de glace R_{GL} .

Une pluie brute (ou précipitation équivalente P_{eq} du modèle de neige) est transférée au réservoir linéaire de fonte de neige (R_N) qui fonctionne selon l'équation 17 :

$$dH_{NGL} / dt = P_{eq} - K_N \cdot H_{NGL} \quad (17)$$

avec H_{NGL} : niveau du réservoir linéaire de neige [m]; K_N : coefficient de vidange du réservoir linéaire de neige [1/s].

La sortie de débit du réservoir linéaire de neige est Q_{NGL} :

$$Q_{NGL} = K_N \cdot H_{NGL} \cdot S_{GL} \quad (18)$$

avec Q_{NGL} : débit sortant du réservoir linéaire de neige [m^3/s]; S_{GL} : surface du glacier [m^2].

Le modèle de fonte glaciaire produit un débit de fonte seulement quand la hauteur de neige simulée est nulle ($H_N=0$). Dès cet instant, le débit produit par la fonte du glacier (P_{eqGL}) est transféré au réservoir linéaire glaciaire (R_{GL}) et le débit résultant (Q_{GL}) à la sortie du sous-bassin.

La fonte du glacier Q_{GL} est définie par les équations 19 à 21.

$$\begin{aligned} P_{eqGL} &= 0 & \text{si } T \leq T_{cr} \text{ ou } H_N > 0 \\ P_{eqGL} &= A_{GL} \cdot (T - T_{cr}) & \text{si } T > T_{cr} \text{ et } H_N = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$dH_{GL} / dt = P_{eqGL} - K_{GL} \cdot H_{GL} \quad (20)$$

$$Q_{GL} = K_{GL} \cdot H_{GL} \cdot S_{GL} \quad (21)$$

avec P_{eqGL} : fonte du glacier [m/s]; A_{GL} : coefficient de fonte glaciaire degré-jour [$m/s/°C$]; H_{GL} : niveau du réservoir glaciaire linéaire [m]; K_{GL} : coefficient de vidange du réservoir linéaire de glace [$1/s$]; Q_{GL} : débit sortant du réservoir glaciaire [m^3/s].

Les variables d'état associées à ce modèle sont H_N , θ , H_{RN} , et H_{RGL} . Les paramètres à caler sont A_{GL} , K_{GL} et K_N . Le paramètre S_{GL} est supposé constant.

Les entrées sont la hauteur de neige, la température et la précipitation brute (ou équivalente provenant du modèle de neige), et les sorties le débit total sortant du modèle.

Transfert - Modèle de ruissellement SWMM

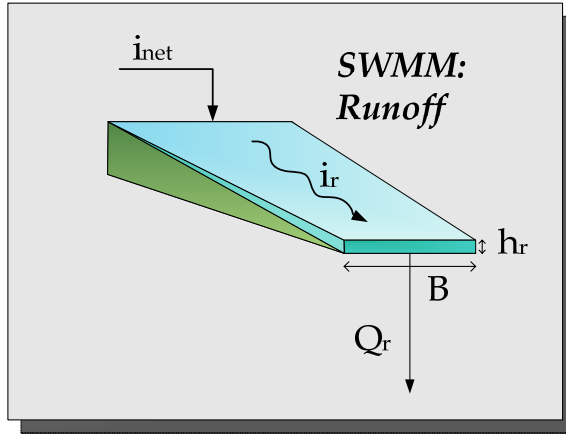


Figure 4 : Modèle de ruissellement

Le transfert de l'intensité nette sur une surface imperméable est réalisé à l'aide d'un réservoir de transfert non-linéaire (Figure 4) selon les équations 22 à 24 :

$$\begin{aligned} dh_r / dt &= 2 \cdot (i_{net} - i_r) \\ h_r &> 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$i_r = K_s \cdot \sqrt{J_o} \cdot h_r^{5/3} \cdot B / S \quad (23)$$

$$Q_r = i_r \cdot S \quad (24)$$

avec h_r : hauteur d'eau à l'aval de la surface [m]; i_r : intensité d'écoulement à l'exutoire de la surface [m/s]; K_s : coefficient de Strickler [$m^{1/3}/s$]; J_o : pente moyenne du plan; B : largeur du plan [m].

Comme dans le cas du modèle d'infiltration GR3, il s'agit à nouveau de résoudre une équation différentielle ordinaire avec la méthode d'Euler de premier ordre.

La variable d'état initiale associée à ce modèle est h_r . Le paramètre à caler est K_s . Les autres paramètres (J_o , B , S) sont supposés constants.

Alimenté en amont par un hyétogramme de pluie nette, le modèle SWMM (Metacalf, Eddy, 1971) fournit un hydrogramme de crue à l'aval du bassin versant.

Routage de débit dans un cours d'eau

3 schémas de résolution du transfert de débit dans les cours d'eau sont présentés.

Routage selon St. Venant

Ce schéma résout les équations complètes d'un modèle 1D non-stationnaire. Les équations complètes de St-Venant qui décrivent le modèle sont :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + g \cdot I_1 \right) = g \cdot A (J_0 - J_f) + g \cdot I_2 \quad (26)$$

avec A : surface mouillée du profil en travers [m^2]; Q : débit [m^3/s]; J_0 : pente de fond; J_f : pente de frottement; I_1 : coefficient de profil [m^3]; I_2 : coefficient de la variation de la section [m^2].

L'équation 25 exprime la conservation de masse tandis que l'équation 26 assure la conservation de la quantité de mouvement. Le terme I_1 tient compte de la forme du profil en travers et se calcule par :

$$I_1 = \int_0^h (h - \eta) \cdot b(\eta) d\eta \quad (27)$$

Le terme b désigne la largeur de la section à la cote η , qui est une variable d'intégration, comme représenté sur la Figure 5.

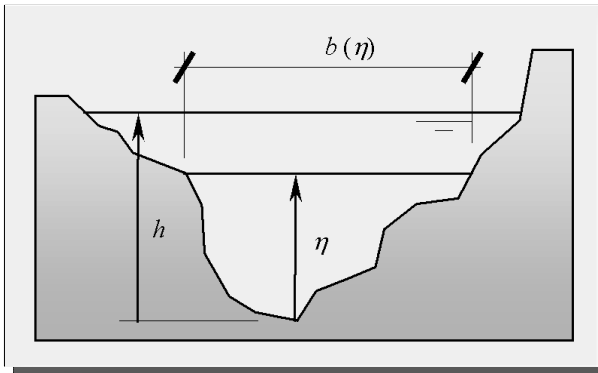


Figure 5 : Description schématique des paramètres utilisés dans le calcul d' I_1

Cette fonction de *Routing System II* est actuellement capable de résoudre les équations de St. Venant pour la géométrie de profil en travers représentée sur la *Figure 6*.

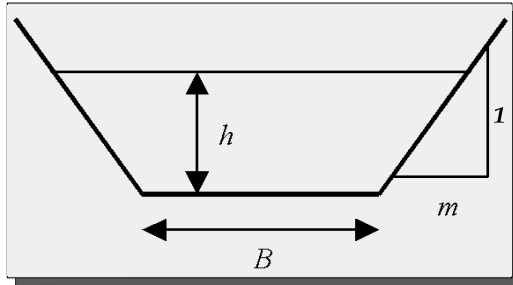


Figure 6 : Profil en travers disponible dans *Routing System II* pour le calcul de routage

Pour cette section trapézoïdale, l'équation pour définir I_1 devient:

$$I_1 = \frac{B \cdot h^2}{2} + \frac{m \cdot h^3}{3} \quad (28)$$

avec B: largeur de base du profil [m]; h: hauteur d'eau [m]; m: fruit des talus latéraux selon la relation 1 vertical pour m horizontal.

La pente de frottement J_f se calcule selon Manning-Strickler :

$$J_f = \frac{Q \cdot |Q|}{A^2 \cdot K^2 \cdot R_h^{3/2}} \quad (29)$$

$$R_h = \frac{A}{L_p} \quad (30)$$

avec K: coefficient de Strickler; R_h : rayon hydraulique [m]; A: surface mouillée [m²]; L_p : périmètre mouillé [m].

Le terme I_2 tient compte de la variation de la section le long du cours d'eau. Il est nul dans le cas d'un canal prismatique. D'une manière générale, il s'écrit :

$$I_2 = \int_0^h (h - \eta) \frac{\partial b}{\partial x} \Big|_{h=\eta} \quad (31)$$

Les équations 25 et 26 sont résolues par la méthode d'Euler de premier ordre, pour un canal prismatique, selon :

$$A_{j+1}^{n+1} = A_{j+1}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) \quad (32)$$

$$\begin{aligned} Q_{j+1}^{n+1} = & Q_{j+1}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{(Q_{j+1}^n)^2}{A_{j+1}^n} - \frac{(Q_j^n)^2}{A_j^n} + g \cdot I_{1,j+1}^n - g \cdot I_{1,j}^n \right) + \\ & + \Delta t \cdot g \cdot \frac{(A_j^n + A_{j+1}^n)}{2} \cdot J_0 - \Delta t \cdot g \cdot A_{j+1}^n \cdot J_{f,j+1}^n \end{aligned} \quad (33)$$

avec les indices j et $j+1$ représentant la position dans l'espace ; les exposants n et $n+1$ représentant le temps ; g : 9.81 [m²/s] ; Δx : incrément de longueur [m].

Dans le logiciel *Routing System II*, la condition limite aval imposée par le programme est la hauteur normale.

En pratique, 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. Les solutions applicables sont celles de l'onde diffusante et de l'onde cinématique présentées ci-après.

Routage selon Muskingum-Cunge

En négligeant les deux premiers termes de l'équation 26, celle-ci devient :

$$\frac{\partial I_1}{\partial x} = A \cdot (J_0 - J_f) + I_2 \quad (34)$$

et correspond à l'approximation de l'onde diffusante. Avec l'hypothèse supplémentaire d'un canal prismatique (Cunge, 1991), il est possible d'écrire l'équation 26 sous la forme :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{Q}{BD} \frac{dD}{dh} \right) \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{D^2}{2B|Q|} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (35)$$

avec B : largeur du profil à la base [m] ; D : débitance [m³/s].

La débitance caractérise la propriété d'une section à transporter un écoulement, indépendamment des autres caractéristiques du cours d'eau. Elle est définie par :

$$Q = DJ_0^{1/2} \quad (36)$$

L'équation 35 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 (équation 37) et diffusé avec un coefficient de diffusion δ (équation 38):

$$c = \frac{Q}{BD} \frac{dD}{dh} \quad (37)$$

$$\delta = \frac{D^2}{2B \cdot |Q|} \quad (38)$$

En faisant encore l'hypothèse d'une relation univoque entre le débit Q et la hauteur d'eau h , l'équation 35 se réduit à :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

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 37. Elle peut être résolue par le schéma numérique en différences finies suivant :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1+X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{\Delta t} \quad (40)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{\frac{1}{2}(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1}{2}(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} \quad (41)$$

Appliqué à l'équation 39, ce schéma permet d'écrire :

$$\begin{aligned} & \frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1+X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{c\Delta t} + \\ & + \frac{\frac{1}{2}(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1}{2}(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

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

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^{n+1} + C_2 Q_j^n + C_3 Q_{j+1}^n \quad (43)$$

où:

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

$$C_2 = \frac{KX + \frac{\Delta t}{2}}{K(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \quad (44)$$

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

$$K = \frac{\Delta X}{c} \quad (45)$$

$$c = \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{A_{j+1}^n - A_j^n} \quad (46)$$

L'hydraulicien reconnaît ici la formule de Muskingum (Boillat 2000), 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 l'équation 42 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:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} - cB \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (47)$$

$$B = \Delta x \left(\frac{1}{2} - X \right) \quad (48)$$

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 (35) à condition de poser correctement la valeur des paramètres K et X . K est défini par l'équation 45 et X doit s'écrire, avec la définition de la célérité c et de l'équation 48 par :

$$X = \frac{1}{2} - \frac{D^3}{2\Delta x |Q| Q} \frac{dD}{dh} \quad (49)$$

Cette fonction de l'onde diffusante de *Routing System II* est actuellement capable de résoudre l'équation de Muskingum-Cunge pour la géométrie de profil en travers prismatique, tel que présentée à la *Figure 6*.

Routage par onde cinématique

Le modèle de l'onde cinématique 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 :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (50)$$

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 :

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} \quad (51)$$

Ce modèle 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 et cette fonction considère aussi la même géométrie pour les profils en travers que celle décrite à la méthode de Muskingum-Cunge. Contrairement au modèle de l'onde diffusante, aucune réduction du débit de pointe n'est produite. La résolution est faite selon les équations :

$$c = \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{A_{j+1}^n - A_j^n} \quad (52)$$

$$\alpha = c \cdot \frac{\Delta t}{\Delta L} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} Q_{j+1}^{n+1} &= \alpha \cdot Q_j^n + (1 - \alpha) \cdot Q_{j+1}^n & \text{si } \alpha \leq 1 \\ Q_{j+1}^{n+1} &= \frac{1}{\alpha} \cdot Q_j^n + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot Q_j^{n+1} & \text{si } \alpha > 1 \end{aligned} \quad (54)$$

Modèle GSM – Socont

Le modèle GSM-SOCONT (Glacier Snow Melt – Soil CONTRibution model, Schäfli & al, 2003 et 2005) est la combinaison de plusieurs modèles hydrologiques. Selon ce concept, un bassin versant alpin peut être séparé en une partie glaciaire et une partie non glaciaire.

La partie glaciaire est composée d'un modèle de neige à l'amont d'un modèle de glace. La partie non glaciaire est composée d'un modèle de neige à l'amont d'un modèle SOCONT, lui-même combinaison des modèles GR3 et SWMM. Le débit à l'exutoire du bassin versant est la somme de ces deux sous-bassins.

Partie non glaciaire

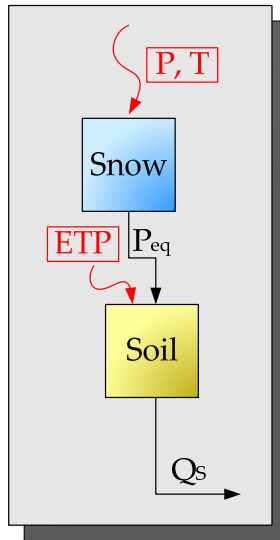


Figure 7 : Schéma du modèle non glaciaire

A la partie non glaciaire (Figure 7), le modèle de neige simule l'évolution temporelle du réservoir de neige (accumulation et fonte) en fonction de la température (T) et de la précipitation (P) en produisant une précipitation équivalente (P_{eq}) qui est utilisée comme entrée par le modèle SOCONT. Ce modèle prend aussi en compte l'évapotranspiration potentielle (ETP). Le débit Q_s sortant est transféré à la sortie du sous-bassin.

Partie glaciaire

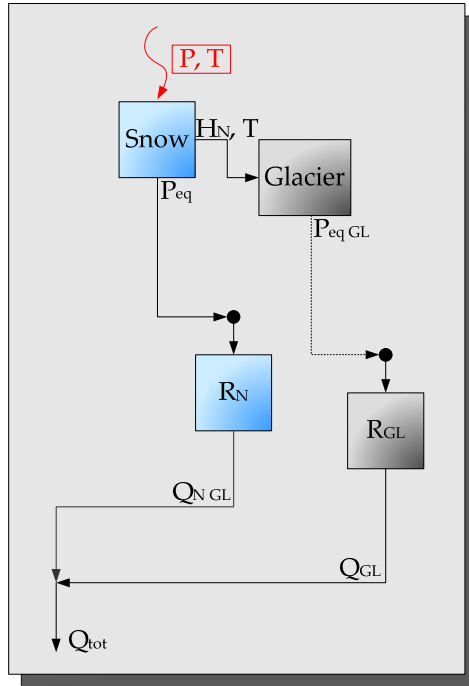


Figure 8 : Schéma du modèle glaciaire

La partie glaciaire (*Figure 8*) est composée d'un modèle de quatre réservoirs (un correspondant au modèle de neige et les trois autres au modèle glaciaire).

Le modèle de neige crée une précipitation équivalente (P_{eq}), laquelle est transférée au modèle glaciaire, ainsi que la hauteur de neige (H_N) et la température (T).

Au modèle glaciaire la précipitation équivalente (P_{eq}) se transmet au réservoir linéaire de neige (R_N) et finalement à la sortie du sous-bassin (Q_{NGL}). Le sous-modèle de fonte glaciaire crée un débit que lorsque la hauteur de neige simulée est nulle ($H_N=0$). Ce débit glaciaire (P_{eqGL}) est alors transféré au réservoir linéaire glaciaire (R_{GL}) et le débit résultant (Q_{GL}) à la sortie du sous-bassin.

Le débit final produit par le sous-bassin (Q_{tot}) est l'addition des deux contributions.

Séparation des débits

La fonction « *Dérivation* » de *Routing System II* est certainement celle qui illustre le mieux le potentiel de la modélisation fonctionnelle. 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.

Tous les ouvrages hydrauliques de prises d'eau bien que fort différents 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 9*. D'une manière générale, cette relation qui décrit le comportement de la prise d'eau n'est pas produite par *Routing System II*. L'utilisateur doit effectuer un calcul du comportement de la prise d'eau et créer ensuite la relation « *Débit entrant-Débit dérivé* ».

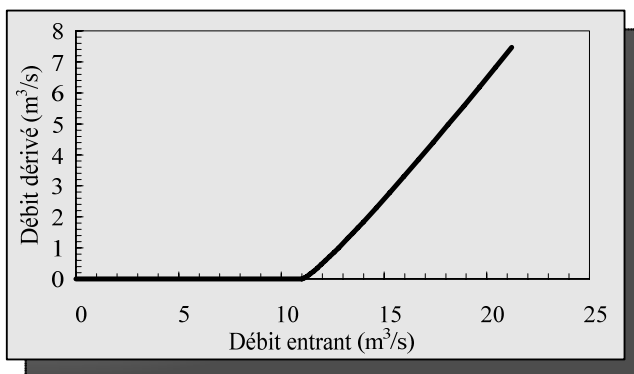


Figure 9 : Exemple de relation Débit entrant-Débit dérivé, calculée pour un déversoir latéral

Avec cette information, la fonction « *Dérivation* » de *Routing System II* est à même de calculer l'hydrogramme dérivé et l'hydrogramme qui continue « tout droit », comme le montre la *Figure 10*, selon l'équation 55 :

$$Q_{total}^n = Q_{dérivé}^n + Q_{non-dérivé}^n \quad (55)$$

avec Q_{total}^n : débit total à l'instant n [m^3/s]; $Q_{dérivé}^n$: débit dérivé à l'instant n [m^3/s]; $Q_{non-dérivé}^n$: débit non-dérivé à l'instant n [m^3/s].

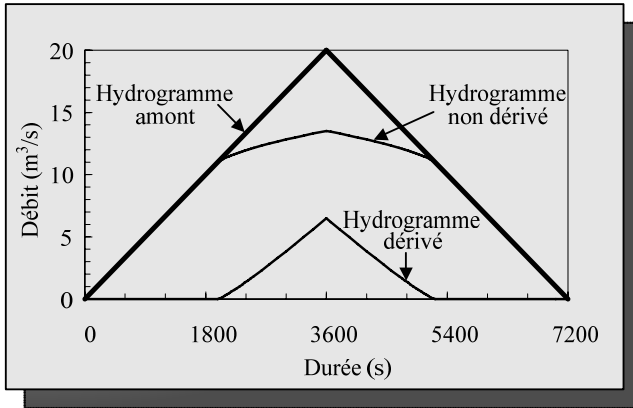


Figure 10 : Exemple de calcul d'une bifurcation

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.

Addition des débits

La fonction « Jonction » de *Routing System II* permet de calculer, d'une manière générale, l'addition de plusieurs fonctions. Elle permet en particulier d'additionner divers hydrogrammes à une confluence selon l'équation 56 :

$$Q_1^n + Q_2^n + \dots + Q_m^n = Q_{total}^n \quad (56)$$

avec Q_i^n : débits individuels à l'instant n [m^3/s]; Q_{total}^n : Débit total à l'instant n [m^3/s].

D'apparence très simple pour ne pas dire triviale, cette opération est cependant relativement complexe car les fonctions circulant dans un modèle *Routing System II* ne sont ni définies à pas de temps constant, ni synchronisées. Par conséquent, cette fonction effectue plusieurs interpolations pour obtenir le résultat correct (*Figure 11*).

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.

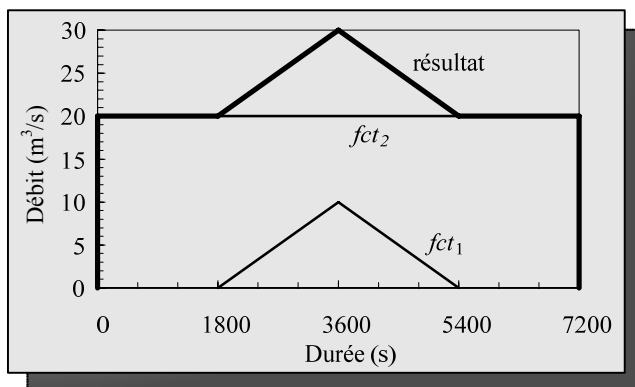


Figure 11 : Exemple d'addition d'un hydrogramme rectangulaire et d'un hydrogramme triangulaire dont les points ne sont pas synchronisés

Stockage dans un réservoir

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

$$\frac{d\nabla}{dt} = Q_e - Q_s \quad (57)$$

avec ∇ : volume dans le réservoir [m³]; Q_e : débit entrant dans la retenue [m³/s]; Q_s : débit sortant [m³/s].

La majorité des retenues sont équipées d'évacuateurs de crue 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 57, il est indispensable de pouvoir exprimer ce débit sortant en fonction du volume d'eau ∇ dans la retenue. Cette opération est possible si la relation entre le niveau d'eau et le volume est connue. Dès lors, l'équation 57 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 d'Euler de premier ordre.

$$\nabla^{n+1} = \nabla^n + Q_e^n - Q_s^n \quad (58)$$

Les données à fournir à cette fonction sont au nombre de quatre : l'« Hydrogramme entrant », la relation « Niveau-Volume », la relation « Niveau-Débit sortant » et le « Niveau initial ». 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.

Ce calcul de rétention est facilement résolu par les méthodes classiques de l'analyse numérique (Figure 12). 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.

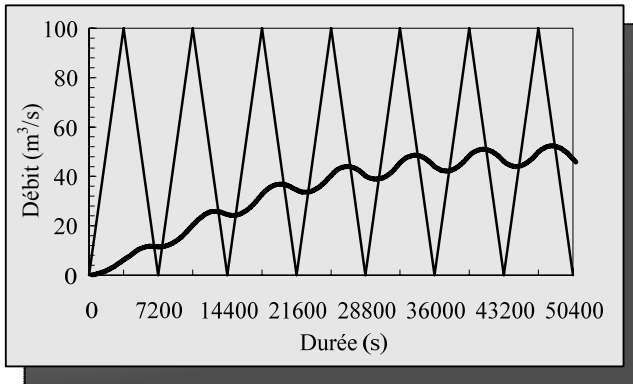


Figure 12 : Exemple d'un calcul de rétention. L'hydrogramme entrant est une succession de crues triangulaires. L'hydrogramme sortant est celui représenté en trait épais. Ce calcul a été effectué pour un bassin rectangulaire de 500'000 m² initialement plein, équipé d'un déversoir standard de 10 m de largeur.

Déversoir

Les déversements aux ouvrages d'évacuation sont calculés à l'aide d'une relation « Niveau - Débit déversé ». Le débit déversé sera donc :

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{déversé}}^n &= 0 && \text{si } H^n < H_1 \\
 Q_{\text{déversé}}^n &= Q_{\text{dev},i} + (H_{i+1} - H^n) \frac{Q_{\text{dev},i+1} - Q_{\text{dev},i}}{H_{i+1} - H_i} && \text{si } H_i < H^n < H_{i+1}
 \end{aligned} \quad (59)$$

avec $Q_{\text{déversé}}^n$: débit déversé à l'instant n [m³/s]; H^n : hauteur d'eau à l'instant n [m];
 $Q_{\text{dev},i}$: débit déversé à la hauteur H_i [m³/s]; H_i : hauteur d'eau dans le réservoir [m].

Turbine / Pompe

Toujours lié à une série temporelle, cet objet fournit ou extrait un débit déterminé à chaque instant du réservoir associé :

$$Q_{\text{turbine/pompé}}^n = Q_{\text{source}}^n \quad (60)$$

avec $Q_{\text{turbine/pompé}}^n$: débit turbiné ou pompé à l'instant n [m^3/s] ; Q_{source}^n : débit fourni par turbinage ou pompage à l'instant n sous forme de série temporelle [m^3/s].

Capteur

Cet objet peut être lié à n'importe quel autre. Grâce à lui, des alarmes peuvent être activées quand certaines valeurs de sortie de l'objet associé sont dépassées. Ces alarmes sont déclenchées au moyen de seuils, qui sont introduits par l'utilisateur dans l'objet « *Capteur* » :

$$\begin{aligned} V_{\text{Alarme}}^n &= 0 & \text{si } V^n < V_{\text{seuil},i} \\ V_{\text{Alarme}}^n &= 1 & \text{si } V^n \geq V_{\text{seuil},i} \end{aligned} \quad (61)$$

avec V_{Alarme}^n : valeur de l'alarme à l'instant n ; V^n : valeur d'étude à l'instant n ; $V_{\text{seuil},i}$: valeur du seuil i .

Régulation / Etat

Avec cette option un sous-modèle est automatiquement créé. Dans cet objet, plusieurs « *Etats* » peuvent être créés, puis le choix de l'état actif est fait en fonction de valeurs dépendant des capteurs associés.

Un exemple typique de régulation est l'emploi d'une loi de turbinage / pompage en fonction du niveau d'un réservoir.

Dans chaque « *Etat* » plusieurs objets peuvent être créés en fonction des besoins (turbinage, dérivation, etc) de manière à prendre une ou plusieurs données d'entrée et une ou plusieurs données de sortie.

Par exemple, un turbinage (associé à un objet « *Time serie* » ou « *Source* ») est placé dans chaque « *Etat* » pour fournir un débit de sortie.

Un « *Etat* » initial doit être défini pour assurer le fonctionnement du modèle. Ensuite, les transitions entre les différents « *Etats* » sont activées en fonction des alarmes produites aux capteurs selon les lois définies par l'utilisateur :

$$\begin{aligned} E^n &= E_1 & \text{si } n = 0 \\ E^n &= E_i & \text{si } n > 0 \end{aligned} \quad (62)$$

avec E^n : Etat défini à l'instant n ; E_i : Etat i défini en fonction des valeurs aux capteurs.

Station virtuelle

L'objet hydraulique « *Station* » permet la spatialisation des variables météorologiques (pluie, température, ETP) à partir des valeurs disponibles dans la base de données du « *Data Environment* ». Elle se base sur un référencement spatial en coordonnées métriques.

La méthode choisie pour la spatialisation des précipitations et températures est la méthode de Shepard. L'évaluation d'une variable X_s à partir de n stations situés dans les lieux $i=1,2,\dots,n$ peut être obtenue par pondération selon l'inverse du carré de la distance euclidienne $d_{i,s}$ entre la station i de la BD et le point de calcul s (station virtuelle), typiquement le centre de gravité d'un bassin versant :

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (63)$$

$$X_s = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (64)$$

avec x_i, y_i : position de la station i de la BD [m]; x_s, y_s : position de la station virtuelle s [m]; X_s : valeur de la variable d'étude à la station virtuelle s [U.I.]; X_i : valeur de la variable d'étude à la station utilisée i de la BD [U.I.]; $d_{i,s}$: distance entre la station utilisée i de la BD et la station virtuelle s [m].

Cette méthode a été étendue pour tenir compte de l'évolution de certaines variables météorologiques en fonction de l'altitude. Ainsi, les variables X_i situées à l'altitude z_i peuvent être remplacées par leurs équivalents X_i^* au niveau de la mer $z_0 = 0$ m s.m. selon une relation linéaire avec gradient altimétrique constant dX_s/dz associé au point de calcul s :

$$X_i^* = X_i - \frac{dX_s}{dz} \cdot (z_i - z_0) \quad (65)$$

Le résultat de la méthode de Shepard au niveau de la mer fournit l'équivalent X_s^* de la variable X_s qui doit être remonté à l'altitude z_s du point de calcul en fonction du gradient altimétrique :

$$X_s = X_s^* + \frac{dX_s}{dz} \cdot (z_s - z_0) \quad (66)$$

Les n stations pour effectuer l'interpolation spatiale en s sont déterminées par choix automatiquement respectant l'équation 67. Le nombre n de stations est donc variable pour chaque couple (s, r_s) :

$$d_{i,s} \leq r_s \quad (67)$$

Chapitre 3

Recommandations d'installation

L'installation du logiciel *Routing System II* s'effectue facilement avec le CD d'installation, pour autant que l'environnement Microsoft .Net Framework (gratuit) soit installé.

Ce chapitre présente les configurations matérielles et logicielles requises pour utiliser le logiciel, ainsi que les procédures d'installation et de désinstallation.

Contenu

- Configurations matérielles et logiciels requises
- Procédure d'installation et désinstallation

Configurations matérielles et logicielles requises

Avant de procéder à l'installation du logiciel *Routing System II*, il faut s'assurer que votre ordinateur possède au moins le matériel et les logiciels requis. Pour obtenir le meilleur de ce programme, les valeurs recommandées sont indiquées entre parenthèses. Cette version *Routing System II* fonctionne sur un PC qui possède les caractéristiques suivantes :

- N'importe quel ordinateur compatible IBM équipé d'un processeur Pentium 1.0 ou supérieur (Pentium 2.4 ou supérieur recommandé).
- Un disque dur ayant au moins 20 megabytes d'espace libre (100 megabytes ou plus recommandés).
- Un lecteur de CD ROM.
- Un minimum de 256 megabytes de RAM (512 ou plus recommandés).
- Une souris.
- Un écran couleur VGA (résolution de 1024x768 avec 65'536 couleurs recommandée).
- Microsoft Windows 98, Windows NT4, 2000, XP ou supérieur.
- Microsoft .Net Framework Service Pack 1.1 ou supérieur.

Procédure d'installation et désinstallation

Il s'agit d'un fichier exécutable appelé « *Routing System II* » qui peut être lancé à partir d'un CD ou du disque dur. Il n'exige aucun emplacement particulier et peut être déplacé à volonté.

Le retrait de *Routing System II* d'un ordinateur s'effectue simplement en effaçant le fichier « *Routing System II* ».

Chapitre 4

Utilisation de *Routing System II*

Sur la base du concept décrit dans les chapitres précédents, il est possible de créer des modèles semi-distribués, en choisissant de manière cohérente en premier lieu les objets du modèle et, en deuxième lieu, tous les paramètres et les variables d'état nécessaires. La programmation orientée objet permet de connecter les différents objets hydrauliques et hydrologiques automatiquement. Les prises d'eau sont implantées à l'aval de leurs sous-bassins et connectées aux cours d'eau. Réservoirs, aménagements, déversoirs, turbines et autres objets sont aussi implantés facilement.

Contenu

- Barre de menus
- Barre d'outils
- Palette d'objets

Barre de menus

La « *Barre de menus* » est une lisière contenant des mots sur lesquels il faut cliquer pour accéder aux commandes ou fonctions déterminées. Il est également possible de taper sur Alt + la lettre du début de chaque mot.

- ***File***

-*New* : Efface le modèle en cours de la mémoire vive pour ouvrir un nouveau modèle vierge.

-*Open...* : Ouverture d'un modèle existant.

-*Save As...* : Sauvegarde d'un modèle sous un nom à définir. Le logiciel crée un fichier à l'extension /.sim/.

-*Save* : Sauvegarde des modifications apportées à un modèle qui a déjà été enregistré une fois.

-*Data Environment...* : Ouverture de la boîte de dialogue pour le chargement d'une base de données.

-*Close* : Fermeture du modèle en cours sans sauvegarde.

-*Exit* : Fermeture du logiciel.

- ***Edit***

Ce menu n'a pas encore été exploité.

- ***Model***

-*Edit as Objet* : Ouverture de la boîte de dialogue pour la modification des valeurs de l'objet ou du modèle actuellement chargé sur l'interface graphique (description, logo, paramètres,...).

-*Save Sub Model as...* : Sauvegarde du sous-modèle actuellement chargé sur l'interface graphique comme sous-modèle.

- ***Solver***

-*Solve* : Démarrage de la simulation.

-*Edit Solver* : Modification de la date de début du calcul (« *Data Start* »), la date de fin (« *Data End* »), le pas de temps du calcul (« *Constant Time Step* ») et le pas de temps d'archivage des données (« *dt Save* »).

Barre d'outils

Les fonctionnalités des outils sont les mêmes que celles du « *File* » du *Menu*, auxquelles sont ajoutées les aides à la construction d'un modèle :



Raccourci de *File* → *New*.



Raccourci de *File* → *Open*.



Raccourci de *File* → *Save*.



Outil de sélection d'un objet.



Outil de connexion d'objets.



Outil de connexion entre « *Etats* » qui définit les transitions entre « *Etats* » lors de la programmation d'une « *Régulation* ».



Visualisation de la boîte de dialogue d'un objet ou d'un sous-modèle avec ses caractéristiques.



Retour hiérarchique de sous-modèle.



Efface de l'objet sélectionné.



Raccourci de *File* → *Data Environment*.

Palette d'objets

Les objets du modèle sont toujours visibles à l'écran (*Figure 13*):



Figure 13 : Palette d'objets

En cliquant une fois sur un objet, une nouvelle édition de cet objet apparaît sur l'interface graphique. En cliquant deux fois sur l'objet, une boîte de dialogue est ouverte (*Figure 14*).

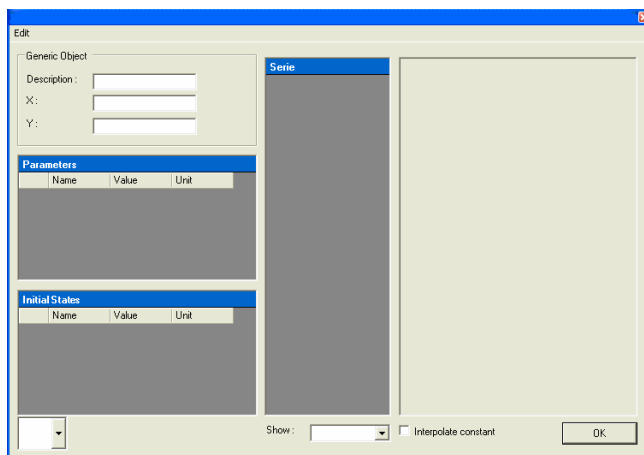


Figure 14 : Tableau général des objets

Dans la partie « *Generic Object* », le nom de l'objet (« *Description* »), et la position (« *X* », « *Y* ») sur l'interface graphique peuvent être modifiés. Autres caractéristiques peuvent aussi être modifiées, comme les paramètres, les valeurs initiales ou certaines séries de valeurs.

Objets

Une liste d'objets hydrauliques ou hydrologiques caractérisés chacun par leur fonction hydraulique propre est disponible. Par leur combinaison, ces objets permettent de définir des fonctions plus complexes, qui peuvent être agrégées dans de nouveaux sous-modèles.

Le logiciel *Routing System II* contient les objets dont la liste et les principales caractéristiques sont énumérées ci-dessous :

Station virtuelle (objet amont)



L'objet hydraulique « *Station* » permet la spatialisation des variables météorologiques (pluie, température, ETP) à partir des données disponibles dans la BD du « *Data Environment* ». La station possède un référencement spatial en coordonnées métriques. Les paramètres de l'objet qui peuvent être changées sont :

- Coordonnées réelles (« *X* », « *Y* » et « *Z* ») en m.
- Rayon de recherche (« *Search Radius* ») en m.
- Gradient pour la précipitation (« *Gradient i* ») en mm/h/m.
- Gradient pour la température (« *Gradient T* ») en °C/h/m.
- Gradient ETP (« *Gradient ETP* ») en mm/h/m.
- Coefficient de pondération pour la précipitation (« *Coeff P* »).
- Coefficient de pondération pour la température (« *Coeff T* »).
- Coefficient de pondération pour l'ETP (« *Coeff ETP* »).

Le lien entre le « *Data Environment* » et l'objet « *Station* » n'est pas explicite et n'est pas représenté par une flèche. La base de données chargée en mémoire vive à partir de « *Data Environment* » est automatiquement utilisée.

Série temporelle (objet amont)



À cet objet peuvent être directement connectées des séries temporelles de débit, précipitation, température ou ETP. Le temps est noté en secondes et les valeurs associées aux unités correspondantes sous forme de tableau « *t – paramètre* ».

Réservoir



Les réservoirs sont créés avec cet objet. La relation « Niveau - Volume » doit être introduite, ainsi que la « Hauteur initiale » du réservoir. Il est recommandé de donner les niveaux en altitude [m s.m].

Déversoir



Les déversements aux réservoirs sont simulés avec cet objet. La relation « Niveau - Débit déversé » doit être donnée. Il est aussi recommandé de donner les niveaux en altitude [m s.m].

Tronçon de cours d'eau

Les possibilités sont diverses. Les méthodes de Muskingum-Cunge, Onde cinématique ou St. Venant peuvent être choisies.



Muskingum-Cunge



Onde cinématique



St. Venant

Dans tous les cas, les paramètres à fournir sont :

- Largeur de fond de la section (« BO ») en m.
- Pente des berges (« m ») en m.
- Pente de fond (« J_o »).
- Rugosité (« K_s ») en $m^{1/3}/s$.
- Longueur (« L ») en m.
- Débit initial (« Q_{ini} ») en m^3/s .

Turbine / Pompe



Lié à un objet source ou série temporelle, cet objet calcule le turbinage / pompage d'un réservoir vers une jonction, un tronçon de cours d'eau ou un autre réservoir.

Dérivation



Tous les ouvrages hydrauliques de prise d'eau partagent la même fonctionnalité, celle de séparer des débits. Cette fonction requiert la connaissance de la relation « *Débit entrant-Débit dérivé* » (l'utilisateur doit effectuer un calcul du comportement de la prise d'eau et créer ensuite cette relation). Avec cette information, la fonction « *Dérivation* » de *Routing System II* est à même de calculer l'hydrogramme dérivé et celui qui continue « tout droit ».

Jonction



La fonction « *Jonction* » de *Routing System II* permet de calculer l'addition de plusieurs variables. En particulier, elle est capable d'additionner plusieurs hydrogrammes à une confluence.

Sous-modèle



Tous les modèles ou sous-modèles qui ont été sauves sous forme de fichiers */.sim/* peuvent être intégrés au modèle actuel comme sous-modèles.

Source (objet amont)



Avec cet objet, les séries temporelles de débit d'une base de données peuvent être chargées comme valeurs de turbinage, de pompage ou directement comme mesure de débit.

Capteur



L'objet « *Capteur* » est une mesure avec alarme d'une variable quelconque. Il doit être connecté à l'objet associé, par exemple un réservoir, s'il mesure un niveau d'eau. Il est utilisé dans la régulation.

Régulation



Cet objet permet de charger l'interface graphique « Régulation ». C'est dans cette interface que sont construits les modèles régulés.

État



Dans la « Régulation », plusieurs objets d'« État » peuvent être placés, selon l'exemple du schéma (Figure 15). A chaque moment un « État » sera employé en fonction des valeurs aux capteurs correspondants.

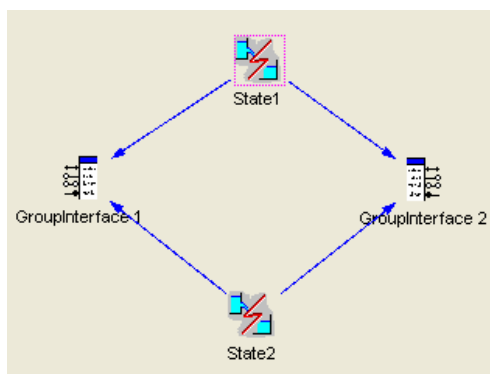


Figure 15 : Exemple de régulation avec 2 états

GroupInterface



Cet objet est indispensable pour réaliser l'assemblage d'un sous-modèle avec le modèle parent ou un autre sous-modèle. Il permet de transporter les variables d'entrée ou de sortie d'un sous-modèle. Pour chaque sous-modèle créé, il faut utiliser un objet « Groupinterface » pour qu'il prenne directement les données d'entrée d'un autre sous-modèle (ou du modèle parent) et un deuxième pour transférer les données de sortie vers un autre sous-modèle (ou vers le modèle parent).

GR3 (infiltration)



Cette fonction de production permet de déterminer la part de la pluie brute qui participe au ruissellement de surface. Elle transforme donc une pluie brute en pluie nette. Le modèle

dénommé « *GR3* » est une fonction de production fondée sur un modèle de réservoir-sol. Il permet à la fois de transformer une pluie brute en pluie nette, de calculer un débit de base et une évapotranspiration réelle. 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.

SWMM (ruissellement)



Cette fonction de transfert permet de calculer un hydrogramme de crue à partir d'une pluie nette. Le modèle « *SWMM* » est un modèle conceptuel global 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.

Neige



Le modèle simule l'évolution temporelle du réservoir de neige (accumulation et fonte) en fonction de la température (T) et de la précipitation (P) et produit une précipitation équivalente (P_{eq}) qui est utilisée comme entrée par le modèle d'infiltration ou par le modèle glaciaire.

Glacier



Le modèle de fonte glaciaire calcule un débit de fonte dans les réservoirs linéaires de neige et de glace en fonction de la pluie brute ou précipitation équivalente, de la température et de la présence ou non de neige sur le glacier, en produisant un débit résultant total. Sa performance est améliorée lorsqu'un modèle de neige est installé à l'amont et connecté à celui-ci.

Somme



La fonction « *Somme* » est un coefficient multiplicateur de n'importe quelle variable. Intégrée au modèle à l'aval d'un objet, elle permet la composition d'une série temporelle avec le multiple d'une autre série.

Base de données

Routing System II fonctionne avec une base de données *Access*. La structure existante sous forme de bases de données *Access* avec 4 tables est présentée à la *Figure 16* :

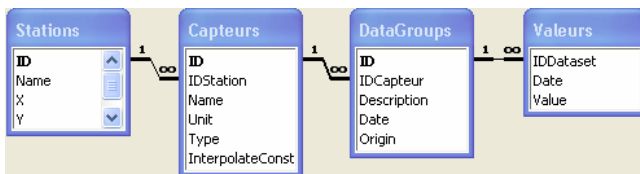


Figure 16 : Attributs et relations entre les tables de la base de données *Access*

La procédure pour construire une base de données consiste à créer une nouvelle base de données structurée *Access* vide et remplir les champs des 4 tables.

Table « Stations » : C'est la table principale, dans laquelle sont stockées les stations de mesures et leurs coordonnées.

Table « Capteurs » : La deuxième table de la base de données est la table des capteurs, où se trouvent les paramètres mesurés ainsi que leurs unités correspondantes.

Table « DataGroup » : Dans cette table se trouve l'heure d'enregistrement des données, sa provenance ou toute autre méta-information.

Table « Valeurs » : Dans cette dernière table sont écrites les séries temporelles <dates, valeurs> des variables mesurées.

Ces bases de données contiennent donc les données sources du calcul hydrologique de *Routing System II*. Un exemple d'une base de données *Access* finale est présenté à la *Figure 17* :

The screenshot shows a database application window titled "Stations : Table". It displays a hierarchical table structure with four levels of data. The top level is a table of stations, the second level is a table of units, the third level is a table of descriptions, and the fourth level is a table of values over time.

| ID | Name | X | Y | Z |
|-----|--------------|--------|--------|------|
| + 1 | Simplon-Dorf | 647570 | 116130 | 1495 |
| + 2 | Brig | 642090 | 129920 | 671 |
| + 3 | Visp | 634125 | 126100 | 655 |
| + 4 | Ackersand | 633625 | 121100 | 700 |
| + 5 | Grächen | 630825 | 116030 | 1617 |
| - 6 | Zermatt | 624350 | 97550 | 1638 |

| ID | Name | Unit | Type | InterpolateConstant |
|-----|-------|------|------|-------------------------------------|
| - 7 | Pluie | mm/h | i | <input checked="" type="checkbox"/> |

| ID | Description | Date | Origin |
|--------|-------------|----------|--------|
| - 7311 | Heure | 09:12:01 | SMA |

| Date | Value |
|---------------------|-------|
| 03.10.1999 01:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 02:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 03:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 04:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 05:00:00 | 0.4 |
| 03.10.1999 06:00:00 | 0.3 |
| 03.10.1999 07:00:00 | 0.1 |
| 03.10.1999 08:00:00 | 0.1 |
| 03.10.1999 09:00:00 | 0.1 |
| 03.10.1999 10:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 11:00:00 | 0.3 |
| 03.10.1999 12:00:00 | 0.1 |
| 03.10.1999 13:00:00 | 0.3 |
| 03.10.1999 14:00:00 | 0.9 |

Record: 30 of 10992

Figure 17 : Base de données Access avec ses quatre tables

Chapitre 5

Travailler avec *Routing System II*

Les possibilités offertes par *Routing System II* étant nombreuses, il est nécessaire de synthétiser les étapes d'utilisation de cet outil. Ce chapitre présente donc un aperçu de la manière d'effectuer une simulation numérique à l'aide de *Routing System II*.

Contenu

- Démarrage du logiciel
- Construction du modèle hydrologique
- Démarrage d'une simulation numérique
- Visualisation des résultats

Démarrage du logiciel



Le programme *Routing System II* est représenté sous forme d'icône sur le bureau de Windows. Pour démarrer le programme, il suffit de double-cliquer sur l'icône *Routing System II*. Dès que vous avez démarré *Routing System II*, la fenêtre principale apparaît (*Figure 18*).

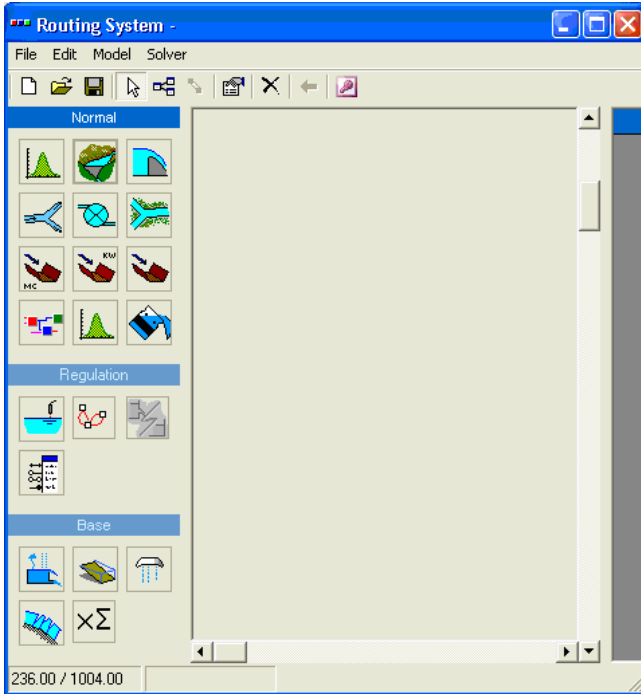


Figure 18 : Fenêtre principale de *Routing System II*

Dès cet instant, un nouveau modèle peut être construit ou un modèle existant peut être ouvert.


Construction du modèle hydrologique

Création des objets

Pour procéder à la création d'objets il faut cliquer une fois sur l'objet désiré dans la « *Palette d'objets* » et celui-ci apparaît directement dans l'interface graphique. Après sa création, l'objet peut être déplacé manuellement pour arranger le modèle, selon la topologie.

En double-cliquant sur n'importe quel objet visible sur l'interface graphique, une boîte de dialogue avec ses caractéristiques s'ouvre. Il est alors possible de saisir les valeurs des paramètres associés à l'objet.


Liaison entre objets

La connexion des objets est simple. Il est possible de cliquer sur l'icône  de la « *Barre d'Outils* » ou de taper sur la barre espace. La flèche de la souris se transforme en une croix. Ensuite, un clic est fait d'un objet à un autre selon le sens d'écoulement pour créer la connexion. Si aucune flèche n'apparaît, les objets ne sont pas compatibles et ils ne peuvent pas être connectés directement.

Les objets sont donc liés par l'utilisateur de l'amont vers l'aval et le logiciel valide automatiquement la connexion si les variables à transmettre sont compatibles. En faisant double-clic sur la flèche, les caractéristiques de la variable transférée d'un objet à un autre sont affichées.

Il est possible de passer du mode connexion au mode sélection en pressant sur la barre espace.

Démarrage d'une simulation numérique

Avant d'effectuer une simulation, il faut d'abord disposer du modèle hydrologique ou en charger un (*Figure 19*). Pour l'ouvrir il faut juste cliquer sur l'icône  ou aller à *File* → *Open...* et sélectionner le modèle désiré.

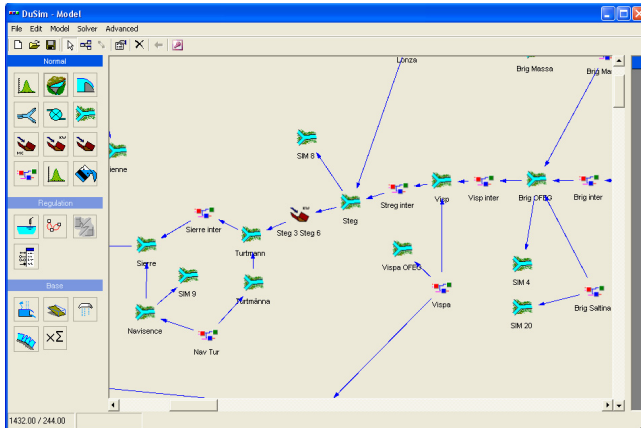



Figure 19 : Exemple de modèle hydrologique (Jordan, 2007)

S'il existe des objets « Station » ou « Source » dans le modèle, il est nécessaire de charger la base de données correspondante qui comprend les variables météorologiques de la période à simuler. Pour le faire, un clic sur  ou sur le Menu (*File* → *Data Environment...*) est suffisant. Il faut encore charger la base de données (BD) en sélectionnant *File* → *Open Access*.

Une fois la base de données chargée, il est possible de lancer une simulation. Pour démarrer cette simulation il faut tout d'abord choisir la période de simulation en cliquant sur le Menu *Solver* → *Edit Solver* et ensuite introduire:

- la date du début de la période (« *Data Start* »).
- la date de fin (« *Data End* »).
- le pas de temps auquel sont calculées les variables (« *Constant Time Step* »).
- le pas de sauvegarde de données (« *dt Save* »).

Pour lancer le calcul, il faut juste choisir *Solver* → *Solve* dans le Menu.

Visualisation des résultats

Une fois la simulation terminée, toutes les variables telles que débits (Figure 20), hauteurs d'eau dans les réservoirs, hauteurs de neige, etc. peuvent être affichées en double-cliquant sur n'importe quel objet.

Chapitre 5 - Travailler avec *Routing System II*

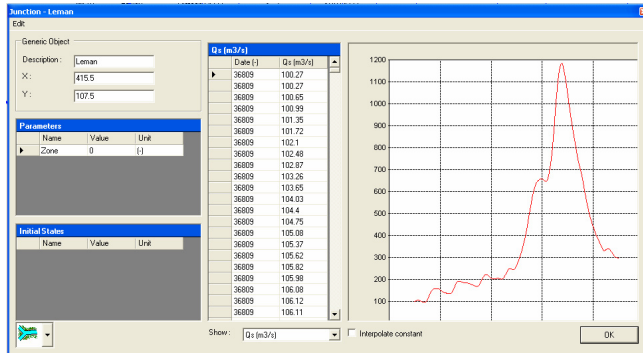


Figure 20 : Exemple d'hydrogramme

S'il y a plus d'une variable calculée, il faut choisir la variable désirée dans la liste déroulante « Show ».

Chapitre 6

Exemples d'application

Quelques exemples d'application sont proposés afin d'approfondir les connaissances du programme. Ces exemples basiques sont destinés à faciliter l'apprentissage du logiciel *Routing System II*. Ils sont répertoriés dans un ordre de difficulté croissant.

L'utilisation de *Routing System II* dans l'étude de cas réels a démontré la capacité du logiciel à reproduire correctement des comportements mesurés, à faciliter la recherche des scénarios de fonctionnement déterminants ainsi que l'optimisation de systèmes complexes.

Ce chapitre contient trois exemples à but didactique.

Contenu

- Exemple 1- Transfert et routage
- Exemple 2- Production, transfert et routage
- Exemple 3- Constructions de sous-modèles

Exemple 1 – Transfert et routage

Dans le premier exemple, l'objectif est de modéliser le transfert pluie nette-débit sur 2 surfaces imperméables, le routage des hydrogrammes dans des cours d'eau, l'addition de ces 2 contributions et leur routage jusqu'à l'exutoire représenté par un lac (*Figure 21*).

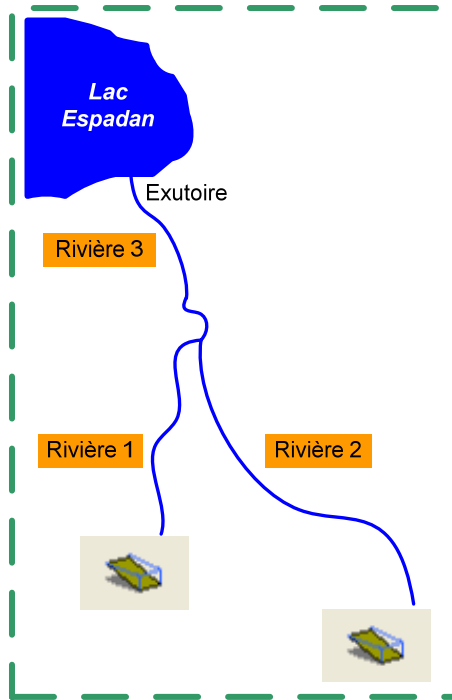


Figure 21 : Schéma du modèle

Admettons que les deux surfaces imperméables se trouvent dans la même région et qu'elles reçoivent une précipitation identique. Chaque surface a son exutoire dans un cours d'eau différent, qui se rejoignent avant de se jeter dans le lac à l'aval d'un troisième tronçon. Les paramètres et variables d'état des deux surfaces et des 3 tronçons de cours d'eau et les données de précipitation sont fournis dans la *Table 1*. Les trois tronçons de cours d'eau sont modélisés avec le modèle d'onde cinématique.

Le résultat recherché est l'hydrogramme à l'exutoire du bassin versant pendant les 24 heures suivant le début des précipitations.

Chapitre 6 - Exemples d'application

Table 1 : Caractéristiques des objets

Précipitation

| t(h) | pluie (mm/h) |
|------|--------------|
| 0 | 0 |
| 1 | 1.08 |
| 2 | 1.44 |
| 3 | 1.80 |
| 4 | 2.88 |
| 5 | 5.40 |
| 6 | 8.28 |
| 7 | 9.97 |
| 8 | 6.84 |
| 9 | 5.04 |
| 10 | 3.24 |
| 11 | 2.63 |
| 12 | 1.44 |
| 13 | 0.72 |
| 14 | 0 |

SWMM 1

| Param. | Valeur | Unit. |
|----------|----------|---------------------|
| Area | 1.00E+07 | m ² |
| Longueur | 1500 | m |
| JO | 0.1 | - |
| K | 1.9 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

SWMM 2

| Param. | Valeur | Unit. |
|----------|----------|---------------------|
| Area | 4.00E+06 | m ² |
| Longueur | 3000 | m |
| JO | 0.05 | - |
| K | 1.5 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

Rivière 1

| Param. | Valeur | Unit. |
|--------|--------|---------------------|
| BO | 6 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 3000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Rivière 2


| Param. | Valeur | Unit. |
|--------|--------|---------------------|
| BO | 4 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.005 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 6000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Rivière 3

| Param. | Valeur | Unit. |
|--------|--------|---------------------|
| BO | 7 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |


Résolution de l'Exemple 1

Ce premier exemple est une représentation très simplifiée de la réalité. Il permet toutefois de se familiariser avec le concept de *Routing System II* et quelques objets hydrauliques.

Premièrement un objet « *Time serie* »  doit être créé. En cliquant une seule fois sur l'objet dans la palette, une icône est créée sur l'interface graphique. En double-cliquant sur l'objet créé on ouvre la boîte de dialogue associée. Il s'agit alors d'introduire les valeurs « *temps (s) - pluie nette (m/s)* » dans les unités utilisées par *Routing System II* (Figure 22).

| Serie | | |
|-------|----------|----------|
| | Time (s) | i (m/s) |
| ▶ | 0 | 0 |
| | 3600 | 3E-07 |
| | 7200 | 4E-07 |
| | 10800 | 5E-07 |
| | 14400 | 8E-07 |
| | 18000 | 1.5E-06 |
| | 21600 | 2.3E-06 |
| | 25200 | 2.77E-06 |
| | 28800 | 1.9E-06 |
| | 32400 | 1.4E-06 |
| | 36000 | 9E-07 |
| | 39600 | 7.3E-07 |
| | 43200 | 4E-07 |
| | 46800 | 2E-07 |
| | 50400 | 0 |

Figure 22 : Valeurs de la « *Time serie* »

Ensuite, les deux surfaces de ruissellement doivent être créées en installant 2 fois un objet « *SWMM* » . Pour chaque nouvel objet ainsi créé, il est nécessaire de définir ses paramètres en double-cliquant sur son icône.



Finalement, les trois tronçons de cours d'eau peuvent être créés en choisissant le modèle « *Kinematic Wave* » . Il faut à nouveau cliquer une fois sur l'objet désiré dans la *Palette d'objets* pour le créer, et deux fois sur la nouvelle icône dans l'interface graphique pour ouvrir sa boîte de dialogue. Les paramètres proposés sont fournis dans la *Table 1*. Il faut également choisir un débit initial (Q_{mi}). Le modèle sera terminé après avoir créé deux jonctions avec l'objet « *Junction* » . Dès cet instant, l'interface graphique a l'aspect suivant (Figure 23):



Figure 23 : Interface graphique Routing System II avec les nouveaux objets

Tous les objets hydrauliques étant créés, il faut désormais établir les connections ou liens topologiques. Pour ce faire, il suffit de taper une fois sur la barre espace du clavier. Le curseur en forme de flèche se transforme en croix. Il est alors possible en cliquant de l'objet « *Time serie* » à l'objet « *SWMM 1* » de créer un lien topologique et une flèche apparaît à l'écran entre les icônes. Connecter de la même façon les autres objets (*Figure 24*). En double-cliquant sur les flèches, nous vérifions qu'elles font un transfert d'intensité entre « *Time serie* » et les deux surfaces de ruissellement et un transfert de débit pour tous les autres de l'amont vers l'aval.

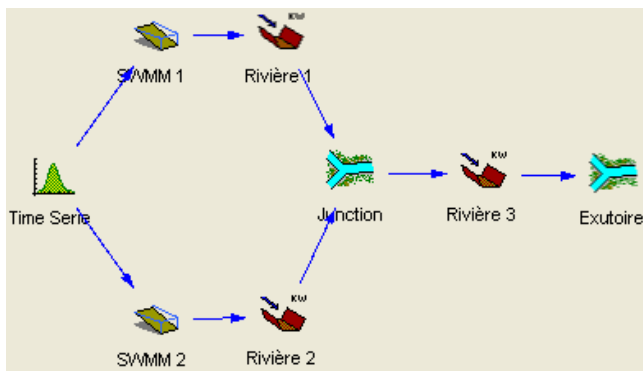


Figure 24 : Liens topologiques entre les différents objets du modèle

Avant d'effectuer le calcul, il ne reste qu'à choisir les paramètres de la simulation (dates) en cliquant sur le bouton *Solver* → *Edit Solver*. Comme « *Date Start* » une date quelconque sera proposée, en choisissant dans le champ « *Date End* » une date 24h plus tard, pour

avoir une simulation d'une durée de 24 heures. Finalement, en cliquant sur le bouton *Solver* → *Solve*, la simulation peut démarrer.

Pour accéder aux résultats du calcul dans chaque objet, il suffit de double-cliquer sur n'importe lequel d'entre eux. Par exemple, en double-cliquant sur l'objet exutoire, le résultat suivant apparaît (*Figure 25*):

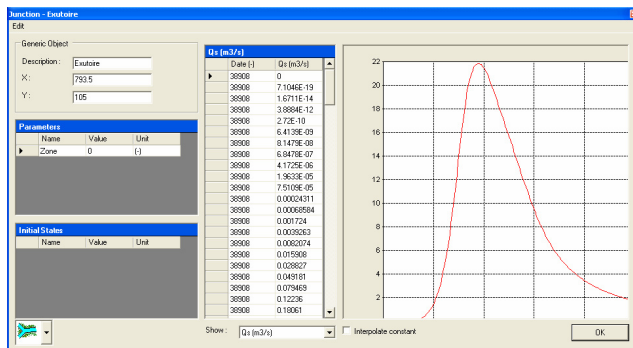


Figure 25 : Résultats de la simulation à l'exutoire du modèle

L'hydrogramme à l'exutoire (*Figure 26*) montre un laminage de la pluie nette par les surfaces imperméables et dans une moindre mesure par les cours d'eau. Pour traiter les résultats, il est nécessaire de les exporter vers d'autres programmes (Excel ou fichiers textes). Pour ce faire, il suffit de sélectionner avec la souris le coin en haut à gauche du tableau des résultats, cliquer sur le bouton droit de la souris et choisir « *Copy* ». En ouvrant Excel par exemple, copier le tableau en effectuant le célèbre *Ctrl+V*.

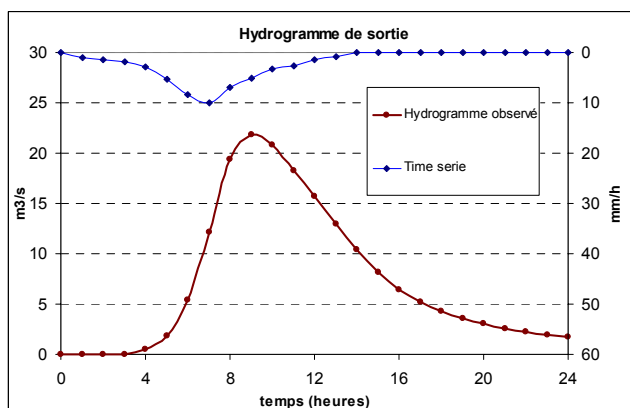


Figure 26 : Résultats superposés de la pluie nette et de l'hydrogramme à l'exutoire

Exemple 2 – Production, transfert et routage

L'objectif de l'*exemple 2* est de créer un modèle hydrologique de production (fonte de neige, de glace et infiltration), transfert et routage pour calculer le débit créé sur un bassin versant par des précipitations brutes et des températures. Concrètement, il s'agit de réaliser un modèle hydrologique à deux sous-bassins versants qui se déversent dans la même rivière. Ce modèle est présenté à la *Figure 27*.

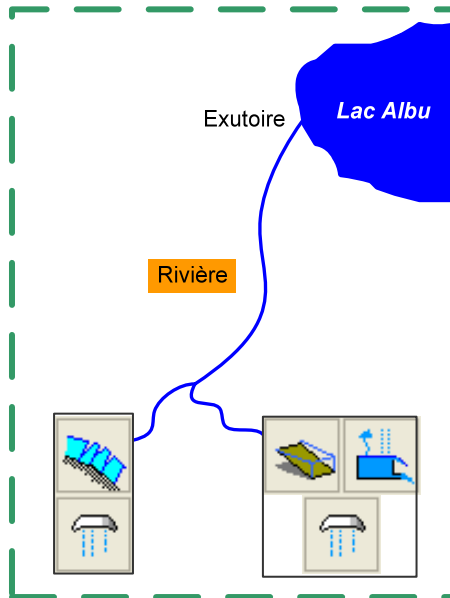


Figure 27 : Schéma du modèle

Le premier sous-bassin se compose d'un modèle de neige et d'un modèle de fonte glaciaire. Le deuxième sous-bassin se compose d'un modèle de neige, d'un modèle d'infiltration et d'un modèle de ruissellement. Les deux sous-bassins déversent leur débit au même endroit dans la rivière, qui transitera jusqu'à l'exutoire.

Les paramètres des objets sont fournis dans la *Table 2* et les données de température et précipitation seront tirées de la base de données « *BD Horaire 2000* ».

L'objectif de cet exemple est de déterminer l'hydrogramme à l'exutoire pour la période comprise entre le 04.03.2000 00.00h et le 15.03.2000 00.00h.

Chapitre 6 - Exemples d'application

Table 2 : Caractéristiques des objets

Station 1

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|---------|--------|
| X | 606482 | m |
| Y | 92777 | m |
| Z | 3035 | m |
| Radius | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Station 2

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|---------|--------|
| X | 602508 | m |
| Y | 110222 | m |
| Z | 1247 | m |
| Radius | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Bande Neige 1

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|--------|----------------|
| An | 10 | mm/C/jour |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m ² |
| Thetalni | 0 | (-) |

Bande Neige 2

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|--------|-----------|
| An | 10 | mm/C/jour |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m |
| Thetalni | 0 | (-) |

Glacier

| Paramètres | Valeur | Unités |
|--------------|----------|-------------------|
| A | 4.00E+06 | m ² |
| AgI | 6 | mm/C/jour |
| Kgl | 0.8 | (-) |
| Kn | 0.8 | (-) |
| Qini,glacier | 0 | m ³ /s |
| Qini,neige | 0 | m ³ /s |

GR3

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|----------|----------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| hMax | 0.3 | m |
| K | 0.00025 | (-) |
| Hini | 0.2 | m |





SWMM

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|----------|---------------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| L | 1000 | m |
| Jo | 0.1 | (-) |
| K | 2 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

Rivière

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|--------|---------------------|
| BO | 5 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Résolution de l'Exemple 2

Premièrement le sous-bassin avec le modèle de neige et le modèle de fonte glaciaire doit être construit. Les objets à créer sont : « Station » , « Neige » , « Glacier »  et « Junction »  (Figure 28). Ensuite, introduire les paramètres associés à chaque objet. Finalement, connecter tous les objets entre eux comme suit :

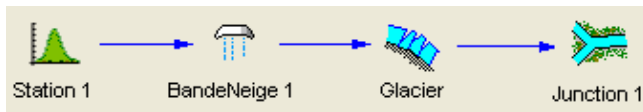


Figure 28 : Liens topologiques entre les différents objets

Les relations entre objets ainsi créées peuvent être visualisées en double-cliquant sur chaque flèche (Figure 29):

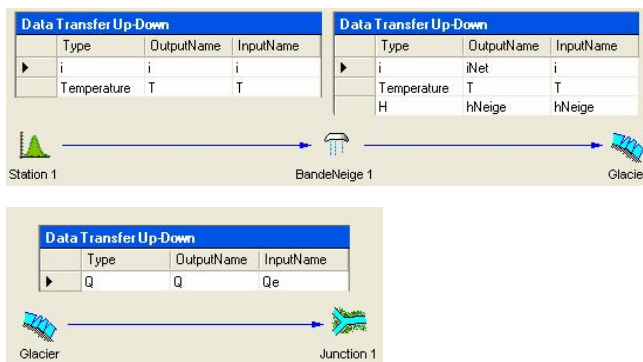







Figure 29 : Relations entre objets

Deuxièmement, le sous-bassin avec le modèle de neige, le modèle d'infiltration et le modèle d'écoulement est construit. Pour le réaliser, les objets à créer sont : « Station » , « Neige » , « GR3 » , « SWMM »  et « Junction » , en introduisant les paramètres associés à chaque objet et selon le schéma de la Figure 30 :

Chapitre 6 - Exemples d'application

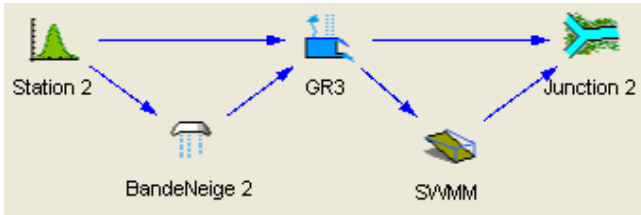


Figure 30 : Liens topologiques entre les différents objets

Les relations créées sont (Figure 31) :

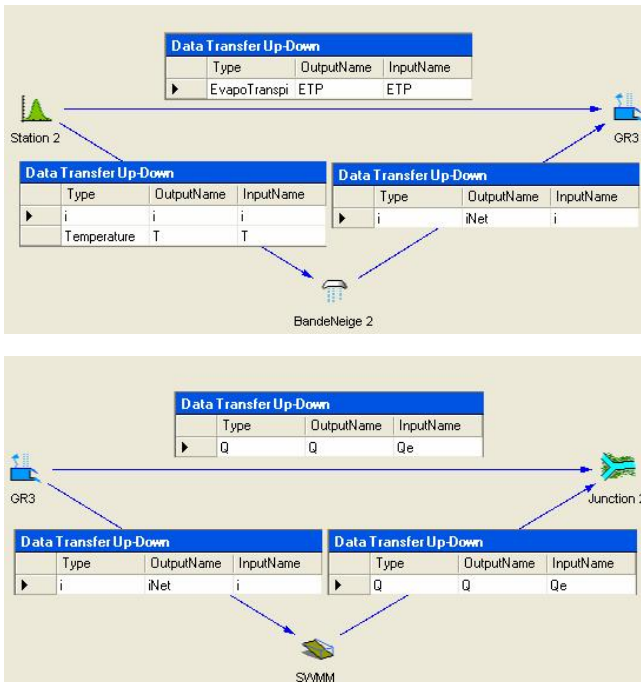




Figure 31 : Relations entre objets

Finalement les objets «Tronçon»  (onde cinématique) et « Junction »  peuvent être installés avant de réarranger et lier la position des différents objets comme présenté à la Figure 32 :

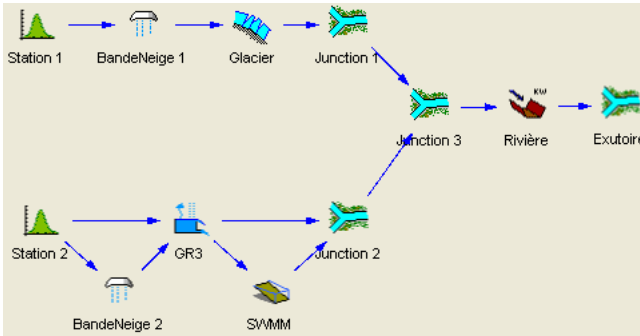



Figure 32 : Topologie du modèle Production - transfert - routage

Les dernières relations créées autour du tronçon de cours d'eau permettent le transfert du débit.

Ce modèle construit doit être sauvegardé en appelant le menu *File* → *Save As...* en choisissant le nom "Exemple 2". Désormais, ce modèle pourra être chargé en tout temps pour réaliser des simulations.

Avant de lancer les calculs, il est nécessaire de charger une base de données, en cliquant sur  ou en appelant le menu *File* → *Data Environment* puis en chargeant le fichier correspondant à partir du menu *File* → *Open Access* et de sa boîte de dialogue associée. Il ne reste finalement qu'à déterminer les paramètres de la simulation dans le menu *Solver* → *Edit Solver* et choisir les dates requises. Dès cet instant, il est possible de démarrer la simulation en cliquant sur le bouton *Solver* → *Solve*.

Une fois le calcul terminé, l'hydrogramme à l'exutoire du modèle peut être visualisé (*Figure 33*) et les résultats conservés en sauvegardant le modèle (*File* → *Save*).

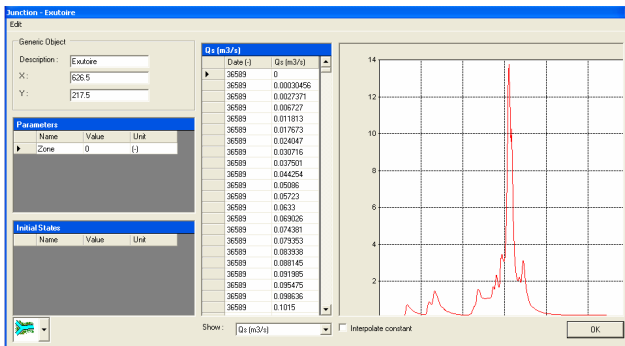


Figure 33 : Hydrogramme à l'exutoire du modèle

Exemple 3 – Construction de sous-modèles

L'objectif de l'exemple 3 est de découvrir les potentialités de *Routing System II* pour la hiérarchisation des composants d'un bassin versant plus compliqué. Il s'agit de réaliser un modèle composé de deux sous-modèles (sous-bassins versants) connectés à deux cours d'eau qui se rejoignent dans un dernier tronçon avant de se jeter dans un lac. Sur l'un des tronçons sera construit un aménagement hydroélectrique qu'il s'agit de modéliser (*Figure 34*).

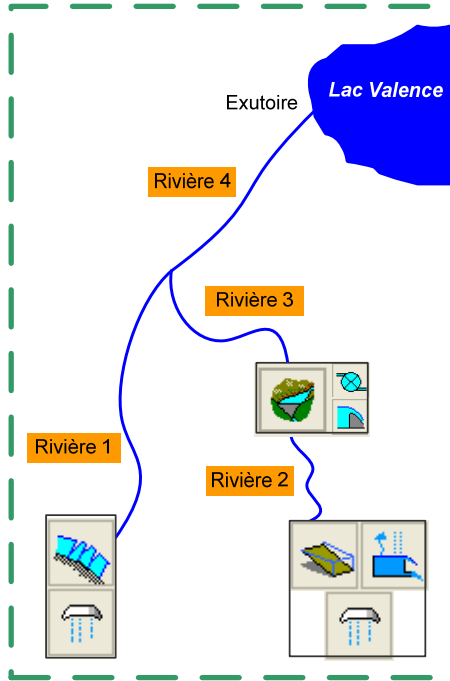


Figure 34 : Schéma du modèle

Le premier sous-modèle est un sous-bassin versant composé d'un modèle de neige et d'un modèle de fonte glaciaire. A l'aval de son exutoire se trouve la *Rivière 1*.

Le deuxième sous-modèle est un sous-bassin versant composé d'un modèle de neige, d'un modèle d'infiltration et d'un modèle de ruissellement. A l'aval de son exutoire se trouve la *Rivière 2* sur laquelle seront construits un réservoir avec turbine et déversoir de crue, à l'aval desquels se trouve la *Rivière 3*.

Les deux rivières seront finalement réunies dans la *Rivière 4* coulant jusqu'à l'exutoire du modèle.

Tous les paramètres des différents objets sont fournis dans la *Table 3*. Les données de température et précipitations sont contenues dans la base de données « *BD Horaire 2000* ».

Le résultat attendu de cet exercice est le calcul des hydrogrammes sortants des deux sous-bassins versants, du déversoir, ainsi que celui produit à l'exutoire du modèle pour la période du 04.03.2000 00.00h au 15.03.2000 00.00h.

Table 3 : Caractéristiques des objets

Station 1

| Param. | Valeur | Unités |
|-----------|---------|--------|
| X | 606482 | m |
| Y | 92777 | m |
| Z | 3035 | m |
| Radius | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Station 2

| Param. | Valeur | Unités |
|-----------|---------|--------|
| X | 602508 | m |
| Y | 110222 | m |
| Z | 1247 | m |
| Radius | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Bande Neige 1

| Param. | Valeur | Unités |
|-----------|--------|-----------|
| An | 10 | mm/C/jour |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m |
| Thetalni | 0 | (-) |

Bande Neige 2

| Param. | Valeur | Unités |
|-----------|--------|-----------|
| An | 10 | mm/C/jour |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m |
| Thetalni | 0 | (-) |

Glacier

| Param. | Valeur | Unités |
|--------------|----------|-------------------|
| A | 4.00E+06 | m ² |
| AgI | 6 | mm/C/jour |
| Kgl | 0.8 | (-) |
| Kn | 0.8 | (-) |
| Qini,glacier | 0 | m ³ /s |
| Qini,neige | 0 | m ³ /s |

GR3

| Param. | Valeur | Unités |
|--------|----------|----------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| hMax | 0.3 | m |
| K | 0.00025 | (-) |
| Hini | 0.2 | m |

SWMM

| Param. | Valeur | Unités |
|--------|----------|---------------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| L | 1000 | m |
| Jo | 0.1 | (-) |
| K | 2 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

Chapitre 6 - Exemples d'application

Réservoir

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|--------|--------|
| hini | 1435.5 | m |

| H (ma.s.l.) | V (m3) |
|-------------|----------|
| 1360 | 0 |
| 1380 | 1.10E+06 |
| 1400 | 2.90E+06 |
| 1420 | 5.50E+06 |
| 1440 | 9.00E+06 |

Déversoir

| H (ma.s.l.) | Q (m ³ /s) |
|-------------|-----------------------|
| 1436 | 0 |
| 1437 | 5 |
| 1438 | 25 |
| 1439 | 100 |
| 1440 | 250 |

Série temp. turbine

| Time (s) | Q (m ³ /s) |
|----------|-----------------------|
| 0 | 1 |
| 3.00E+06 | 1 |

Rivière 1

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|--------|---------------------|
| BO | 5 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Rivière 2

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|--------|---------------------|
| BO | 25 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Rivière 3






| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|--------|---------------------|
| BO | 25 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 4000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Rivière 4

| Paramètres | Valeur | Unités |
|------------|--------|---------------------|
| BO | 30 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Résolution de l'Exemple 3

- **Création du premier sous-modèle**

Tout d'abord, le sous-bassin versant avec les modèles de neige et de fonte glaciaire doivent être construits. Les objets à installer sont : « Station » , « Neige » , « Glacier » , « Junction » , et « GroupInterface » , chacun étant à compléter avec ses paramètres propres. Ensuite, les différents objets peuvent être connectés comme indiqué à la Figure 35 :

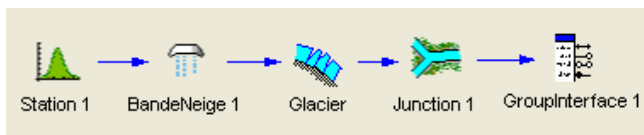


Figure 35 : Liens topologiques entre les différents objets

Les relations ainsi créées peuvent être visualisées en double-cliquant sur chaque flèche (Figure 36) :

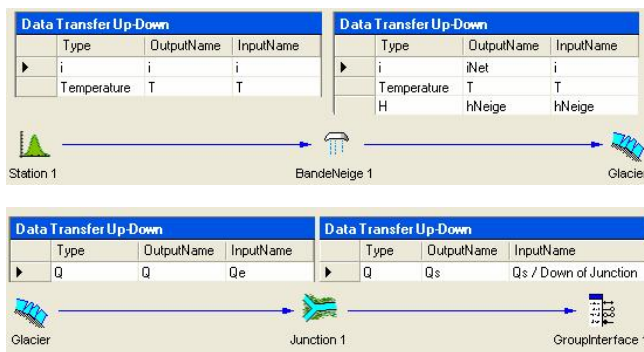







Figure 36 : Relations entre objets

Toutes les relations sont créées automatiquement, sauf les relations liées aux « GroupInterface » pour lesquelles il faut sélectionner le paramètre adéquat (débit) dans une liste apparaissant lors de la connexion.

Une fois ces relations correctement établies, le sous-bassin est sauvegardé comme sous-modèle avec le menu *Model* → *Save Sub Model as...*, en lui donnant le nom "SBVglac". Il sera ainsi possible de le récupérer en tout temps. Ensuite, il faut vider l'interface graphique et effacer le modèle qui a déjà été sauvegardé. L'icône

« Nouveau modèle »  permet de réaliser cette tâche. Il est maintenant possible de construire un autre sous-modèle.

• **Création du deuxième sous-modèle**

Le deuxième sous-modèle à construire contient lui-même un sous-modèle qu'il convient de réaliser d'abord. Il s'agit d'un sous-modèle composé des modèles d'infiltration et de ruissellement. Pour le construire, les objets « GR3 » , « SWMM » , « Junction » , et « GroupInterface »  deux fois, sont sélectionnés et connectés entre eux comme indiqué à la Figure 37 :

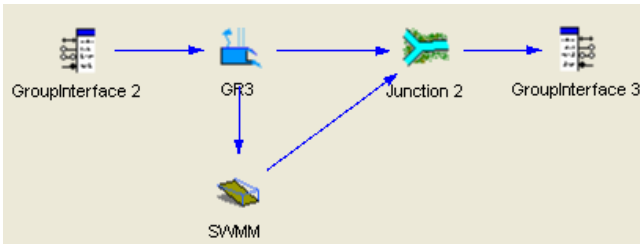


Figure 37 : Liens topologiques entre les différents objets

Les relations créées peuvent être vérifiées (Figure 38) :

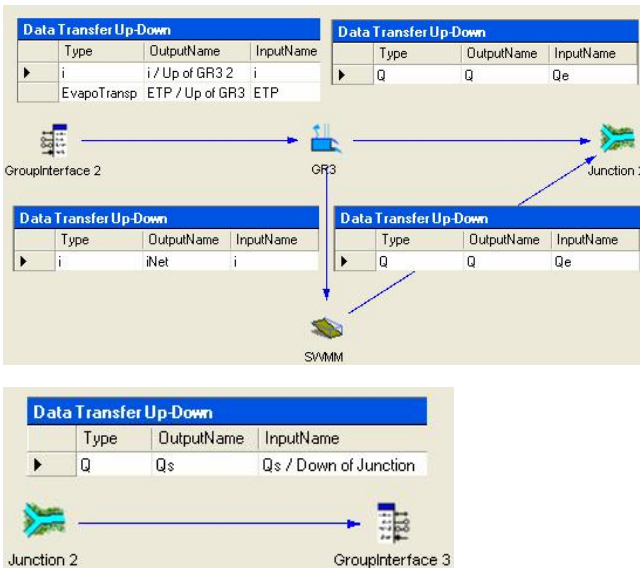










Figure 38: Relations entre objets

Ce sous-modèle doit être sauvegardé comme sous-modèle grâce au menu *Model* → *Save Sub Model as...*, avec le nom "Mod_inf_ruis".

Maintenant il est possible de construire le deuxième sous-modèle en effaçant à nouveau le contenu de l'interface graphique avec le bouton « *Nouveau modèle* » . Les objets à créer sont : « *Station* » , « *Neige* » , « *Junction* » , « *GroupInterface* »  et « *Sub Model* » . En cliquant sur ce dernier bouton, une boîte de dialogue apparaît et permet de charger le sous-modèle précédemment construit "Mod_inf_ruis" sur l'interface graphique. Pour bien représenter ce nouveau venu, il est possible de modifier certaines de ses caractéristiques en le double-cliquant. L'option du menu *Model* → *Edit as Object* doit être sélectionnée et ouvre une nouvelle boîte de dialogue. L'icône correspondant à ce sous-modèle peut être modifiée en utilisant le menu déroulant en bas à gauche . Pour revenir au niveau hiérarchique précédant, il suffit de d'utiliser le bouton « *Retour hiérarchique* » .

Il est maintenant possible de connecter les objets entre eux comme indiqué à la *Figure 39* :

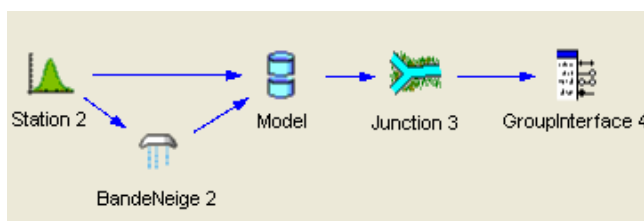


Figure 39: Liens topologiques entre les différents objets

Les relations créées sont illustrés à la *Figure 40* :

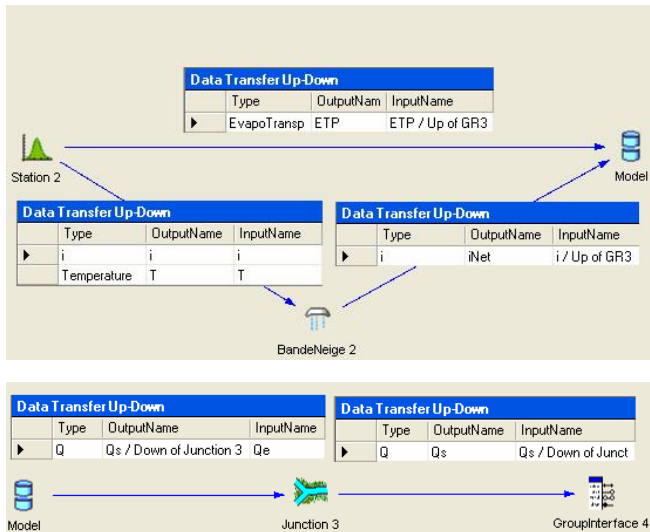










Figure 40: Relations entre objets

Ce sous-bassin doit à nouveau être sauvegardé comme sous-modèle grâce au menu *Model* → *Save Sub Model as...* avec le nom "SBVnonglac". L'interface graphique est finalement purgée à nouveau avec l'icône « Nouveau modèle » .

- **Création du modèle final**

Tous les éléments sont désormais réunis pour construire le modèle complet avec ses deux sous-bassins versants (Figure 41). Premièrement, importer les sous-modèles précédemment construits avec l'objet « Sub Model » dans la palette d'objets, et choisir le sous-modèle "SBVglac". Comme précédemment, l'icône associée à cet objet peut à nouveau être modifiée (). La même opération est faite pour le sous-bassin "SBVnonglac".

Finalement les objets « Réservoir » , « Déversoir » , « Turbine » , « Time serie » , « Tronçon de cours d'eau »  4 fois et « Junction »  9 fois sont installés, et leurs paramètres saisis.

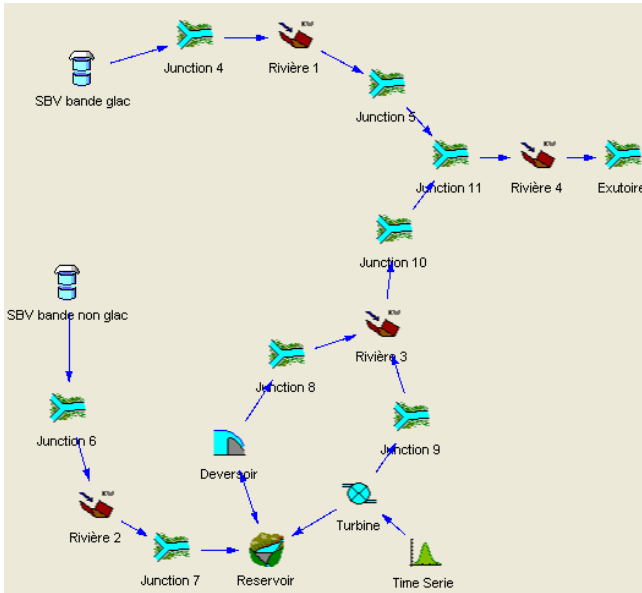


Figure 41: Aperçu du modèle complet de l'exemple 3

Les nouvelles relations à créer sont toutes des transferts de débit créés automatiquement lors de la liaison, à exception des transferts entre le réservoir et le déversoir et entre le réservoir et la turbine, qui seront en tout cas créés du réservoir vers les deux autres objets selon le sens de l'écoulement comme d'habitude (Figure 42).

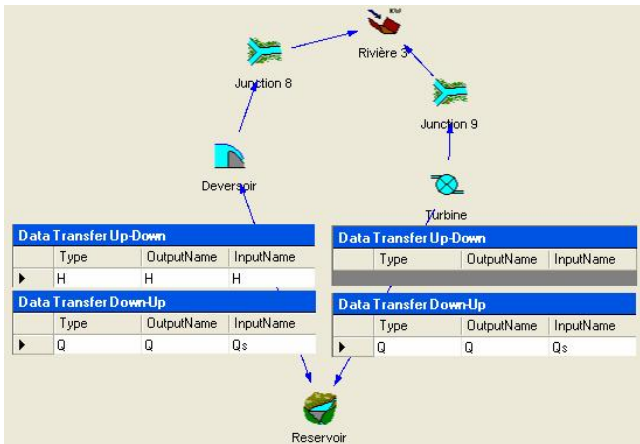



Figure 42 : Relations entre objets

Une fois la construction terminée (*Figure 41*), le modèle doit être sauvegardé grâce au menu *File* → *Save As...* avec le nom “*Exemple 3*”. Désormais, ce modèle pourra être réutilisé en tout temps pour effectuer des simulations.

La dernière étape avant la simulation est de charger la base de données en cliquant sur  ou au menu *File* → *Data Environment...* *File*→*Open Access* et en sélectionnant le fichier «*BD Horaire 2000*».

Il ne reste plus qu'à paramétrer la simulation avec le menu *Solver* → *Edit Solver* et choisir les dates proposées dans l'énoncé du problème (les autres paramètres ne changent pas).

- **Démarrage et résultats**

La simulation est lancée en cliquant sur le bouton *Solver* → *Solve* et tous les résultats peuvent être visualisés en double-cliquant sur les objets correspondants (*Figures 43 à 46*).

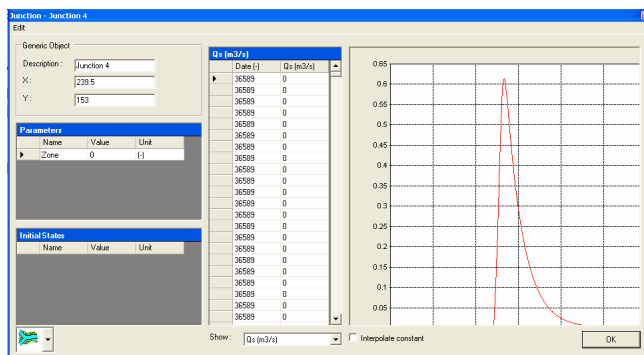


Figure 43 : Hydrogramme à l'exutoire du premier sous-bassin versant

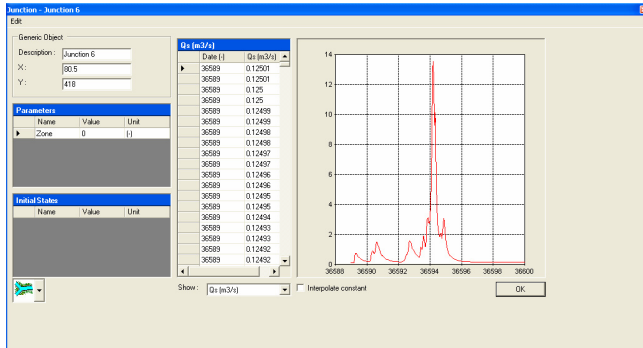


Figure 44: Hydrogramme à l'exutoire du deuxième sous-bassin versant

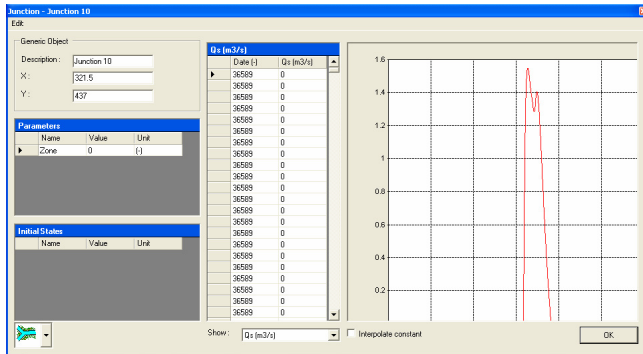


Figure 45 : Hydrogramme à la sortie du déversoir

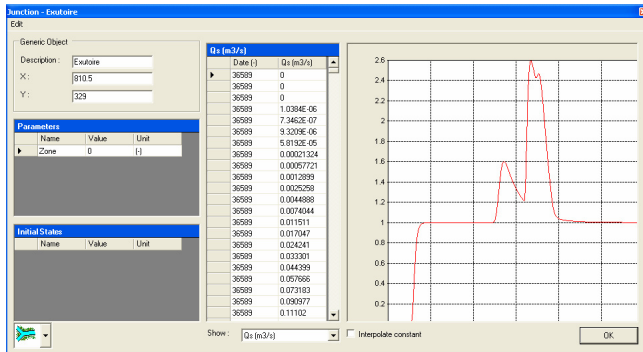


Figure 46 : Hydrogramme à l'exutoire du modèle

Bibliographie

Bérod, D. (1994). *Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes. Apport de la description géomorphologique pour la simulation des processus d'écoulement*, Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

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.

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.

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., Boillat, J.L. (2000). *Routing System: Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre*. Ed. Dr A. Schleiss.

Hamdi, Y., Hingray, B., and Musy, A. (2003). *Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°1 volet B : Modélisation hydrologique*, Technical report, EPFL.

Hamdi, Y., Hingray, B., and Musy, A. (2005). *Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°3 volet B : Modélisation hydrologique*, Technical report, EPFL.

Jordan, F. (2007). *Modèle de prévision et de gestion des crues - optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue*, rapport de thèse N°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

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.

Bibliographie

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.

Schäfli, B., Hingray, B., Niggli, M. and Musy, A. (2005). *A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments*, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions 2*: 73-117.

Communication 32

Routing System II **Flow modelling in hydraulic systems**

Javier García Hernández
Frédéric Jordan
Jérôme Dubois
Jean-Louis Boillat

FOREWORD

Hydrological modeling is essential for the engineer in charge of the planning of hydraulic schemes and protection measures in case of floods. Nevertheless, the control of complex catchment areas requires an adequate technology to allow the simulation of the various processes encountered. In March 2000, the LCH – EPFL answered this need by organizing a training workshop of the software Routing System developed in the LabVIEW environment.

A new enriched version of this programme, named *Routing System II*, is now available in VB.net language to simulate the discharge creation and transfer in a catchment area. It can perform calculations of the spatialization of meteorological variables, of the discharge production as well as of flow transfer in water courses and through hydraulic schemes.

This new version of the programme was developed in the framework of the research MINERVE project, with the objective to forecast floods in a catchment area with dams and hydropower plants. *Routing System II* is a physically based deterministic model which calculates the formation and runoff process of the rainfall while integrating the influence of hydraulic schemes. It also allows the assessment of the snow and ice storage based on temperature and precipitation.

In the present communication, J. García Hernández, F. Jordan, J. Dubois and J-L Boillat have put together useful information for the comprehension and the use of the software.

We thank the Federal Office of the Environment as well as the Roads and Waterways Service of the Canton of Valais for their financial support in this project.

Prof. Dr Anton Schleiss

Index

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCTION | 3 |
| GENERAL CONCEPT OF <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 5 |
| OVERVIEW OF PERFORMANCE AND POSSIBILITIES | 5 |
| <i>User interface</i> | 5 |
| <i>Flow simulation</i> | 5 |
| STRUCTURE OF MANUAL | 6 |
| THEORETICAL BASIS | 7 |
| MODELLING CONCEPT | 8 |
| FUNCTIONS ASSOCIATED FOR EACH OBJECT | 8 |
| <i>Production – Snow model</i> | 8 |
| <i>Production – Infiltration model GR3</i> | 10 |
| <i>Production – Glacier model</i> | 12 |
| <i>Transfer – Surface run-off model</i> | 14 |
| <i>Channel routing</i> | 15 |
| <i>GSM – Socont model</i> | 20 |
| <i>Flow separation</i> | 23 |
| <i>Addition of flows</i> | 24 |
| <i>Storage of flow in reservoir</i> | 25 |
| <i>Spillway</i> | 26 |
| <i>Turbine / Pump</i> | 26 |
| <i>Sensor</i> | 27 |
| <i>Regulation / State</i> | 27 |
| <i>Virtual station</i> | 27 |
| RECOMMENDATIONS FOR INSTALLATION | 29 |
| HARDWARE AND SOFTWARE REQUIREMENTS | 30 |
| INSTALLATION AND UNINSTALLATION PROCEDURE | 30 |
| APPLICATION OF <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 31 |
| MENU BAR | 32 |
| TOOL BAR | 33 |
| LINE-UP OF OBJECTS | 34 |
| <i>Objects</i> | 35 |
| DATABASE | 40 |
| WORKING WITH <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 42 |
| STARTING OF THE PROGRAM | 43 |
| CONSTRUCTION OF A HYDROLOGICAL MODEL | 44 |
| <i>Creation of objects</i> | 44 |
| <i>Link between objects</i> | 44 |

| | |
|--|-----------|
| STARTING OF A NUMERICAL SIMULATION | 44 |
| VISUALIZATION OF RESULTS | 45 |
| EXAMPLES OF APPLICATION | 47 |
| EXAMPLE 1 – TRANSFER AND TRANSPORT | 48 |
| <i>Resolution of Example 1</i> | 50 |
| EXAMPLE 2 – PRODUCTION, TRANSFER AND TRANSPORT | 53 |
| <i>Resolution of Example 2</i> | 55 |
| EXAMPLE 3 – CONSTRUCTIONS OF THE SUB-MODELS | 58 |
| <i>Resolution of Example 3</i> | 61 |
| BIBLIOGRAPHY | 69 |

Chapter 1

Introduction

Hydraulic schemes, especially hydropower plants and flood protection devices, become more and more complex due to the actual demand regarding operation and their environmental integration into landscape (Boillat & al., 2000). For the planning and the optimal management and operation of such hydraulic systems appropriate tools are requested. These tools need to have a good performance to provide a broad and comprehensive vision while analysing the interactions between the different elements in a hydraulic network.

Routing System II program has been developed by Jérôme Dubois at the *Laboratory of Hydraulic Constructions* (LCH) at the *Swiss Federal Institute of Technology* (EPFL) in Lausanne. The program has been established for simulating the formation of free surface run-off flow and its propagation. The tool is based on object-oriented programming and allows for hydrological and hydraulic modeling according to a semi-distributed conceptual scheme. In addition to particular hydrologic processes such as snowmelt, glacier melt, surface and underground flow due to infiltration, hydraulic control elements, for example gates, spillways, diversions, junctions, turbines and pumps are incorporated as well. The code is written in Visual Basic.Net, thus being adapted for object-oriented programming.

The basic principle of *Routing System II* consists in associating each object to a certain hydraulic function being represented by an icon. The different icons can be assembled manually according to a typology defined by the user.

A global analysis of a hydraulic network is essential for most of the cases like the design and regulation of spillways or the development and optimization of an appropriate flood protection concept. *Routing System II*, associated numerically to VB.Net, allows such kind of analysis due to its simple and user-friendly interface and its open structure facilitating the implementation and adaptation of new developments.

Routing System II is designated to replace the initial version called *Routing System* developed in the LabVIEW environment (Dubois, Boillat, 2000).

Content

- General concept of *Routing System II*
- Overview of performance and possibilities
- Structure of manual

General concept of *Routing System II*

Routing System II, written in Visual Basic.Net, is a program using object-oriented programming. It has been developed for the simulation of flood events in complex systems constituted of several subcatchments, diversions, junctions, reservoirs, turbines and hydraulic and hydrological elements with free surface flow.

The objects are described by their hydraulic function exerting on the system. The description of the network is basically carried out by the help of six basic functions, namely: generation of flow, flow transport in a channel, storage, diversion, additional inflow and flow regulation. These functions, each represented by an icon, can be freely assembled on the graphic interface. The data flux between the different functions is realised by linking the icons among each other using the mouse.

This kind of approach allows the modelling of a system owing a complex typology as well as the analysis at different scale levels by the aggregation of subcatchments.

Overview of performance and possibilities

User interface

Employed as a standard executable program, *Routing System II* offers the convenience of a up-to-date graphic interface. The interface allows the creation of a hydrological model and its numerical simulation. A particular effort has been laid on an appealing graphic visualization of all data and results including transient reference which constitutes an essential functionality for the verification of model computations and the analysis of results.

The interface of *Routing System II* offers all standards bars such as *Menu*, *Tools* and line-up of *Objects*.

Flow simulation

The simulation of formation and transport of flow is performed by solving the different equations which are presented in the next chapter for each object.

Structure of manual

The user's guide represents the basic element of the documentation of *Routing System II*. It is structured as follows:

- Chapter 1 gives an overview of the concept and the functionalities of *Routing System II*.
- Chapter 2 presents a general review of the theoretical basis.
- Chapters 3 and 4 contain instructions about the hardware and software necessary, the installation process, existing menus, options and objects implemented in *Routing System II*.
- Chapters 5 and 6 describe how to work with *Routing System II* and show several examples of application.

Chapter 2

Theoretical basis

In catchment areas having a rather complex morphology a large number of hydrological processes might take place. In mountain regions the presence of snow and glaciers has a considerable influence on the hydrological response of the catchment area. Hence, besides taking into account snowmelt and glacier melt, infiltration and surface run-off processes have to be considered as well. Moreover, the multiple possibilities of storage in reservoirs, spillways, turbine operation and pumping, channel routing, diversions and junctions have to be created and linked among each other to allow the correct flux of information.

All hydraulic structures are described by their hydraulic function by the help of six basic functions (generation, routing, storage, diversion, aggregation and regulation).

The hydrological models (Snow, Glacier, GR3, SWMM and GSM-Socont) have been developed within the framework of different research projects, namely CRUEX¹ (Bérod, 1994), SWURVE² (Schäfli & al., 2005) and MINERVE³ (Hamdi & al., 2003 et 2005).

Content

- Modelling concept
- Functions associated for each object

¹ Project CRUEX: Modelling of extreme floods in alpine catchments

² Project SWURVE: Investigation of the influence of climatic changes on alpine catchments

³ Project MINERVE: Model of flood prediction and management for preventive operation of reservoirs of hydropower plants

Modelling concept

In the modelling concept everything is related to functions. The catchment areas are a function of production, diversions are functions for flow repartition, channels are routing functions, lakes and reservoirs are storage functions, junctions are functions of aggregation, ...

The data flow in the system is also represented by functions, like for example hydrographs, limnigraphs, stage-discharge relations, stage-volume relations, inflow - outflow, etc. Finally, by performing an abstraction of the organic structure of the modelled devices, a descriptive representation is obtained considering the hydraulic behaviour only.

These considerations might surprise by the degree of abstraction they require. However, they represent substantial simplifications necessary in modelling complex systems which the reader as well as the user will shortly recognize.

Functions associated for each object

Production – Snow model

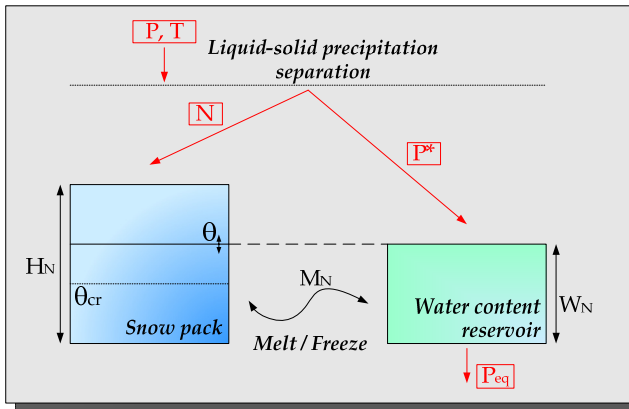


Figure 1: Snow model

The snow model (Figure 1) is composed of two sub-models which simulate the transient evolution of the snow pack (accumulation and melt) as a function of the temperature (T) and precipitation (P)

producing an equivalent precipitation (P_{eq}) which can be used as an input variable by the infiltration or the glacier model.

In a first step the precipitation is divided into a solid precipitation (N) and into a liquid precipitation (P^*) as a function of the temperature (equations 1 to 3):

$$P^* = \alpha \cdot P \quad (1)$$

$$N = (1 - \alpha) \cdot P \quad (2)$$

with P^* : liquid precipitation [m/s]; α : separation factor; P : precipitation [m/s]; N : solid precipitation [m/s].

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 && \text{if } T < T_{cp1} \\ \alpha &= (T - T_{cp1}) / (T_{cp2} - T_{cp1}) && \text{if } T_{cp1} < T < T_{cp2} \\ \alpha &= 1 && \text{if } T > T_{cp2} \end{aligned} \quad (3)$$

with T : temperature [°C]; T_{cp1} : minimum critical temperature for liquid precipitation [°C]; T_{cp2} : maximum critical temperature for solid precipitation [°C].

If the observed temperature is lower than T_{cp1} only solid precipitation is produced. If the temperature is higher than T_{cp2} only liquid precipitation is produced. If the temperature observed is found between these two critical values liquid and solid precipitation are produced. The solid precipitation (N) is used as input for the snow pack, varying its content as a function of melt or freezinge. The snowmelt calculation is performed as follows:

$$\begin{aligned} M_N &= A_n \cdot (1 + b_p \cdot P^*) \cdot (T - T_{cr}) && \text{if } T > T_{cr} \\ M_N &= A_n \cdot (T - T_{cr}) && \text{if } T \leq T_{cr} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dH_N / dt &= N - M_N \\ M_N &\leq N + H_N / dt \\ M_N &\geq -W_N / dt \end{aligned} \quad (5)$$

with M_N : snowmelt or freezinge [m/s]; A_n : degree-day coefficient [m/s/°C]; b_p : precipitation coefficient due to melt [s/m]; T_{cr} : critical snowmelt temperature [°C]; H_N : height of snow [m]; W_N : water content [m]; dt : time step [s].

The differential equation 5 is solved according to Euler (first order) by the following scheme:

$$H_N^{n+1} = H_N^n + (N^n - M_N^n) \cdot \Delta t \quad (6)$$

with index n and $n+1$ representing time; Δt : time step [s].

The equivalent precipitation (P_{eq}) is produced by the water content of the snow (*equations 7 to 9*):

$$\theta = W_N / H_N \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{eq} &= P^* + W_N / dt && \text{if } H_N = 0 \\ P_{eq} &= 0 && \text{if } H_N > 0 \text{ et } \theta \leq \theta_{cr} \\ P_{eq} &= (\theta - \theta_{cr}) \cdot H_N / dt && \text{if } H_N > 0 \text{ et } \theta > \theta_{cr} \end{aligned} \quad (8)$$

$$dW_N / dt = P^* + M_N - P_{eq} \quad (9)$$

with θ : relative water content in the snow pack; θ_{cr} : critical relative water content in the snow pack.

The *differential equation 9* is solved as before (Euler, first order):

$$W_N^{n+1} = W_N^n + (P^{*n} + M_N^n - P_{eq}^n) \cdot \Delta t \quad (10)$$

The variables for the initial situation associated to this model are θ and H_N . The parameter to adjust is A_n . The remaining parameters ($b_p = 0.0125$, $\theta_{cr} = 0.1$, $T_{cp1} = 0$ °C, $T_{cp2} = 6$ °C, $T_{cr} = 0$ °C) are supposed to be constant.

The input variables of the model are precipitation and temperature, the output value is the equivalent precipitation.

Production – Infiltration model GR3

The gross intensity (or equivalent precipitation P_{eq} coming from the snow model) and potential evapotranspiration (PET) are introduced in the GR 3 model (Michel, Edijatno, 1988; Consuegra & al., 1998).

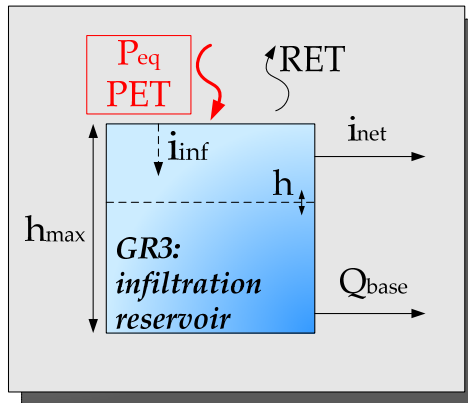


Figure 2: Infiltration model GR3

The infiltration reservoir (*Figure 2*) is computed as follows:

$$\begin{aligned} i_{\text{inf}} &= P_{\text{eq}} \cdot (1 - (h / h_{\text{max}})^2) & \text{if } h \leq h_{\text{max}} \\ i_{\text{inf}} &= 0 & \text{if } h > h_{\text{max}} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} RET &= PET \cdot \sqrt{h / h_{\text{max}}} & \text{if } h \leq h_{\text{max}} \\ RET &= PET & \text{if } h > h_{\text{max}} \end{aligned} \quad (12)$$

$$i_{\text{net}} = P_{\text{eq}} - i_{\text{inf}} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{base}} &= k \cdot h \cdot S & \text{if } h \leq h_{\text{max}} \\ Q_{\text{base}} &= k \cdot h_{\text{max}} \cdot S & \text{if } h > h_{\text{max}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$dh / dt = i_{\text{inf}} - RET - Q_{\text{base}} / S \quad (15)$$

with PET: potential evapotranspiration [m/s]; i_{inf} : infiltration intensity [m/s]; h: level in infiltration reservoir [m]; h_{max} : capacity of infiltration reservoir [m]; RET: real evapotranspiration [m/s]; Q_{base} : base discharge [m^3/s]; k: release coefficient of infiltration reservoir [1/s]; S: surface [m^2]; i_{net} : net intensity [m/s].

The solution of the *differential equation 15* is performed once again according to the Euler method (first order):

$$h^{n+1} = h^n + (i_{\text{inf}}^n - RET^n - Q_{\text{base}}^n / S) \cdot \Delta t \quad (16)$$

The variable for the initial state associated to this model is h. the parameters to adjust are k and h_{max} . The parameter S is supposed to be constant.

The input variables of the model are the equivalent precipitation (or gross intensity) and the potential evapotranspiration (PET). As a result the net intensity, the base discharge and the real evapotranspiration are obtained.

Production – Glacier model

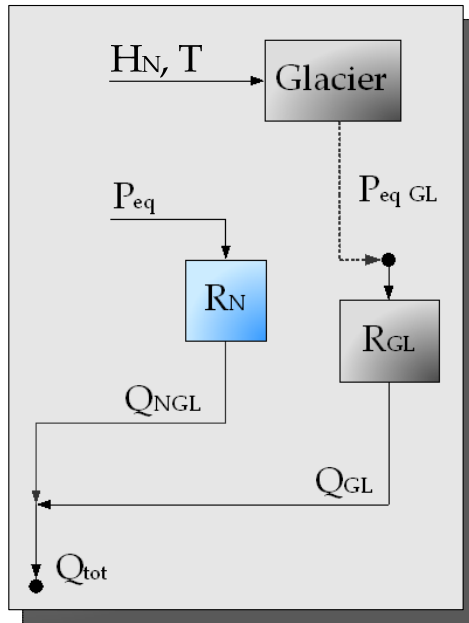


Figure 3: Glacier model

The glacier melt (*Figure 3*) depends on the temperature and the presence of snow on the glacier. The total discharge of the glacier also depends on the transfer processes within the linear snow and glacier reservoirs R_N and R_{GL} .

A gross precipitation (or equivalent precipitation P_{eq} of the snow model) is transferred to the linear snow reservoir (R_N) according to *equation 17*:

$$dH_{NGL} / dt = P_{eq} - K_N \cdot H_{NGL} \quad (17)$$

with H_{NGL} : level in linear snow reservoir [m]; K_N : release coefficient of linear snow reservoir [1/s].

The outflow of the linear snow reservoir Q_{NGL} is:

$$Q_{NGL} = K_N \cdot H_{NGL} \cdot S_{GL} \quad (18)$$

with Q_{NGL} : outflow of linear snow reservoir [m^3/s]; S_{GL} : glacier surface [m^2].

The glacier melt sub-model only provides the discharge when the snow level is zero ($H_N=0$). From this moment on the discharge produced by the glacier melt (P_{eqGL}) is transferred to the linear glacier reservoir (R_{GL}) and the resulting discharge (Q_{GL}) at the outlet of the sub-catchment.

The glacier melt Q_{GL} is defined according to *equations 19 to 21*:

$$\begin{aligned} P_{eqGL} &= 0 && \text{if } T \leq T_{cr} \text{ or } H_N > 0 \\ P_{eqGL} &= A_{GL} \cdot (T - T_{cr}) && \text{if } T > T_{cr} \text{ and } H_N = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$dH_{GL} / dt = P_{eqGL} - K_{GL} \cdot H_{GL} \quad (20)$$

$$Q_{GL} = K_{GL} \cdot H_{GL} \cdot S_{GL} \quad (21)$$

with P_{eqGL} : glacier melt [m/s]; A_{GL} : degree-day glacier melt coefficient [$m/s/^\circ C$]; H_{GL} : level of glacier melt reservoir [m]; K_{GL} : coefficient of linear glacier reservoir [$1/s$]; Q_{GL} : outflow of linear glacier reservoir [m^3/s].

The variables associated to this model are H_N , θ , H_{RN} , and H_{RGL} . The parameters to adjust are A_{GL} , K_{GL} and K_N . The parameter S_{GL} is supposed to be constant after its calculation.

The model inputs are the snow level, the temperature and the gross precipitation (or equivalent precipitation of snow model). The output is the total discharge at the model outlet.

Transfer – Surface run-off model

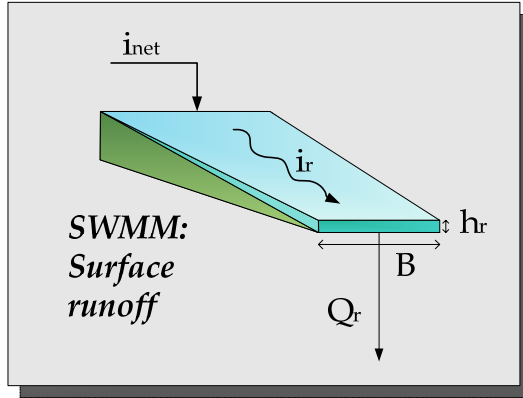


Figure 4: Runoff model SWMM

The transfer of the net intensity to an impermeable surface is carried out by the help of a non-linear transfer reservoir (Figure 4) depending on the equations 22 to 24:

$$\begin{aligned} dh_r / dt &= 2 \cdot (i_{net} - i_r) \\ h_r &> 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$i_r = K_s \cdot \sqrt{J_o} \cdot h_r^{5/3} \cdot B / S \quad (23)$$

$$Q_r = i_r \cdot S \quad (24)$$

with h_r : runoff water level downstream of the surface [m]; i_r : outflow runoff intensity [m/s]; K_s : Strickler coefficient [$m^{1/3}/s$]; J_o : average slope of the plane; B : width of the plane [m].

As for the infiltration model GR3, it is necessary to solve the differential equation with the first order Euler method.

The variable for the initial condition associated to the model is h_r , the parameter to adjust is K_s . The other parameters (J_o , B , S) are supposed to be constant.

The SWMM model (Metacalf, Eddy, 1971), supplied by a hyetograph of net rainfall, provides a hydrograph downstream of the surface.

Channel routing

In the following, three schemes for the resolution of the flow routing in channels are presented.

St. Venant routing

This scheme solves the complete equations of a 1D unsteady flow. The complete equations of St. Venant solving the model are:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + g \cdot I_1 \right) = g \cdot A \cdot (J_0 - J_f) + g \cdot I_2 \quad (26)$$

with A : cross sectional flow area [m^2]; Q : discharge [m^3/s]; J_0 : bottom slope; J_f : friction slope; I_1 : profile coefficient [m^3]; I_2 : coefficient for cross sectional variation [m^2].

Equation 25 expresses the mass conservation while *equation 26* ensures the conservation of momentum. The term I_1 takes into account the shape of the transversal profile and is calculated as follows:

$$I_1 = \int_0^h (h - \eta) \cdot b(\eta) d\eta \quad (27)$$

The term b represents the cross sectional variation for the level η and constitutes an integration variable according to *Figure 5*.

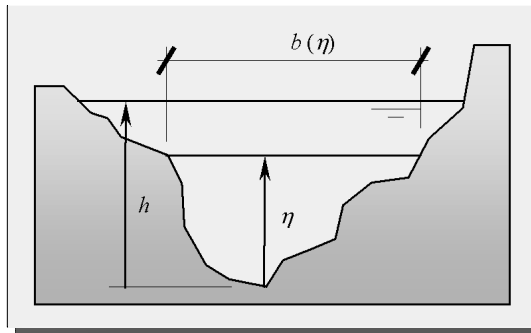


Figure 5: Descriptive sketch for parameters used in the calculation of I_1

At present, *Routing System II* is able to solve the St. Venant equations for the transversal profile presented in *Figure 6*:

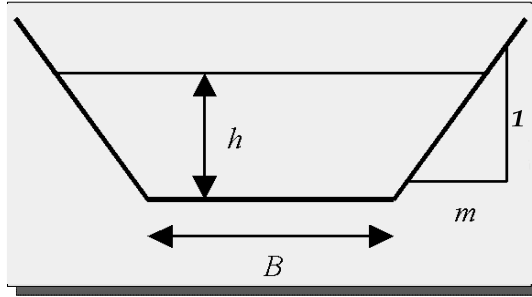


Figure 6: Transversal profile available in Routing System II for the computation of channel routing

For this trapezoidal section the equation defining I_1 is reduced to:

$$I_1 = \frac{B \cdot h^2}{2} + \frac{m \cdot h^3}{3} \quad (28)$$

with B: width of the base of the transversal profile [m]; h: water level [m]; m: side slope of the bank of the channel (1 vertical / m horizontal).

The friction slope J_f is calculated according to Manning-Strickler:

$$J_f = \frac{Q \cdot |Q|}{A^2 \cdot K^2 \cdot R_h^{2/3}} \quad (29)$$

$$R_h = \frac{A}{L_p} \quad (30)$$

with K: Strickler coefficient; R_h : hydraulic radius [m]; A: flow area [m²]; L_p : wetted perimeter [m].

The term I_2 takes into account the variation of the section along the channel. In the case of a prismatic channel I_2 is equal to zero. In general I_2 is:

$$I_2 = \int_0^h (h - \eta) \frac{\partial b}{\partial x} \Big|_{h=\eta} \quad (31)$$

For a prismatic channel, *equations 25 and 26* are solved by the Euler method (first order) as follows:

$$A_{j+1}^{n+1} = A_{j+1}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) \quad (32)$$

$$Q_{j+1}^{n+1} = Q_{j+1}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{(Q_{j+1}^n)^2}{A_{j+1}^n} - \frac{(Q_j^n)^2}{A_j^n} + g \cdot I_{1,j+1}^n - g \cdot I_{1,j}^n \right) + \Delta t \cdot g \cdot \frac{(A_j^n + A_{j+1}^n)}{2} \cdot J_0 - \Delta t \cdot g \cdot A_{j+1}^n \cdot J_{f,j+1}^n \quad (33)$$

with index j and $j+1$ representing the spatial position; exponent n and $n+1$ representing the time increment; g : 9.81 [m²/s]; Δx : longitudinal increment [m].

The downstream boundary condition used by *Routing System II* is the normal flow depth.

In practice, according to the physical situation to be simulated, some terms of the complete dynamic equations can be eliminated in order to get simplified expressions without losing precision. Applicable solutions are the diffusive and cinematic wave which are presented in the following.

Routing according to Muskingum-Cunge

Ruling out the first two terms of *equation 26* yields:

$$\frac{\partial I_1}{\partial x} = A \cdot (J_0 - J_f) + I_2 \quad (34)$$

This new equation corresponds to the approximation of the diffusive wave. With the supplementary hypothesis of a prismatic channel (Cunge, 1991) it is possible to express *equation 26* as follows:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{Q}{BD} \frac{dD}{dh} \right) \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{D^2}{2B|Q|} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (35)$$

with B : width of the bottom of the transversal profile [m]; D : discharge rate [m³/s].

The discharge rate is the capacity of a cross section of a channel to transport a certain flow and is defined as:

$$Q = DJ_0^{1/2} \quad (36)$$

Equation 35 is an equation with partial derivatives of parabolic type which represents the convection and the diffusion of the variable Q . Hence, the flow transported with a velocity c (*equation 37*) and diffused with a diffusion coefficient δ (*equation 38*):

$$c = \frac{Q}{BD} \frac{dD}{dh} \quad (37)$$

$$\delta = \frac{D^2}{2B \cdot |Q|} \quad (38)$$

Based on the hypothesis of a clearly defined relation between the flow Q and the water level h , *equation 35* is reduced to:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

This equation is called «equation of the kinematic wave» and describes the simple convection of the flow with a velocity c according to *equation 37*. It can be solved by the following numerical finite difference scheme:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1+X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{\Delta t} \quad (40)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{\frac{1}{2}(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1}{2}(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} \quad (41)$$

Applying this scheme to *equation 39* yields:

$$\begin{aligned} & \frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1+X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{c\Delta t} + \\ & + \frac{\frac{1}{2}(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1}{2}(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

The solution of this equation as a function of the unknown variable Q_{j+1}^{n+1} leads to:

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^{n+1} + C_2 Q_j^n + C_3 Q_{j+1}^n \quad (43)$$

with:

$$\begin{aligned} C_1 &= - \frac{\kappa X - \frac{\Delta t}{2}}{\kappa(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \\ C_2 &= \frac{\kappa X + \frac{\Delta t}{2}}{\kappa(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \\ C_3 &= \frac{\kappa(1-X) - \frac{\Delta t}{2}}{\kappa(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \end{aligned} \quad (44)$$

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (45)$$

$$c = \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{A_{j+1}^n - A_j^n} \quad (46)$$

Here, hydraulic engineers might recognize the equation of Muskingum (Boillat 2000) corresponding to the name of the river localized in the United States where the method was employed for the first time. The Muskingum method represents an approximation by finite differences of the equation for the cinematic wave. This is not only an appearance since developing the terms of *equation 42* in terms of a Taylor series around the point (j, n) assuming $\Delta x/\Delta t = c$ and neglecting the quadratic terms (Δx^2) the equation can be written as follows:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} - cB \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (47)$$

$$B = \Delta x \left(\frac{1}{2} - X \right) \quad (48)$$

According to this analysis proposed by Cunge (1969) it can be recognized that the Muskingum equation is a solution in terms of finite differences of the equation of the diffusive wave (35) under the condition of correctly introducing the value of the parameters K and X . K is defined by *equation 45* and according to the celerity c (*equation 48*) X corresponds to:

$$X = \frac{1}{2} - \frac{D^3}{2\Delta x |Q| Q \frac{dD}{dh}} \quad (49)$$

This function of the diffusive wave implemented at present in *Routing System II* is capable of solving the Muskingum-Cunge equation for the trapezoidal geometry of a transversal profile according to *Figure 6*.

Routing according to the cinematic wave

The kinematic wave model is the simpler routing model where the terms of inertia and pressure of the St. Venant equations are supposed to be negligible. As a consequence, the cinematic hypothesis supposes that the gravity forces are identical, though with an opposite sign, to the friction forces. This implies that there is an explicit relationship between the flow and the water level (measured normal water depth).

The equation of the cinematic wave as presented in the previous chapter is presented as follows:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (50)$$

This is a simple equation of convection which indicates that the flow Q is transported downstream with a celerity c which is defined as:

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} \quad (51)$$

This rather simple model transports each point of the hydrograph from upstream to downstream with a velocity c . Since no diffusive term appears in the equation the peak discharge remains constant and is not reduced. On the contrary, the general behaviour of a flood is modified, since high discharges are transferred downstream more rapidly than small ones.

The initial parameters are identical to those of the model of the diffusive wave. The geometry for the transversal profiles also corresponds to the same than for the Muskingum-Cunge method (trapezoidal channels, *Figure 6*). Opposite to the model of the diffusive wave, no reduction of the flood is produced as mentioned previously. The solution is performed according to the following equations:

$$c = \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{A_{j+1}^n - A_j^n} \quad (52)$$

$$\alpha = c \cdot \frac{\Delta t}{\Delta L} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} Q_{j+1}^{n+1} &= \alpha \cdot Q_j^n + (1 - \alpha) \cdot Q_{j+1}^n & \text{si } \alpha \leq 1 \\ Q_{j+1}^{n+1} &= \frac{1}{\alpha} \cdot Q_j^n + \left(1 - \frac{1}{\alpha}\right) \cdot Q_j^{n+1} & \text{si } \alpha > 1 \end{aligned} \quad (54)$$

GSM – Socont model

The GSM-SOCONT model (Glacier Snow Melt – Soil CONTRIBUTion model, Schäfli & al, 2003 & 2005) is the combination of several hydrological models. According to this concept an alpine sub-catchment can be separated into a glacier and a non-glacier part.

The glacier part is composed of a snow model upstream of a glacier model. The non-glacier part is composed of a snow model upstream of a SOCONT model which is composed at the same time of the GR3 and SWMM models. The discharge at the outlet of the sub-catchment represents the sum of the two discharges.

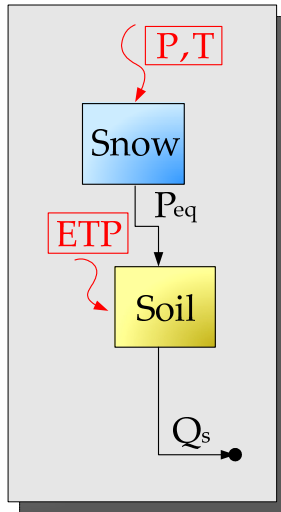
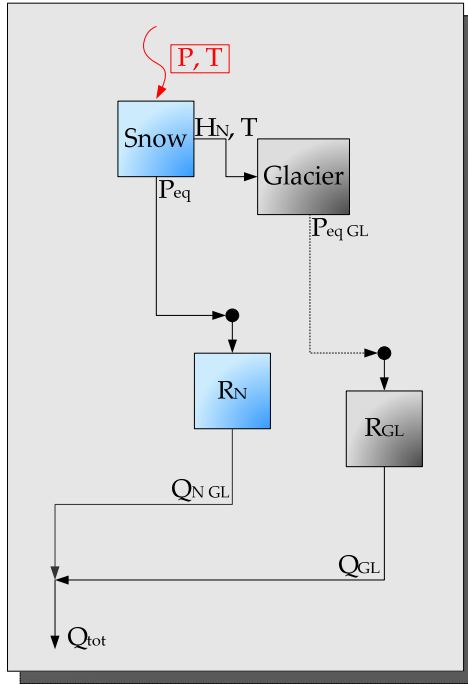
Non- glacier part

Figure 7 : *Non-glacier part*

In the non-glacier part (*Figure 7*), the snow model simulates the transient evolution of the snow pack (melt and accumulation) as a function of the temperature (T) and precipitation (P), thus providing an equivalent precipitation (P_{eq}) that is used as input by the SOCONT model. The SOCONT model also takes into account the potential evapotranspiration (ETP). The outflow discharge Q_s is transferred to the outlet of the sub-catchment.

Glacier part**Figure 8:** *Glacier part*

The glacier part (*Figure 8*) is composed of 4 sub-models (one corresponding to the snow model and the other 3 corresponding to the glacier model).

The snow model creates an equivalent precipitation (P_{eq}) which is transferred to the glacier model. The same accounts for the height of the snow (H_N) and the temperature (T).

In the glacier model the equivalent precipitation is transferred to the linear snow reservoir (R_N) and finally to the outlet of the sub-catchment (Q_{NGL}). Besides, the sub-model of the glacier melt creates a flow when the height of snow is zero ($H_N=0$). This glacier flow (P_{eqGL}) is transferred to the linear glacier reservoir (R_{GL}) and the resulting flow (Q_{GL}) to the outlet of the sub-catchment.

The final flow produced by the sub-catchment (Q_{tot}) is the addition of the two flows.

Flow separation

The function « *Diversion* » of *Routing System II* clearly illustrates the potential of the functional modeling. In fact, no normalization can be envisaged regarding the diversions. Moreover, it is not possible to elaborate a list with all physical parameters allowing the complete calculation of a diversion.

However, all hydraulic diversion structures although strongly different share the same functionality inside a hydraulic network: the separation of flow.

Apart of the incoming hydrograph, this function needs the relation « *Inflow – Diverted flow* » according to the example presented in *Figure 9*. In general, this relation, which describes the behaviour of the diversion, is not generated by the *Routing System II* program. The user has to perform a calculation for the behaviour of the diversion and then create the relation « *Inflow – Diverted flow* ».

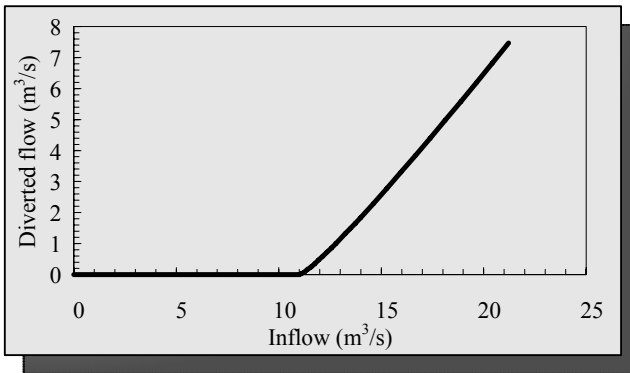


Figure 9: Example of an Inflow-Outflow relation for a lateral spillway

With this information the function « *Diversion* » of *Routing System II* calculates the derived hydrograph and the hydrograph which continues straight in the same direction, as shown in *Figure 10* and by *equation 55*:

$$Q_{total}^n = Q_{diverted}^n + Q_{no-diverted}^n \quad (55)$$

with Q_{total}^n : total flow at instant n [m³/s]; $Q_{diverted}^n$: diverted flow at instant n [m³/s]; $Q_{no-diverted}^n$: non-diverted flow at instant n [m³/s].

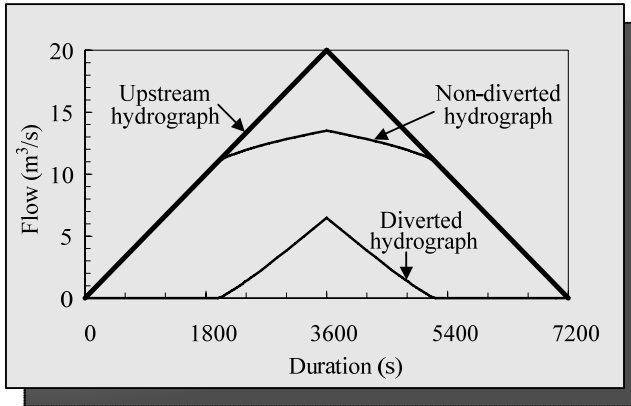


Figure 10: Example of flow in a bifurcation

This example illustrates the non-linear behaviour of a water diversion consisting in a lateral spillway. As can be seen even with a linear upstream hydrograph calculated hydrographs have enough data points for describing correctly the non-linear behaviour of the spillway.

Addition of flows

The function « Junction » of *Routing System II* allows, in general, the calculation of the addition of several functions. Especially, it is possible to add several hydrographs in a junction according to equation 56:

$$Q_1^n + Q_2^n + \dots + Q_m^n = Q_{total}^n \quad (56)$$

with Q_i^n : individual flows at instant n [m^3/s]; Q_{total}^n : total flow at instant n [m^3/s].

This appears to be rather simple or even trivial. However, this operation is relatively complex due to the fact that functions circulating in a *Routing System II* model are neither defined in the same time interval nor synchronized. As a consequence, this function carries out several interpolations for obtaining a correct result (Figure 11).

If a function described by n points is added to another one having m points and if none of these points are synchronized, the resulting function will have $n + m$ points. If, on the contrary, two points of the functions are synchronized, the result will keep up only one of them.

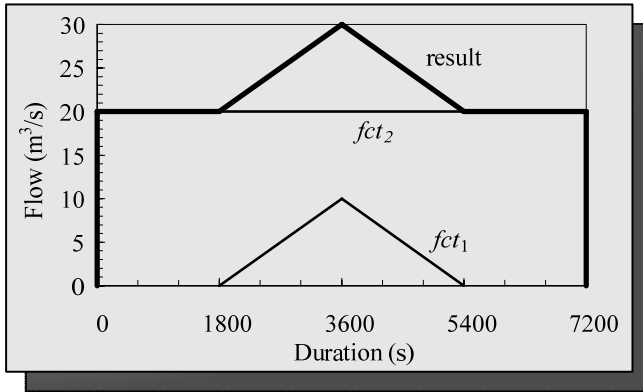


Figure 11 : Example of aggregation of a rectangular and a triangular hydrograph with no synchronized points

Storage of flow in reservoir

The transient evolution of a water volume \forall in a reservoir is described by the following retention equation:

$$\frac{d\forall}{dt} = Q_e - Q_s \quad (57)$$

with \forall : volume in the reservoir [m^3]; Q_e : inflow in the reservoir [m^3/s]; Q_s : outflow [m^3/s].

Usually, reservoirs are equipped with spillways depending on the water level in the reservoir. To solve *equation 57* it is necessary to know the outflow as a function of the water volume \forall in the reservoir. This operation is possible if relation between the water level and the water volume is known.

Equation 57 is an ordinary differential equation depending on time and volume. Knowing the initial water level (and hence the initial volume) in the reservoir, this equation is solved numerically by the Euler method of first order:

$$\forall^{n+1} = \forall^n + Q_e^n - Q_s^n \quad (58)$$

The information required are the « *Incoming hydrograph* », a « *Level-Volume* » relation, a « *Level-Outflow* » relation and an « *Initial level* ». The results obtained are the « *Outflow hydrograph* » and the « *Limnigraph* » of the reservoir, thus the temporary evolution of the reservoir level.

The computation of retention is easily solved by traditional numerical methods (*Figure 12*). This purely theoretical example shows the effect of the reservoir on flood routing due to retention as well as the influence of the initial reservoir level.

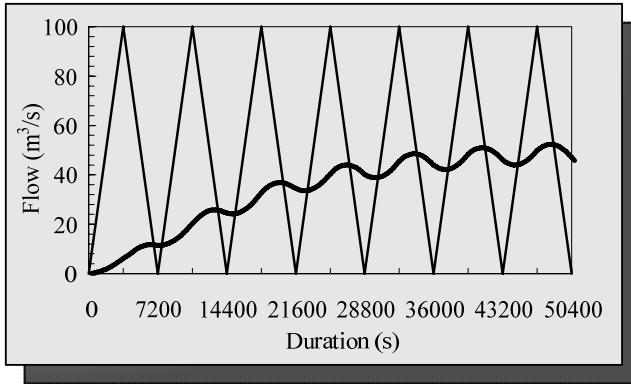


Figure 12: Example of a retention calculation. The inflow hydrograph is a succession of triangular floods. The outflow hydrograph is represented by a solid line. The calculation has been made with a rectangular reservoir of 500,000 m³ equipped with a standard lateral spillway of 10 m width.

Spillway

The outflow an evacuation device is calculated by the help of a « Level – Spill flow » relation. Hence, the spill flow is as follows:

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{vertido}}^n &= 0 && \text{if } H^n < H_1 \\
 Q_{\text{vertido}}^n &= Q_{\text{dev},i} + (H_{i+1} - H^n) \frac{Q_{\text{vert},i+1} - Q_{\text{vert},i}}{H_{i+1} - H_i} && \text{if } H_i < H^n < H_{i+1}
 \end{aligned} \quad (59)$$

with Q_{vertido}^n : spill flow at instant n [m³/s]; H^n : water level at instant n [m]; $Q_{\text{vert},i}$: spill flow for a water level H_i [m³/s]; H_i : reservoir water level [m].

Turbine / Pump

Linked to a « Temporary series » or a « Source », this object delivers or extracts a certain discharge to / from the associated reservoir at a given time increment:

$$Q_{\text{turbined / pumped}}^n = Q_{\text{source}}^n \quad (60)$$

with $Q_{\text{turbined/pumped}}^n$: turbined or pumped flow at instant n [m³/s]; Q_{source}^n : flow to turbine or pump at instant n in terms of time series [m³/s].

Sensor

This object can be linked to any other object. By the help of this object alarms can be activated when a certain value is exceeded in the associated object. The threshold values are to specify by user in the object « *Captor* »):

$$\begin{aligned} V_{Alarma}^n &= 0 & si \ V^n < V_{umbral,i} \\ V_{Alarma}^n &= 1 & si \ V^n \geq V_{umbral,i} \end{aligned} \quad (61)$$

with V_{alarm}^n : alarm value at instant n ; V^n : current value at instant n ; $V_{umbral,i}$: value of the threshold i .

Regulation / State

With this option a sub-model is created automatically. Inside this object several « *States* » can be created. The choice whether the state is active is carried out as a function of the activated alarms in the associated sensors.

A typical example of regulation is the implementation of a turbine / pump law as a function of the water level in the reservoir.

Inside every « *State* » several objects are introduced as a function of the demands (turbine, pump, diversion, etc) in the way that one or several inputs and one or several outputs are taken.

For example, a turbine (associated to a « *Temporary Series* » or « *Source* » object) can be included in each « *State* » for providing an outflow at the outlet of the reservoir.

It is also necessary to define an initial « *State* » to ensure the operation of the model. Thereafter, transitions between different « *States* » are done as a function of the alarms activated in the sensors:

$$\begin{aligned} E^n &= E_1 & si \ n = 0 \\ E^n &= E_i & si \ n > 0 \end{aligned} \quad (62)$$

with E^n : State defined at instant n ; E_i : State i defined as a function of the threshold values related to the sensors.

Virtual station

The object « *Station* » (which is associated with the coordinates X, Y, Z) allows the spatial distribution of the meteorological variables (precipitation, temperature, ETP) from available values of the data base « *Data Environment* ». This data base refers to a spatial reference in metric coordinates.

The method chosen for the spatial distribution of the precipitation and the temperature corresponds to the Shepard method. The evaluation of a variable X_s from n stations localized at $i=1,2,\dots,n$ is obtained by weighting according to the inverse square distance $d_{i,s}$ between the

station i of the data base and the calculation point s (virtual station). Typically, this refers to the gravity centre of a sub-catchment:

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (63)$$

$$X_s = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (64)$$

with x_i, y_i : position of the station i of the data base [m]; x_s, y_s : position of the virtual station s [m]; X_s : value of the studied variable in the virtual station s [U.I.]; X_i : value of the studied variable in the station i used of the data base (BD) [U.I.]; $d_{i,s}$: distance between the station i used of the BD and the virtual station [m].

This method has been extended to take into account the evolution of certain meteorological variables as a function of the altitude. Thus, variables X_i localized at the altitude z_i can be replaced by their equivalent X_i^* related to the sea level $z_0 = 0$ m a.s.l. according to a linear relation with a constant altimetric gradient dX_s/dz associated to the calculation point s :

$$X_i^* = X_i - \frac{dX_s}{dz} \cdot (z_i - z_0) \quad (65)$$

The result of the Shepard method at the sea level provides the equivalent X_s^* of the variable X_s which needs to be elevated to the altitude z_s of the calculation point as a function of the altimetric gradient:

$$X_s = X_s^* + \frac{dX_s}{dz} \cdot (z_s - z_0) \quad (66)$$

The n stations for the spatial interpolation in s are determined automatically respecting *equation 67*. Hence, the number n of stations is variable for every pair (s, r_s) :

$$d_{i,s} \leq r_s \quad (67)$$

Chapter 3

Recommendations for installation

The installation of *Routing System II* is carried out easily with the installation CD if the *Service Pack Microsoft .Net Framework* (free software) is installed on the computer.

This chapter presents the hardware and software requirements essential for the application of the program as well as the installation and un-installation procedure.

Content

- Hardware and software requirements
- Installation and uninstallation procedure

Hardware and software requirements

Before proceeding to the installation of *Routing System II*, necessary hardware and software have to be installed on the computer. To obtain a good performance of the program the values recommended are indicated in parenthesis. The program *Routing System II* runs on a computer having the following characteristics:

- Any IBM compatible computer equipped with a Pentium 1.0 or higher processor (recommended Pentium 2.4 or higher).
- Hard disk with more than 20 MB free space (100 MB or more recommended).
- CD ROM drive.
- 256 MB of RAM (512 or more recommended).
- A mouse.
- Colour VGA screen (resolution of 1024x768 with 65'536 colours recommended).
- Microsoft Windows 98, Windows NT4, 2000, XP or more recent.
- Microsoft .Net Framework Service Pack 1.1 or more recent.

Installation and uninstallation procedure

Since the program is only an executable folder called « *Routing System II* », the program can be launched directly from the CD or the hard disk. It does not exist any particular place where the program has to be localized and it can be displaced anywhere.

The un-installation of the program is simply done by deleting the folder « *Routing System II* ».

Chapter 4

Application of *Routing System II*

Based on the concept described in the previous chapters it is possible to create semi-distributed models by choosing in a coherent way firstly the objects of the model and secondly all necessary parameters and variables related to the state.

The object-oriented programming allows connecting different hydrological and hydraulic objects automatically. Junctions are introduced downstream of the catchments and connected with a river. Other objects such as reservoirs, hydroelectric power plants, spillways and turbines can also be introduced easily.

Content

- Menu bar
- Tool bar
- Line-up of objects

Menu bar

The « *Menu bar* » contains several commands. By clicking on them access to different options or functions of the program is given. The access can also be performed by typing *Alt +initial letter of each command*.

- File

-*New*: Deletion of the existing model in the graphic interface and creation of a new model.

-*Open...*: Opening of an existing model.

-*Save As...*: Saving of the model under a name defined by the user. The program creates a folder with the extension */.sim/*.

-*Save*: Saving of the modifications of the model which has been saved once or several times.

-*Data Environment...*: Opening of a control panel to load a data base.

-*Close*: Closing of the actual model without saving.

-*Exit*: Exit of the program.

- Edit

This menu is not yet implemented.

- Model

-*Edit as Object*: Opening of a control panel for the modification of values of the object of the sub-model currently selected in the graphic interface (description, logo, parameters, ...).

-*Save Sub Model as...*: Saving of sub-model currently selected in the graphic interface as sub-model.

- Solver

-*Solve*: Starting of the simulation.

-*Edit Solver*: Opening of the control panel for the modification of the start date of calculation (« *Data Start* »), finish date (« *Data End* »), time interval between calculations (« *Constant Time Step* ») and time interval between data storage (« *dt Save* »).

Tool bar

The functions of the tool bar are the same than those of the menu « *File* ». Besides, a help for the construction of the model is implemented.



Short-cut of *File* → *New*.



Short-cut of *File* → *Open*.



Short-cut of *File* → *Save*.



Tool for the selection of an object.



Tool for the connection of objects.



Tool for the connection of « *States* ». Here, the transitions for the « *Regulation* » programming are defined.



Visualization of the control panel of an object or a sub-model including their characteristics.



Return to the higher hierarchical model.



Deletion of the selected model.



Short-cut of *File* → *Data Environment*.

Line-up of objects

The objects available for the construction of the model are permanently visible on the screen (*Figure 13*):

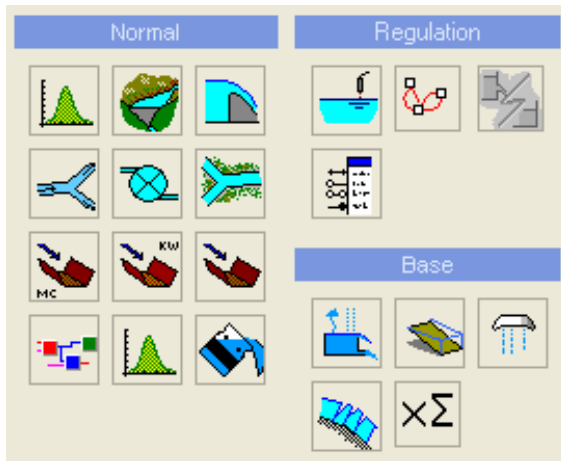


Figure 13 : *Line-up of objects*

Clicking once on an icon of the *Object* an object can be edited. Clicking two times on an object a new control panel opens (*Figure 14*):

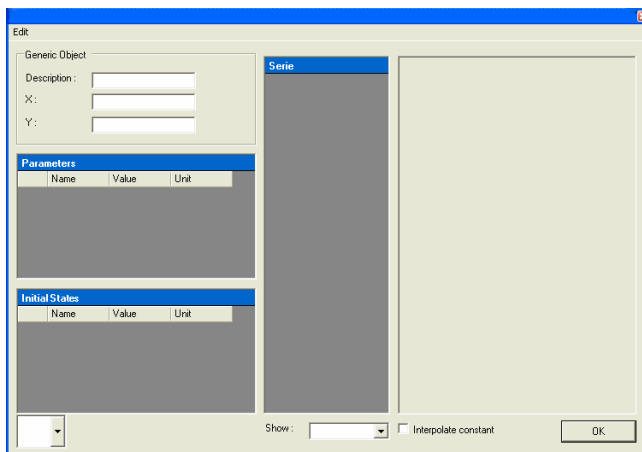


Figure 14: *General control panel of the objects*

In « *Generic Object* » the name of the object (« *Description* ») and its position in the graphic interface (« *X* », « *Y* ») can be modified. Other characteristics such as parameters, initial values or series of values can be modified as well.

Objects

As indicated, the program includes hydraulic and hydrological objects characterized by their hydraulic function. By combination these objects allow to define more complex functions which can be implemented in new sub-models.

Routing System II contains 21 objects. The most important characteristics are shown below:

Virtual station (upstream object)



The object « *Station* » allows the spatial discretization of the meteorological variables (precipitation, temperature, ETP) from the values available in the data base of the « *Data Environment* ». « *Station* » possesses a spatial referentiation in metric coordinates. The parameters which can be modified are:

- Real coordinates (« *X* », « *Y* » and « *Z* ») in m.
- Search radius (« *Search Radius* ») in m.
- Precipitation gradient (« *Gradient i* ») in mm/h/m.
- Temperature gradient (« *Gradient T* ») in °C/h/m.
- ETP gradient (« *Gradient ETP* ») in mm/h/m.
- Weighting coefficient for the precipitation (« *Coeff P* »).
- Weighting coefficient for the temperature (« *Coeff T* »).
- Weighting coefficient for the ETP (« *Coeff ETP* »).

The link between « *Data Environment* » and the object « *Station* » is not explicit and it is not represented by an arrow. However, the data base loaded in memory from the « *Data Environment* » is employed automatically.

Temporary series (upstream object)



In this object temporary series of flow, precipitation, temperature or ETP can be introduced directly. The time is incorporated in seconds and the associated values in their corresponding units in tabular form « *t(s) – parameter* ».

Reservoir



With this object reservoirs are created. Besides the relation « *Level - Volume* » and « *Initial level* » of the reservoir the initial reservoir level « *Hauteur initiale* » has to be introduced. It is recommended to introduce the levels of altitude in [m a.s.l.].

Spillway



With this object the spillways of the reservoirs are simulated. The relation « *Level - Discharge* » has to be introduced. It is recommended to introduce the levels of altitude in [m a.s.l.].

Channel reach

Here, several possibilities exist. It can be chosen between the method of Muskingum-Cunge, the cinematic wave or the St. Venant equations.



Muskingum-Cunge



Cinematic wave



St. Venant

For all of them the following parameters have to be specified:

- Bottom width of the cross section (« *BO* ») in m.
- Bank slope ($1V / mH$, « *m* ») in m.
- Bottom slope (« *J_o* »).
- Friction factor (« *K_s* ») in $m^{1/3}/s$.
- Length (« *L* ») in m.
- Initial flow (« *Q_{ini}* ») in m^3/s .

Turbine / Pump



Joined to a « *Temporary series* » or to a « *Source* », this object calculates the turbine flow / pump flow of one reservoir to a conversion, river channel or another reservoir.

Diversion



All hydraulic constructions of diversions share the same functionality: separation of flow. This function requires the relation « *Inflow-Outflow* » (the user has to perform a first calculation for the behaviour of the diversion device in order to establish this relation). With this information the function « *Diversion* » of *Routing System II* calculates the diverted hydrograph which continues straight on in the same direction.

Confluence



The function « *Confluence* » of *Routing System II* allows calculating the addition of different variables. Especially, it is able to add several hydrographs at one confluence.

Sub-model



All models or sub-models which have been saved as folders /.sim/ can be integrated as sub-models in the graphic interface.

Source (upstream object)



With this object temporary flow series of a database can be loaded (station with the same name is searched in the database) in terms of turbine flow, pump flow or directly as a measured flow.

Sensor



The object « *Captor* » contains several threshold values introduced by the user and activates an alarm once the threshold value is exceeded. It has to be connected to the object associated, e. g. a reservoir. It is used for the regulation. For example water levels in a reservoir can be measured in order to activate alarms as a function of the existing water levels.

Regulation



This object allows to load the graphic interface « *Regulation* ». In this interface the regulatory models are constructed.

State



In the « *Regulation* » several objects « *State* » can be included according to the schematic example presented in *Figure 15*. For each increment a different « *State* » is employed as a function of the activated alarms in the associated sensors.

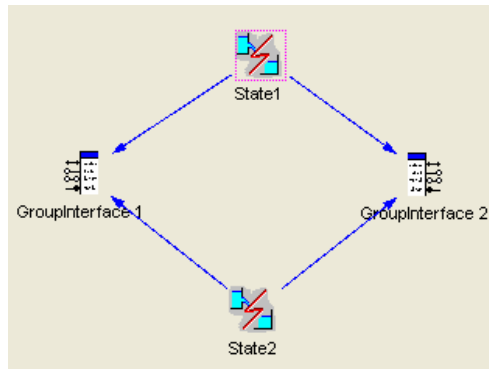


Figure 15 : *Regulation example with two « States »*

GroupInterface



This object is essential to assemble a sub- model with the upper hierarchical model or with another sub-model. It allows to transfer the input or output variables. For every sub-model created it is necessary to use an object « *Groupinterface* » to acquire directly the input values of another sub-model (or of the upper hierarchical model) and a second « *Groupinterface* » for the transfer of output values.

GR3 (infiltration)



This function of production determines the part of the gross rainfall which takes part in the runoff, thus transforming gross rainfall into net rainfall. The model called « *GR3* » is a

production function created from an infiltration tank. This model allows calculating at the same time the transformation of a gross rainfall into net rainfall, a base flow and a real evapotranspiration. The model «*GR3*» is particularly well adapted to the continuous hydrological simulations due to the fact that its infiltration capacity increases in periods without rain. Besides, it takes into account the evapotranspiration being essential for the establishment of the long-term water balance.

SWMM (runoff)



This transfer function allows calculating a hydrograph from a net rainfall. The model «*SWMM*» is a non-linear conceptual reservoir model resulting of the combination of an empirical friction law (Manning-Strickler) and the continuity equation. In this case the friction law represents the law for the emptying of the reservoir.

Snow



This object simulates the temporary evolution of the snow pack (accumulation and melt) based on the temperature (T) and on the precipitation (P). It produces an equivalent precipitation (P_{eq}) that is used as an input by the infiltration model or by the glacier model.

Glacier



The glacier model calculates a volume of melt flow in the linear snow and glacier reservoirs based on the gross rainfall or the equivalent precipitation, on the temperature and on the presence or not presence of snow on the glacier, hence producing as a result a total flow. Its performance is improved by a snow model installed upstream and connected to it.

Addition



The function «*Addition*» represents a multiplying coefficient for any variable. The function is integrated in the model downstream of an object and allows the composition of a time series by the multiple of another series.

Database

Routing System II works with an *Access* database. Its structure is presented in *Figure 16* with the following four tables:

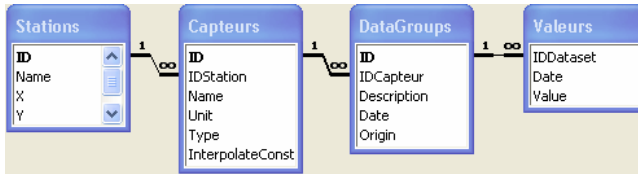


Figure 16 : Attributes and relations between the tables of the database *Access*

The procedure to construct a database consists in opening an empty *Access* database and creating the four tables with the relations shown. Thereafter, it is necessary to complete the tables with the desired values.

Table « *Stations* »: This is the main table in which the measurement stations and their coordinates are stored.

Table « *Sensors / Capteurs* »: The second table of the database represents the sensors with the measured parameters and their corresponding units.

Table « *DataGroup* »: This table contains the time of data recording, the data origin and any other meta-information.

Table « *Values* »: In the last table the temporary series <dates, value> of the measured variables are written.

Resuming, this database contains the source data of the hydrological calculation of *Routing System II*. In *Figure 17* an example of an *Access* database is presented.

| ID | Name | X | Y | Z |
|-----|--------------|--------|--------|------|
| + 1 | Simplon-Dorf | 647570 | 116130 | 1495 |
| + 2 | Brig | 642090 | 129920 | 671 |
| + 3 | Visp | 634125 | 126100 | 655 |
| + 4 | Ackersand | 633625 | 121100 | 700 |
| + 5 | Grächen | 630825 | 116030 | 1617 |
| - 6 | Zermatt | 624350 | 97550 | 1638 |

| ID | Name | Unit | Type | InterpolateConstant |
|-----|-------|------|------|-------------------------------------|
| - 7 | Pluie | mm/h | i | <input checked="" type="checkbox"/> |

| ID | Description | Date | Origin |
|--------|---------------------|----------|--------|
| - 7311 | Heure | 09:12:01 | SMA |
| | Date | Value | |
| | 03.10.1999 01:00:00 | 0 | |
| | 03.10.1999 02:00:00 | 0 | |
| | 03.10.1999 03:00:00 | 0 | |
| | 03.10.1999 04:00:00 | 0 | |
| | 03.10.1999 05:00:00 | 0.4 | |
| | 03.10.1999 06:00:00 | 0.3 | |
| | 03.10.1999 07:00:00 | 0.1 | |
| | 03.10.1999 08:00:00 | 0.1 | |
| | 03.10.1999 09:00:00 | 0.1 | |
| | 03.10.1999 10:00:00 | 0 | |
| | 03.10.1999 11:00:00 | 0.3 | |
| | 03.10.1999 12:00:00 | 0.1 | |
| | 03.10.1999 13:00:00 | 0.3 | |
| | 03.10.1999 14:00:00 | 0.9 | |

Record: 30 of 10992

Figure 17 : Example of an Access database with the 4 corresponding tables

Chapter 5

Working with *Routing System II*

The possibilities offered by *Routing System II* are numerous, being necessary to synthesize the stages of use of this tool. This chapter presents the basic functions of the program *Routing System II* in order to perform numerical simulations.

Contend

- Starting of the program
- Construction of a hydrological model
- Starting of a numeric simulation
- Visualization of results

Starting of the program



The program *Routing System II* appears in terms of an icon in the Windows environment. In order to open the program a double click on the icon *Routing System II* is sufficient. Thereafter, the main window appears on the screen (Figure 18).

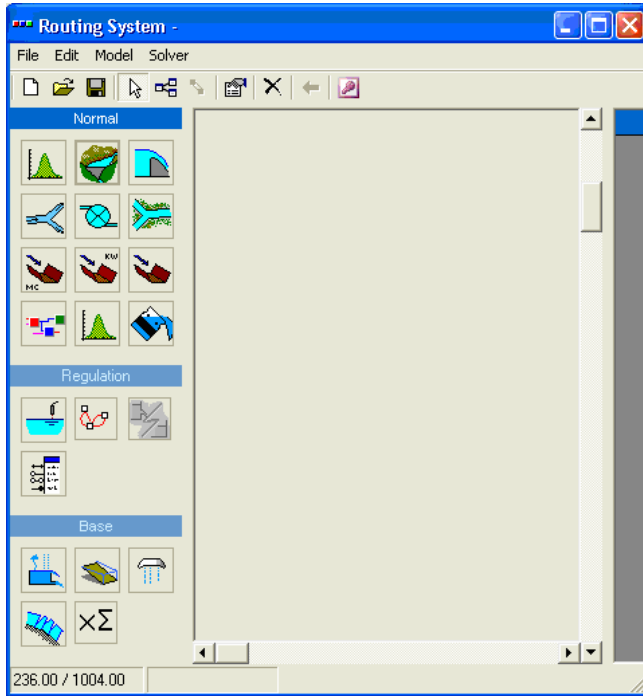


Figure 18: Main window of *Routing System II*

From this moment on, an existing model can be opened or a new model can be built.


Construction of a hydrological model

Creation of objects

For creating a new object a single click on the respective icon in “*Objects palette*” is required and the object will appear in the graphic interface. After its creation the object can be displaced manually according to a desired topology of the model.

Clicking twice on any existing object in the graphic interface a dialog box with the characteristics of this object is opened. It is here where changes of the values and associated parameters of the object are performed.


Link between objects

The connection between objects is easy. It is possible to click on the icon  in the “*Toolbar*” or to press the space bar. The arrow of the mouse is then transformed into a cross. Afterwards, a click from an object to the next one according to the sense of the flow to connect them is required. If no arrow appears the objects are not compatible and they cannot be connected directly.

The objects are joined from upstream to downstream and the program automatically validates the connection if the variables to transmit are compatible. Clicking twice on the arrow a dialog box with the characteristics of the transferred variable/s from an object to another object occurs. The characteristics can be deleted manually.

To switch from the *connection mode* to the *selection mode* the space bar has to be pressed.

Starting of a numerical simulation

Before carrying out a simulation it is necessary to open or construct a hydrological model (*Figure 19*). To open an existing model either the icon  has to be pressed or *File* → *Open...* has to be used to select the model desired.

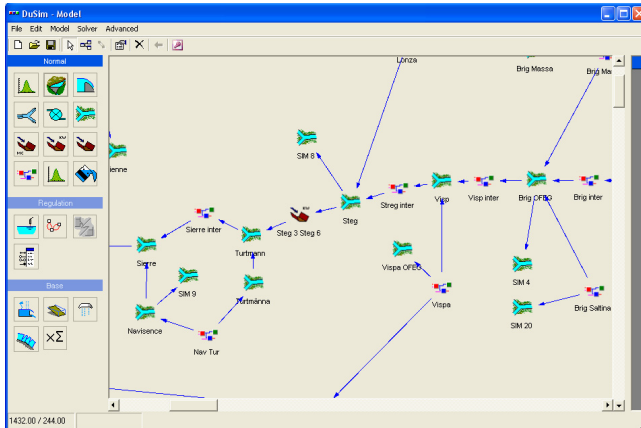



Figure 19 : Example of a hydrological model (Jordan, 2007)

If the objects “Station” or “Source” exist in a model it is necessary to load the data base where the values of the meteorological variables of the period to simulate are located.

To do so, it is sufficient clicking on  or in the Menu (*File* → *Data Environment...*) and thereafter loading the data base (BD) selecting *File* → *Open Access* in the dialog box.

After loading the data base the simulation period is chosen by clicking on the menu *Solver* → *Edit Solver*. Then, the following is introduced:

- Start date for the period (« *Data Start* »).
- Final date (« *Data End* »).
- Time interval between two consecutives calculations for which the variables are determined (« *Constant Time Step* »).
- Time step for which data is saved on the hard disk (« *dt Save* »).

In order to start the calculation the option *Solver* → *Solve* in the Menu has to be chosen.

Visualization of results

Once a simulation is finished, all variables (e. g. volumes, water levels in the reservoir, snow heights, etc) can be visualized by clicking twice on the corresponding object (Figure 20).

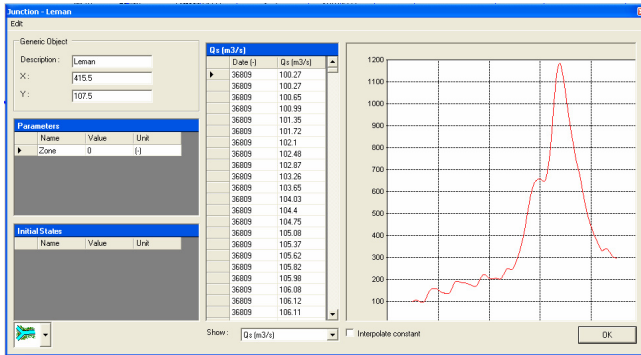


Figure 20 : *Example of a hydrograph*

If there is more than one variable calculated the option “*Show*” in the drop-down list has to be chosen to select the desired variable.

Chapter 6

Examples of application

In this chapter some examples of application are presented in order to deepen the knowledge of the program. These basic examples are designated to facilitate the learning of the program *Routing System II*. The examples are organized according to the degree of difficulty.

The use of *Routing System II* in case studies has demonstrated the capacity of the program to reproduce correctly the real behaviour of river basins. In addition, the program facilitates the search of different scenarios of operation while optimizing complex systems in a satisfactory way.

This chapter contains three examples with didactic aims.

Content

- Example 1- Transfer and transport
- Example 2- Production, transfer and transport
- Example 3- Construction of sub-models

Example 1 – Transfer and transport

In the first example the objective is to model the transfer of a net rain-flow on two impermeable surfaces, the transport of the hydrograph to the watercourse, the implementation of two inflows at a confluence and their final transport to the outlet represented by a lake (Figure 21).

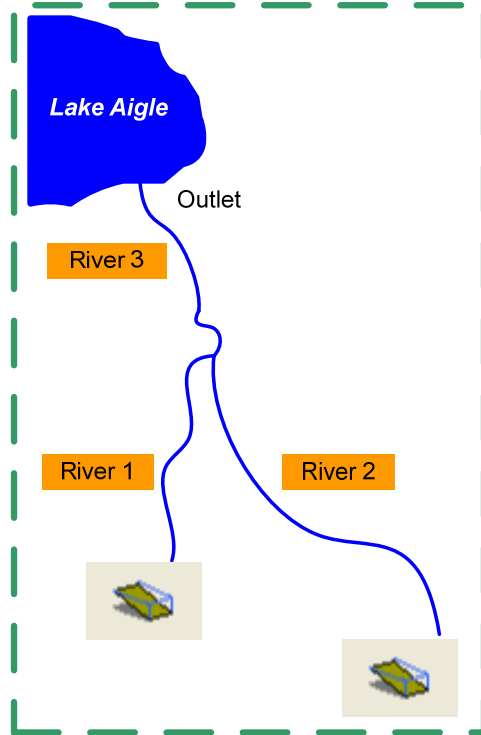


Figure 21 : Model scheme

The two impermeable surfaces are supposed to be located in the same region, thus receiving an identical precipitation. Each surface has its own outlet into different river which are joined later on in a single river before flowing into a lake. The parameters and the state variables of the two surfaces, of the three rivers and the data precipitation are provided in *Table 1*. The three rivers are modelled with the cinematic wave model.

Chapter 6 – Examples of application

The requested result is the hydrograph at the outlet of the model (point flowing to the lake) during 24 hours after the beginning of the precipitation.

Table 1 : Characteristics of the objects

Precipitation

| t(h) | rain (mm/h) |
|------|-------------|
| 0 | 0 |
| 1 | 1.08 |
| 2 | 1.44 |
| 3 | 1.80 |
| 4 | 2.88 |
| 5 | 5.40 |
| 6 | 8.28 |
| 7 | 9.97 |
| 8 | 6.84 |
| 9 | 5.04 |
| 10 | 3.24 |
| 11 | 2.63 |
| 12 | 1.44 |
| 13 | 0.72 |
| 14 | 0 |

SWMM 1

| Param. | Values | Units |
|---------|----------|---------------------|
| Surface | 1.00E+07 | m ² |
| Length | 1500 | m |
| JO | 0.1 | - |
| K | 1.9 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

SWMM 2

| Param. | Values | Units |
|--------|----------|---------------------|
| Área | 4.00E+06 | m ² |
| Length | 3000 | m |
| JO | 0.05 | - |
| K | 1.5 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

River 1

| Param. | Values | Units |
|--------|--------|---------------------|
| BO | 6 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 3000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

River 2


| Param. | Values | Units |
|--------|--------|---------------------|
| BO | 4 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.005 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 6000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

River 3

| Param. | Values | Units |
|--------|--------|---------------------|
| BO | 7 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |


Resolution of Example 1

This first example is a simplified representation of the reality. Despite that, it allows the familiarization with the concept of *Routing System II* and to get to know some of its hydraulic and hydrological objects.

At first, the object “*Temporary Series*”  is introduced. Clicking once on its icon in the *Objects palette* the object is created in the graphical interface. Clicking double on this object the associated dialog box is opened and the values “*time (s) - net precipitation (m/s)*” are introduced according to the units used by *Routing System II* (Figure 22).

| Serie | | |
|-------|----------|----------|
| | Time [s] | i [m/s] |
| ▶ | 0 | 0 |
| | 3600 | 3E-07 |
| | 7200 | 4E-07 |
| | 10800 | 5E-07 |
| | 14400 | 8E-07 |
| | 18000 | 1.5E-06 |
| | 21600 | 2.3E-06 |
| | 25200 | 2.77E-06 |
| | 28800 | 1.9E-06 |
| | 32400 | 1.4E-06 |
| | 36000 | 9E-07 |
| | 39600 | 7.3E-07 |
| | 43200 | 4E-07 |
| | 46800 | 2E-07 |
| | 50400 | 0 |

Figure 22 : Values of the “*Temporary series*”

Next, the two run-off surfaces are created by means of the object “*SWMM*” . For each of them the respective parameters are defined by double clicking on every object and introducing them by the help of their dialog boxes.



Thereafter, the three rivers are introduced by selecting the model “*Wave kinematics*” . It is necessary to click once on the desired icon in the *Objects palette* in order to create them and twice on the new object of the graphical interface to open their dialog boxes. The proposed parameters are presented in *Table 1* introducing the initial volume (Q_{INI}) for each river. The model built-up will be finished with the introduction of the two objects “*Confluence*” . The graphical interface at this stage is presented in *Figure 23*:



Figure 23 : Graphic interface of Routing System II with the new objects

After creating the new objects topological links or connections have to be established. To do so, it is sufficient to press once the space bar of the keyboard. The cursor presented as an arrow is transformed into a cross. Next, an arrow appears in the graphical interface by clicking from the object « *Temporary Series* » to the object « *SWMM 1* », thus creating a topological link. The others objects are connected in the same way (Figure 24). By double clicking on the arrows, the transfer of intensity between « *Temporary Series* » and the two run-off surfaces as well as the transfer of flow between all other objects from up- to downstream is verified (« *Transfer Up-Down* »).

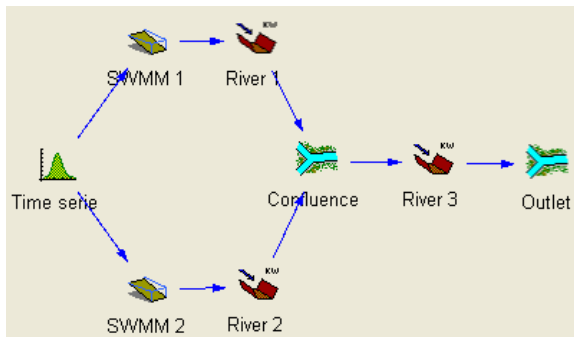


Figure 24 : Topologic links between the different objects from the model

The parameters of the simulation (dates) are modified in *Solver* → *Edit Solver* before the calculation. For « *Date Start* » and « *Date End* » an arbitrarily date is proposed. By choosing in « *Date End* » a time 24 hours later a simulation with a duration of 24 hours is obtained. Finally, the simulation is initiated by clicking on the button *Solver* → *Solve*.

In order to access the calculation results for each object it has to be clicked two times on any of them. For example, clicking double on the

object *Outlet*, its dialog box is opened and the simulated hydrograph is shown (Figure 25):

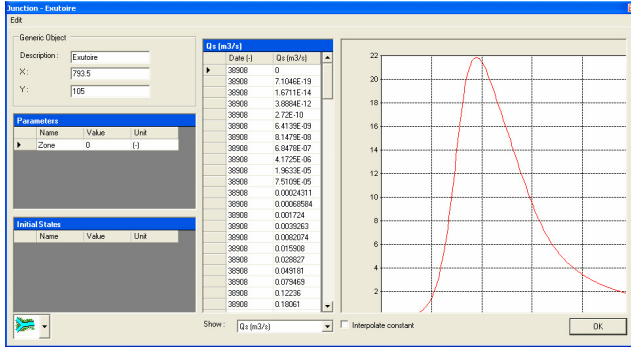


Figure 25 : Results of the simulation in the outlet of the model

The hydrograph at the outlet (Figure 26) shows an initial flattening of net precipitation due to the impermeable surfaces and a slighter flattening due to the rivers. The flattening related to the rivers is negligible because of the cinematic wave model. A treatment of the results is necessary to export the hydrographs to other programs (Excel or similar). That is easily done by clicking in the left superior corner of the table of results using the right button of the mouse and choosing the option « Copy ». Opening *Excel*, for example, the table can be copied with the well-known set of keys *Control+V*.

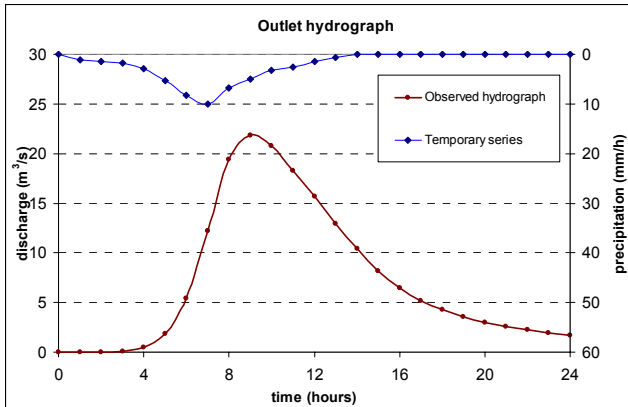


Figure 26 : Superposed net precipitation results and hydrograph at the outlet

Example 2 – Production, transfer and transport

The objective of *Example 2* is to create a hydrological model of production (snowmelt, glacier melt and infiltration), transfer and flow transport to calculate the discharge created on a catchments area based on given precipitations and temperatures. A hydrological model will be done with two catchment areas which flow into the same river. This model is represented in *Figure 27*.

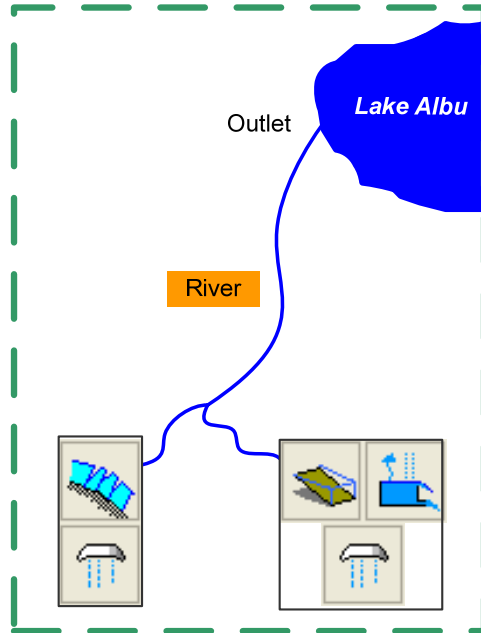


Figure 27 : Model scheme

The first subcatchment is composed of a snow model and a glacier model and the second of a snow model, an infiltration model and a surface run-off model. The two subcatchments flow into the same river which reaches the outlet.

The parameters of the objects are provided in *Table 2* and the precipitation and temperature data are in the data base « *BD Hour 2000* ».

The objective of this example is to determine the hydrograph in the outlet of the system during the period between the 04.03.2000 00.00h and the 15.03.2000 00.00h.

Chapter 6 – Examples of application

Table 2 : Characteristics of the objects

Station 1

| Parameters | Values | Units |
|------------|---------|-------|
| X | 606482 | m |
| Y | 92777 | m |
| Z | 3035 | m |
| Radio | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Station 2

| Parameters | Values | Units |
|------------|---------|-------|
| X | 602508 | m |
| Y | 110222 | m |
| Z | 1247 | m |
| Radio | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Snow model 1

| Parameters | Values | Units |
|------------|--------|----------------|
| An | 10 | mm/C/day |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m ² |
| Thetalni | 0 | (-) |

Snow model 2

| Parameters | Values | Units |
|------------|--------|----------|
| An | 10 | mm/C/day |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m |
| Thetalni | 0 | (-) |

Glacier

| Parameters | Values | Units |
|--------------|----------|-------------------|
| A | 4.00E+06 | m ² |
| AgI | 6 | mm/C/day |
| Kgl | 0.8 | (-) |
| Kn | 0.8 | (-) |
| Qini,glaciar | 0 | m ³ /s |
| Qini,nieve | 0 | m ³ /s |

GR3

| Parameters | Values | Units |
|------------|----------|----------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| hMax | 0.3 | m |
| K | 0.00025 | (-) |
| Hini | 0.2 | m |





SWMM

| Parameters | Values | Units |
|------------|----------|---------------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| L | 1000 | m |
| Jo | 0.1 | (-) |
| K | 2 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

River

| Parameters | Values | Units |
|------------|--------|---------------------|
| BO | 5 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Resolution of Example 2

First of all, the subcatchment with the snow model and the glacier model will be set up. The created objects are: « Station » , « Snow » , « Glacier »  and « Junction »  (Figure 28). After that, the parameters associated to each one are introduced and the objects connected in the following way:

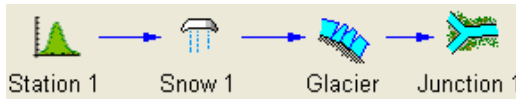


Figure 28 : Topologic links between the different objects

The relations created between the objects are visualized by double clicking on each arrow (Figure 29):

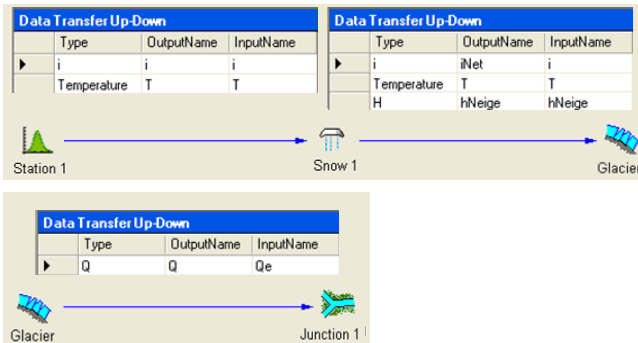







Figure 29 : Relations between the objects

Secondly, subcatchment with the snow model, the infiltration model and the surface run-off model are built. For its accomplishment, created objects are: « Station » , « Snow » , « GR3 » , « SWMM »  and « Junction » , introducing the parameters associated to each object and connecting them according to Figure 30:

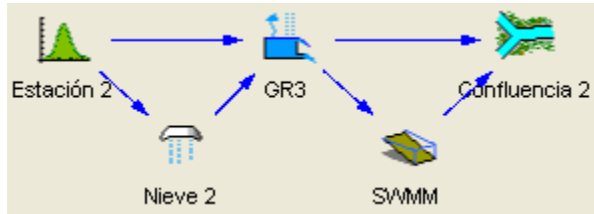


Figure 30 : Topologic links between the different objects

The characteristics of the relations created in this case are (Figure 31):

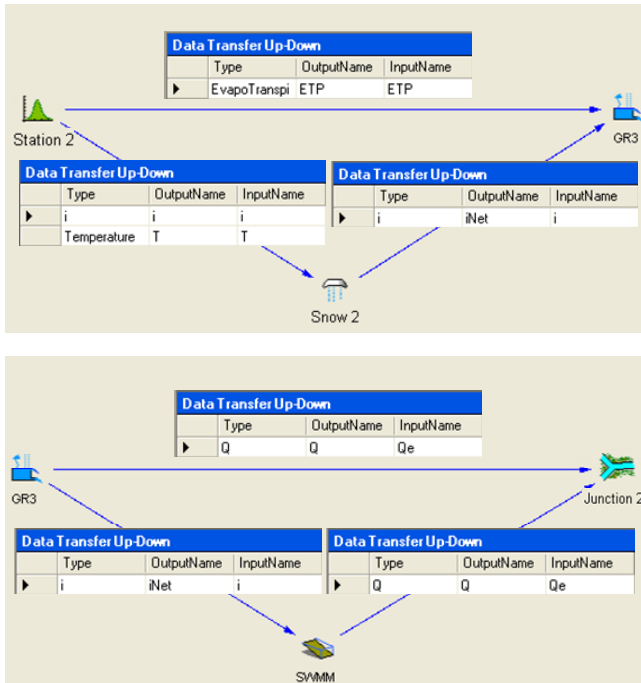




Figure 31 : Relations between the objects

Objects « Watercourse »  (kinematics wave) and « Confluence »  are added before rearranging and connecting all the objects according to Figure 32:

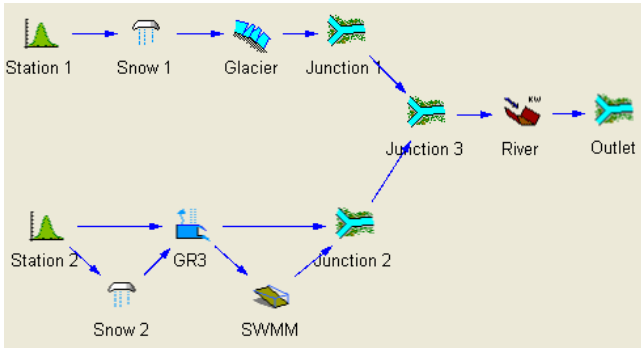



Figure 32 : Topology of the model of production, transfer and transport

The last created relations between upstream and downstream of the «Watercourse » allow the discharge transfer.

Constructed model are saved clicking in the menu *File* → *Save As...* with the name of “*Example 2*”. This way the model could be loaded later to do new simulations.

Before starting the calculation, the dialog box of the data base is opened clicking in  or by means of the menu *File* → *Data Environment* for, next, loading the corresponding file from the menu *File* → *Open Access*. The last step is to determine the parameters of the simulation in the menu *Solver* → *Edit Solver*, where the dates indicated in the wording of the example are chosen. At this moment it is possible to initiate the simulation clicking in the button *Solver* → *Solve*.

Once finished the calculation, the hydrograph in the outlet of the system, among others, can be seen (*Figure 33*). The results can be stored saving again the model (*File* → *Save*).

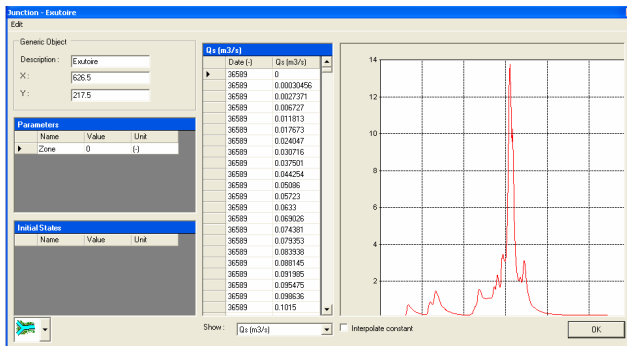


Figure 33 : Hydrograph in the outlet of the system

Example 3 – Constructions of the sub-models

In this example, the objective is to discover the potential of *Routing System II* for the hierarchical structure of the components of a more complicated catchment. The model consists of two submodels (subcatchments) connected to two rivers which flow in a last river before arriving at a lake. In a river, a hydropower scheme will be built (Figure 34).

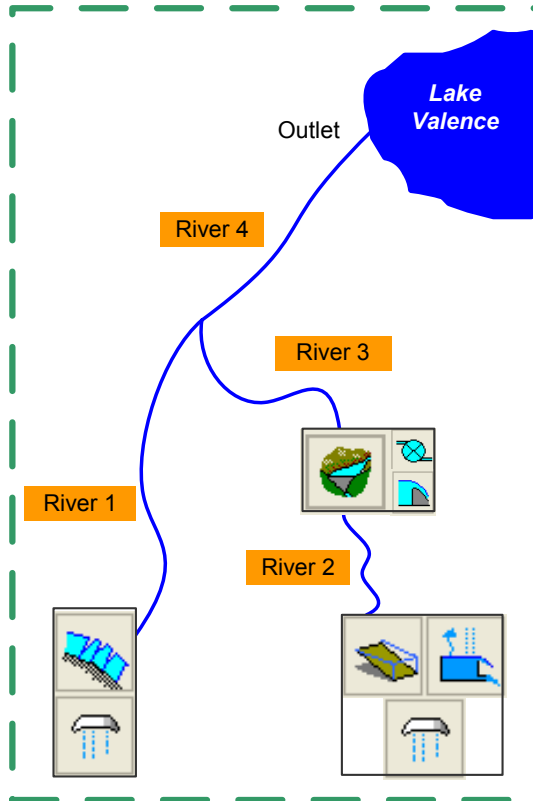


Figure 34 : Model scheme

The first submodel is a subcatchment composed of a snow model and a glacier model, connected to *River 1* downstream.

The second submodel is a subcatchment composed of a snow model, an infiltration model and a surface run-off model. Discharge of the subcatchment flows to the *River 2*, where a reservoir, a turbine and a spillway are built. Downstream, *River 3* is introduced.

Both channels are united to the *River 4*, which flows until the outlet of the model.

All the parameters of the different objects are provided in *Table 3*. The temperature and precipitation data are in the data base « *BD Hour 2000* ».

The wanted result for this example is the hydrographs in the outlet of the two subcatchments, in the spillway and in the outlet of the model for the period between the 04.03.2000 00.00h and the 15.03.2000 00.00h.

Table 3 : *Characteristics of the objects*

Station 1

| Parameters | Values | Units |
|------------|---------|-------|
| X | 606482 | m |
| Y | 92777 | m |
| Z | 3035 | m |
| Radio | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Station 2

| Parám. | Values | Units |
|-----------|---------|-------|
| X | 602508 | m |
| Y | 110222 | m |
| Z | 1247 | m |
| Radio | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Snow model 1

| Parameters | Values | Units |
|------------|--------|----------|
| An | 10 | mm/C/day |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hIni | 0 | m |
| Thetalni | 0 | (-) |

Snow model 2

| Parameters | Values | Units |
|------------|--------|----------|
| An | 10 | mm/C/day |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hIni | 0 | m |
| Thetalni | 0 | (-) |

Glacier

| Parameters | Values | Units |
|--------------------------|----------|-------------------|
| A | 4.00E+06 | m ² |
| A _{gl} | 6 | mm/C/day |
| K _{gl} | 0.8 | (-) |
| K _n | 0.8 | (-) |
| Q _{ini,glacier} | 0 | m ³ /s |
| Q _{ini,snow} | 0 | m ³ /s |

GR3

| Parameters | Values | Units |
|------------------|----------|----------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| H _{Max} | 0.3 | m |
| K | 0.00025 | (-) |
| H _{ini} | 0.2 | m |

SWMM

| Parameters | Values | Units |
|------------|----------|---------------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| L | 1000 | m |
| Jo | 0.1 | (-) |
| K | 2 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

Chapter 6 – Examples of application

Reservoir

| Parameters | Values | Units |
|------------|--------|-------|
| hini | 1435.5 | m |

| H (m a.s.l.) | V (m ³) |
|--------------|---------------------|
| 1360 | 0 |
| 1380 | 1.10E+06 |
| 1400 | 2.90E+06 |
| 1420 | 5.50E+06 |
| 1440 | 9.00E+06 |

Spillway

| H (m a.s.l.) | Q (m ³ /s) |
|--------------|-----------------------|
| 1436 | 0 |
| 1437 | 5 |
| 1438 | 25 |
| 1439 | 100 |
| 1440 | 250 |

Turbine temp. series

| Time (s) | Q (m ³ /s) |
|----------|-----------------------|
| 0 | 1 |
| 3.00E+06 | 1 |

River 1

| Parameters | Values | Units |
|------------------|--------|---------------------|
| BO | 5 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Q _{ini} | 0 | m ³ /s |

River 2

| Parameters | Values | Units |
|------------------|--------|---------------------|
| BO | 25 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Q _{ini} | 0 | m ³ /s |

River 3

| Parameters | Values | Unid. |
|------------------|--------|---------------------|
| BO | 25 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 4000 | m |
| Q _{ini} | 0 | m ³ /s |

River 4

| Parameters | Values | Units |
|------------------|--------|---------------------|
| BO | 30 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Q _{ini} | 0 | m ³ /s |

Resolution of Example 3

- Creation of the first sub-model






In the first place, the subcatchment with the snow and glacier models is constructed. The created objects are: « Station » , « Snow » , « Glacier » , « Junction » , and « GroupInterface » , each one to complete with its parameters. Later, the different objects are connected as follows (Figure 35):



Figure 35 : Topologic links between the different objects

The created relations can be visualized by double clicking on each arrow (Figure 36):

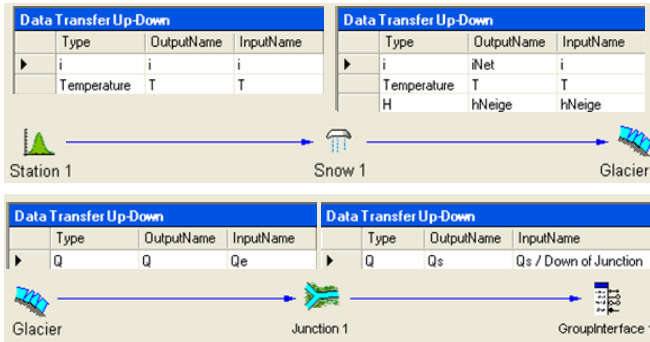







Figure 36 : Relations between the objects

All the relations are created automatically except for the relations with « GroupInterface » where the suitable parameter must be selected (discharge) of the pull-down menu which appears when doing the connection.

Next, the subcatchment is saved like submodel by means of the menu *Model* → *Save Sub Model as...*, with the name of “SB glac band”. In this way, it will be possible to recover it later. After it, the model of the graphical interface are erased by means of the icon « New model » , being in disposition to construct our second submodel.

- Creation of the second submodel

The second submodel contains another submodel which will be done in first place. It is a submodel composed of the infiltration and run-off model. For constructing it, objects « GR3 » , « SWMM » , « Junction » , and « GroupInterface »  twice are selected, connecting them according to Figure 37:

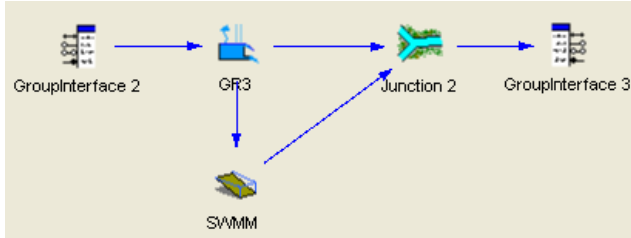


Figure 37 : Topologic unions between the different objects

The created relations are (Figure 38):

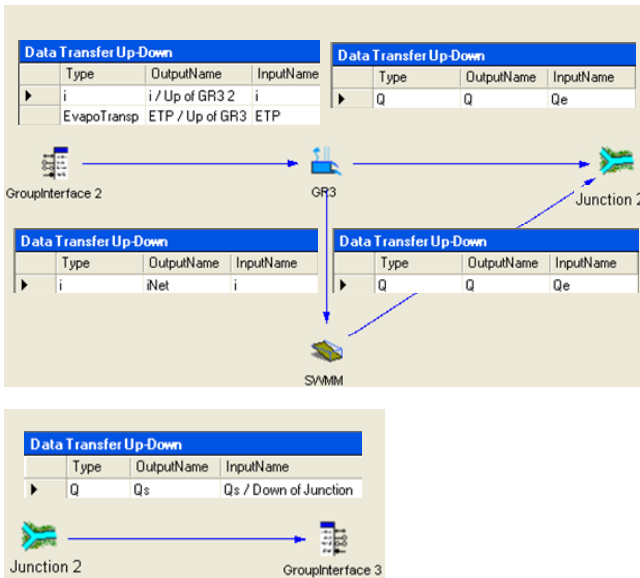










Figure 38: Relations between the objects

This submodel is saved thanks to the menu *Model* → *Save Sub Model as...*, with the name of “SBMod”.

Now it is possible to construct the second subcatchment erasing another time the content of the graphical interface with the button « *New model* » . The objects to created this time are: « *Station* » , « *Snow* » , « *Junction* » , « *GroupInterface* »  and « *Submodel* » . Clicking on this last icon, a dialog box is opened. Here the last constructed model (“*SBMod*”) is loaded. For representing this new object in a correct way, some of its characteristics can be modified immediately double clicking in the object and selecting the option of the menu *Model* → *Edit as Object*. In this way, a dialog box is opened. Using the pull-down menu located in the left inferior corner, the general icon of submodel can be changed by . To return to the preceding hierarchic level it is sufficient clicking the button « *Return at the superior hierarchic level* » .

Now the objects are connected among them the following way (Figure 39):

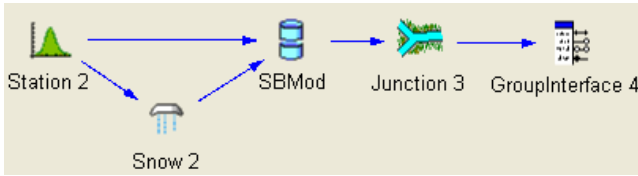


Figure 39: Topological connections between the different objects

The necessary relations are as follows (Figure 40):

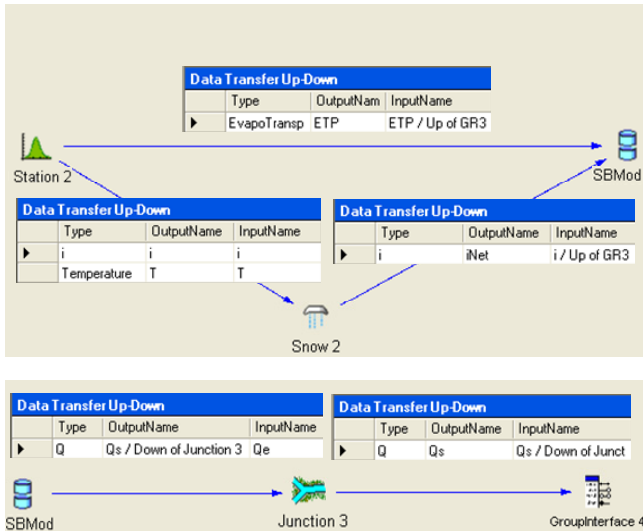










Figure 40: Relations between the objects

This subcatchment is saved like submodel with the menu *Model* → *Save Sub Model as...* with the name of “*SB no-glac band*”. The graphical interface are erased another time with the icon « *New model* » .

- Creation of the final model

All the elements are finally reunited to construct the complete model with the two subcatchments (Figure 41). First of all, the two subcatchments constructed precedingly (“*SB glac band*” and “*SB no-glac band*”) are imported thanks to the icon « *Submodel* » of the *Objects palette*, modifying the form of the icon () as seen previously.

In addition, objects « *Reservoir* » , « *Spillway* » , « *Turbine* » , « *Temporary series* » , « *Watercourse* »  4 times and « *Junction* » 9 times  are added, each one with its corresponding parameters.

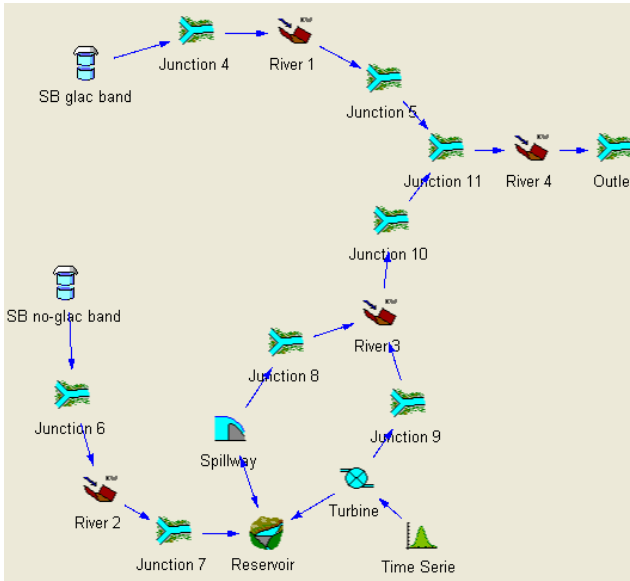


Figure 41: Image of the complete model of Example 3

The new relations are discharge transfer type, created done automatically during the connection of the objects. The exceptions are transfers between the reservoir and the spillway and between the reservoir and the turbine, which, anyway, are automatically created during the connection of the reservoir towards the other two objects as done habitually, according to the sense of the flow (Figure 42).

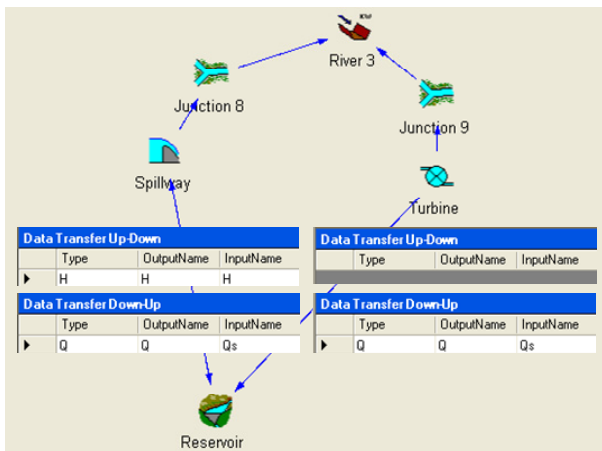


Figure 42 : Relations between the objects

Bibliography

Bérod, D. (1994). Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes. Apport de la description géomorphologique pour la simulation des processus d'écoulement, Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

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.

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.

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., Boillat, J.L. (2000). Routing System: Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre. Ed. Dr A. Schleiss.

Hamdi, Y., Hingray, B., and Musy, A. (2003). Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°1 volet B : Modélisation hydrologique, Technical report, EPFL.

Hamdi, Y., Hingray, B., and Musy, A. (2005). Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°3 volet B : Modélisation hydrologique, Technical report, EPFL.

Jordan, F. (2007). *Modèle de prévision et de gestion des crues - optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue*, Ph.D. Thesis N°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

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.

Bibliography

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.

Schäfli, B., Hingray, B., Niggli, M. and Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2: 73-117.

Communication 32

Routing System II **Modelización de flujos en sistemas hidráulicos**

Javier García Hernández
Frédéric Jordan
Jérôme Dubois
Jean-Louis Boillat

PREFACIO

La modelización hidrológica es indispensable para el ingeniero encargado de la planificación de aprovechamientos hidráulicos y de las medidas de protección contra las crecidas. No obstante, el control de cuencas vertientes complejas requiere una tecnología adecuada para permitir la simulación de los distintos procesos en cuestión. En marzo de 2000, el LCH-EPFL respondía a esta demanda organizando un taller de formación para la transferencia del programa informático *Routing System* desarrollado en el entorno LabVIEW.

Una nueva versión mejorada de este programa, bautizada como *Routing System II*, está ahora disponible en lenguaje VB.net para simular la producción y la tránsito de caudales en una cuenca vertiente. También efectúa los cálculos de espacialización de las variables meteorológicas y de la formación de los flujos, así como del tránsito de los mismos en los cursos de agua y al paso de los aprovechamientos hidráulicos.

Esta nueva versión del programa se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación MINERVE, con el objetivo de la previsión de crecidas sobre una cuenca vertiente con multitud de aprovechamientos hidráulicos. *Routing System II* es un modelo determinista con base física que calcula la producción y la transferencia lluvia-caudal integrando la influencia de las obras hidráulicas. También permite una gestión de las existencias de nieve e hielo basada en la temperatura y las precipitaciones.

En la presente comunicación, J. García Hernández, F. Jordan, J. Dubois y J-L Boillat han reunido toda la información útil para la comprensión y la utilización de este programa informático.

Agradecemos a la Oficina federal de medio ambiente y al Servicio de carreteras y cursos de agua del Cantón de Valais el apoyo financiero aportado a este proyecto.

Prof. Dr Anton Schleiss

Índice

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| CONCEPTO GENERAL DE <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 5 |
| RESEÑA SOBRE LAS POSIBILIDADES DEL PROGRAMA | 5 |
| <i>Interfaz de usuario</i> | 5 |
| <i>Simulación de sistemas hidráulicos</i> | 5 |
| PLANNING DEL MANUAL | 6 |
| ASPECTOS TEÓRICOS | 7 |
| CONCEPTO DE MODELIZACIÓN | 8 |
| FUNCIONES ASOCIADAS A LOS OBJETOS | 8 |
| <i>Producción – Modelo de nieve</i> | 8 |
| <i>Producción – Modelo de infiltración GR3</i> | 10 |
| <i>Producción – Modelo glaciar</i> | 12 |
| <i>Transferencia – Modelo de escorrentía superficial SWMM</i> | 14 |
| <i>Transporte en un curso de agua</i> | 15 |
| <i>Modelo GSM – Socont</i> | 20 |
| <i>Separación de caudales</i> | 23 |
| <i>Agregación de caudales</i> | 24 |
| <i>Almacenamiento en un embalse de retención</i> | 25 |
| <i>Vertedero</i> | 26 |
| <i>Turbina / Bomba</i> | 26 |
| <i>Captor</i> | 27 |
| <i>Regulación / Estado</i> | 27 |
| <i>Estación virtual</i> | 27 |
| RECOMENDACIONES DE INSTALACIÓN | 29 |
| REQUISITOS DE HARDWARE Y SOFTWARE | 30 |
| PROCEDIMIENTO DE INSTALACIÓN Y DESINSTALACIÓN | 30 |
| UTILIZACIÓN DE <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 31 |
| BARRA DE MENÚ | 32 |
| BARRA DE HERRAMIENTAS | 33 |
| PALETA DE OBJETOS | 34 |
| <i>Objetos</i> | 35 |
| BASES DE DATOS | 40 |
| TRABAJAR CON <i>ROUTING SYSTEM II</i> | 42 |
| ARRANQUE DEL PROGRAMA | 43 |
| CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO | 44 |
| <i>Creación de objetos</i> | 44 |
| <i>Unión entre objetos</i> | 44 |

Capítulo 1 - Introducción

| | |
|--|-----------|
| INICIO DE UNA SIMULACIÓN NUMÉRICA | 44 |
| VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS | 45 |
| EJEMPLOS DE APLICACIÓN | 47 |
| EJEMPLO 1 – TRANSFERENCIA Y TRANSPORTE | 48 |
| <i>Resolución del Ejemplo 1</i> | 50 |
| EJEMPLO 2 – PRODUCCIÓN, TRANSFERENCIA Y TRANSPORTE | 53 |
| <i>Resolución del Ejemplo 2</i> | 55 |
| EJEMPLO 3 – CONSTRUCCIÓN DE SUBMODELOS | 58 |
| <i>Resolución del Ejemplo 3</i> | 61 |
| BIBLIOGRAFÍA | 69 |

Capítulo 1

Introducción

Los aprovechamientos hidroeléctricos, en particular aquellos que pueden llegar a proteger contra las crecidas, llegan a ser cada vez más complejos debido a las exigencias actuales relativas a su funcionamiento y a su integración con el medio ambiente (Boillat y al., 2000). Para la planificación y la gestión óptima de estos sistemas hidráulicos, ciertas herramientas capaces de ofrecer buenos resultados son indispensables para proporcionar una visión global y realizar un análisis de las interacciones entre los diversos elementos de la red hidráulica.

El programa *Routing System II* ha sido desarrollado por Jérôme Dubois en el seno del *Laboratorio de Construcciones Hidráulicas* (LCH) de la *Escuela Politécnica Federal de Lausanne* (EPFL). Este programa ha sido creado para simular la formación y el transporte de flujos en lámina libre, permitiendo la modelización hidráulica e hidrológica según un esquema conceptual semidistribuido derivado de una programación orientada a objetos. Este programa tiene en cuenta tanto los procesos hidrológicos particulares (fusión de nieve y fusión glaciaria, flujos superficiales y flujos subterráneos debidos a la infiltración), como la modelización de ciertos elementos hidráulicos (por ejemplo compuertas, aliviaderos de crecidas, derivaciones, confluencias, turbinas y bombas). El lenguaje de programación utilizado para su realización ha sido VB.Net, adecuado para la programación orientada a objetos.

El principio del programa *Routing System II* reside en asociar una función hidráulica a cada objeto, representado por un icono, y unirlos posteriormente y de forma manual según una tipología definida por el usuario.

El análisis global de una red hidráulica es indispensable en numerosos casos como por ejemplo el dimensionamiento y la regulación del vertedero de una presa, o incluso para el desarrollo y la optimización del concepto de protección contra avenidas. *Routing System II*, asociado a su motor numérico VB.Net, facilita este análisis gracias a una interfaz de fácil utilización y a una arquitectura completamente abierta a nuevos desarrollos.

El programa *Routing System II* está destinado a remplazar la versión inicial de *Routing System*, desarrollada en un entorno LabVIEW (Dubois, Boillat, 2000).

Contenido

- Concepto general de *Routing System II*
- Reseña sobre las posibilidades del programa
- Planning del manual

Concepto general de *Routing System II*

Routing System II, escrito en lenguaje Visual Basic .Net, es un programa que utiliza la programación orientada a objetos y que ha sido desarrollado para realizar simulaciones hidráulicas en sistemas complejos constituidos de un conjunto de subcuencas, de derivaciones, de confluencias, de embalses, de galerías y otras obras hidráulicas, con flujos de agua en lámina libre.

Los objetos son descritos por la función hidráulica que ejercen en el seno del sistema. La descripción de la red se efectúa fundamentalmente con la ayuda de seis funciones de base: la generación, el transporte del flujo, el almacenamiento, la derivación, la agregación y la regulación de caudales. Estas funciones, representadas por iconos, pueden ser unidas libremente sobre la interfaz gráfica con ayuda del ratón, produciéndose de esta manera el intercambio de datos entre las diversas funciones.

Este acercamiento permite la modelización de sistemas con una tipología compleja, así como también el análisis a escalas diferentes por agregación de subsistemas.

Reseña sobre las posibilidades del programa

Interfaz de usuario

Empleado como un programa ejecutable estándar, *Routing System II* ofrece el confort de una interfaz gráfica moderna. Esta interfaz permite la creación de un modelo hidrológico y su simulación numérica. Un esfuerzo particular ha sido realizado para una buena visualización gráfica de todos los datos y resultados con referencia temporal, funcionalidad indispensable para la verificación del modelo de cálculo y el análisis de resultados.

Como interfaz, *Routing System II* propone todos los estándares como la *Barra de menú*, la *Barra de herramientas* y la *Paleta de objetos*.

Simulación de sistemas hidráulicos

La simulación de la producción y el transporte del flujo producido en los diversos modelos se efectúan por la resolución de diferentes ecuaciones presentadas para cada objeto en el siguiente capítulo.

Planning del manual

El manual del usuario es el elemento principal de la documentación que acompaña al programa *Routing System II*, organizándose de la siguiente manera:

- El capítulo 1 ofrece una introducción al concepto y a las funcionalidades del programa *Routing System II*.
- El capítulo 2 presenta un repaso general de los aspectos teóricos.
- Los capítulos 3 y 4 contienen las instrucciones sobre el hardware y el software necesarios, el proceso de instalación del programa, así como los diferentes menús existentes, las opciones y los objetos presentes en *Routing System II*.
- Los capítulos 5 et 6 describen como trabajar con *Routing System II* y muestran algunos ejemplos de aplicación.

Capítulo 2

Aspectos teóricos

En cuencas vertientes con una gran complejidad morfológica se producen un gran número de procesos hidrológicos. En regiones de montaña, la presencia de nieve y de glaciares tiene una gran influencia en la respuesta hidrológica de la cuenca vertiente. Por lo tanto, a parte de la infiltración y el flujo superficial, también consideraremos la fusión de la nieve y de los glaciares. Además, las posibilidades de almacenamiento en los embalses, los aliviaderos, los turbinajes y bombeos, el transporte en los cursos de agua, las derivaciones y las confluencias deben ser creadas y unidas entre ellas para permitir el flujo de información en un sentido adecuado.

Todas las obras hidráulicas son descritas por su función hidráulica con la ayuda de seis funciones de base (generación, transporte, almacenamiento, derivación, agregación y regulación).

Los modelos hidrológicos Nieve, Glaciar, GR3, SWMM y GSM-Socont han sido desarrollados dentro del marco de diferentes proyectos de investigación, entre los que destacan los proyectos CRUEX¹ (Bérod, 1994), SWURVE² (Schäfli y al., 2003 y 2005) y MINERVE³ (Hamdi y al., 2005).

Contenido

- Concepto de modelización
- Funciones asociadas a cada objeto

¹ Proyecto CRUEX: modelización de crecidas extremas en las cuencas vertientes alpinas

² Proyecto SWURVE: estudio de la influencia de los cambios climáticos en las cuencas vertientes alpinas

³ Proyecto MINERVE: modelo de previsión y de gestión de crecidas por operaciones preventivas en los aprovechamientos hidráulicos

Concepto de modelización

Dentro del concepto de modelización, todo son funciones. Las cuencas vertientes son una función de producción, las derivaciones una función de repartición de caudal, los cursos de agua una función de transporte, los lagos y las cuencas almacenan, las confluencias agregan,...

Los datos que circulan por el sistema son igualmente funciones como por ejemplo los hidrogramas, los limnigramas, las relaciones altura-caudal, altura-volumen, caudal de entrada-caudal de derivación,... Finalmente resulta una representación descriptiva donde el comportamiento hidráulico es considerado haciendo una abstracción de la estructura orgánica de las obras modelizadas.

Estas consideraciones pueden sorprender por el esfuerzo de abstracción que requieren pero, no obstante, se encuentran dentro de las simplificaciones adecuadas en la modelización de sistemas complejos y lectores y usuarios no tardarán mucho en tomar consciencia.

Funciones asociadas a los objetos

Producción – Modelo de nieve

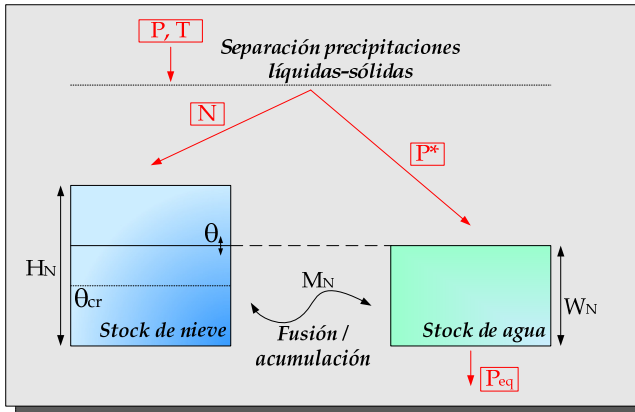


Figura 1: Modelo de nieve

El modelo de nieve (Figura 1) se compone de dos submodelos que simulan la evolución temporal del stock de nieve (acumulación y

fusión) en función de la temperatura (T) y la precipitación (P), produciendo una precipitación equivalente (P_{eq}) que puede ser utilizada como entrada por el modelo de infiltración o por el modelo glaciario.

En un primer momento, la precipitación se divide en precipitación sólida (N) y en precipitación líquida (P^*) en función de la temperatura (*ecuaciones 1 a 3*):

$$P^* = \alpha \cdot P \quad (1)$$

$$N = (1 - \alpha) \cdot P \quad (2)$$

con P^* : precipitación líquida [m/s]; α : factor de separación; P : precipitación [m/s]; N : precipitación sólida [m/s].

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 && \text{si } T < T_{cp1} \\ \alpha &= (T - T_{cp1}) / (T_{cp2} - T_{cp1}) && \text{si } T_{cp1} < T < T_{cp2} \\ \alpha &= 1 && \text{si } T > T_{cp2} \end{aligned} \quad (3)$$

con T : temperatura [°C]; T_{cp1} : temperatura crítica mínima para la precipitación líquida [°C]; T_{cp2} : temperatura crítica máxima para la precipitación sólida [°C].

Cuando la temperatura observada es inferior a T_{cp1} únicamente se produce la precipitación sólida; cuando es superior a T_{cp2} , sólo la precipitación líquida. Si la temperatura observada se encuentra entre los dos valores críticos se produce tanto precipitación líquida como sólida. La precipitación sólida (N) se utiliza como entrada del stock de nieve, variando su contenido en función de la fusión o la acumulación. El cálculo para la fusión de nieve es el siguiente:

$$\begin{aligned} M_N &= A_n \cdot (1 + b_p \cdot P^*) \cdot (T - T_{cr}) && \text{si } T > T_{cr} \\ M_N &= A_n \cdot (T - T_{cr}) && \text{si } T \leq T_{cr} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} dH_N / dt &= N - M_N \\ M_N &\leq N + H_N / dt \\ M_N &\geq -W_N / dt \end{aligned} \quad (5)$$

con M_N : fusión o acumulación de la nieve [m/s]; A_n : coeficiente grado-día [m/s/°C]; b_p : coeficiente de fusión de la precipitación [s/m]; T_{cr} : temperatura crítica de fusión de nieve [°C]; H_N : altura de nieve [m]; W_N : altura de agua [m]; dt: intervalo de tiempo [s].

La resolución de la *ecuación diferencial 5* según Euler (primer orden) se realiza según el esquema siguiente:

$$H_N^{n+1} = H_N^n + (N^n - M_N^n) \cdot \Delta t \quad (6)$$

con los índices n y $n+1$ representando el instante temporal; Δt : intervalo de tiempo [s].

La precipitación equivalente (P_{eq}) se produce por el contenido en agua de la nieve (ecuaciones 7 y 9):

$$\theta = W_N / H_N \quad (7)$$

$$\begin{aligned} P_{eq} &= P^* + W_N / dt && \text{si } H_N = 0 \\ P_{eq} &= 0 && \text{si } H_N > 0 \text{ et } \theta \leq \theta_{cr} \\ P_{eq} &= (\theta - \theta_{cr}) \cdot H_N / dt && \text{si } H_N > 0 \text{ et } \theta > \theta_{cr} \end{aligned} \quad (8)$$

$$dW_N / dt = P^* + M_N - P_{eq} \quad (9)$$

con θ : contenido relativo de agua en el stock de nieve; θ_{cr} : contenido crítico relativo de agua en el stock de nieve, a partir del cual se produce la precipitación.

La ecuación diferencial 9 se resuelve de la misma manera que anteriormente:

$$W_N^{n+1} = W_N^n + (P^*n + M_N^n - P_{eq}^n) \cdot \Delta t \quad (10)$$

Las variables de estado iniciales asociadas a este modelo son θ y H_N . El parámetro a ajustar es A_n . Los otros parámetros ($b_p = 0.0125$, $\theta_{cr} = 0.1$, $T_{cp1} = 0$ °C, $T_{cp2} = 6$ °C, $T_{cr} = 0$ °C) podemos admitir que son constantes.

Las entradas del modelo son la precipitación y la temperatura, y la salida es la precipitación equivalente.

Producción – Modelo de infiltración GR3

En este modelo GR3 (Michel, Edijatno, 1988; Consuegra y al., 1998) introducimos una intensidad bruta (o precipitación equivalente P_{eq} procedente del modelo de nieve) y una evapotranspiración potencial (ETP).

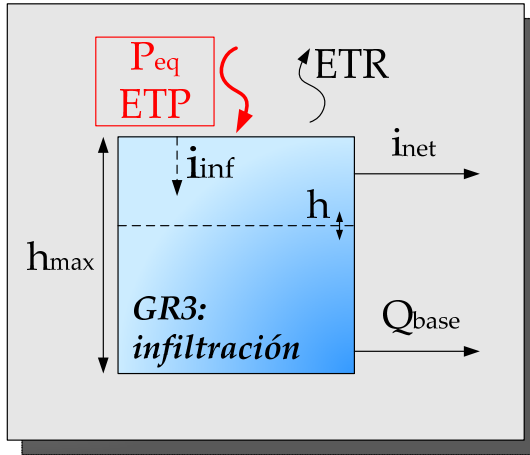


Figura 2: Modelo de infiltración GR3

El cálculo del tanque de infiltración (Figure 2) es el siguiente:

$$\begin{aligned} i_{inf} &= P_{eq} \cdot (1 - (h/h_{max})^2) & \text{si } h \leq h_{max} \\ i_{inf} &= 0 & \text{si } h > h_{max} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} ETR &= ETP \cdot \sqrt{h/h_{max}} & \text{si } h \leq h_{max} \\ ETR &= ETP & \text{si } h > h_{max} \end{aligned} \quad (12)$$

$$i_{net} = P_{eq} - i_{inf} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Q_{base} &= k \cdot h \cdot S & \text{si } h \leq h_{max} \\ Q_{base} &= k \cdot h_{max} \cdot S & \text{si } h > h_{max} \end{aligned} \quad (14)$$

$$dh/dt = i_{inf} - ETR - Q_{base}/S \quad (15)$$

con ETP : evapotranspiración potencial [m/s]; i_{inf} : intensidad de infiltración [m/s]; h : altura de agua del tanque de infiltración [m]; h_{max} : capacidad máxima del tanque de infiltración [m]; ETR : evapotranspiración real [m/s]; Q_{base} : caudal base [m³/s]; k : coeficiente de vaciado del tanque de infiltración [1/s]; S : superficie [m²]; i_{net} : intensidad neta [m/s].

La resolución de la *ecuación diferencial 15* se hace de nuevo según el método de Euler de primer orden como sigue:

$$h^{n+1} = h^n + (i_{inf}^n - ETR^n - Q_{base}^n / S) \cdot \Delta t \quad (16)$$

La variable de estado inicial asociada a este modelo es h. Los parámetros a ajustar son k y h_{max} . El parámetro S se supone constante una vez hallado.

Las entradas del modelo son la precipitación equivalente (o intensidad bruta) y la ETP, proporcionándose como salidas la intensidad neta, el caudal base y la evapotranspiración real.

Producción – Modelo glaciar

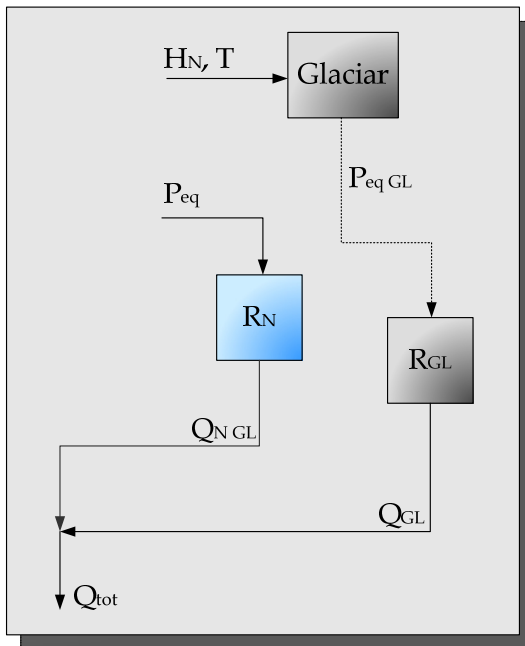


Figura 3: Modelo glaciar

La fusión glaciar (Figure 3) depende de la temperatura y de la presencia de nieve sobre el glaciar. El caudal total del glaciar también depende del proceso de transferencia en los tanques lineales de nieve R_N y glaciar R_{GL} .

Una precipitación bruta (o precipitación equivalente P_{eq} del modelo de nieve) es transferida al tanque lineal de nieve (R_N), regido por la *ecuación 17*:

$$dH_{NGL} / dt = P_{eq} - K_N \cdot H_{NGL} \quad (17)$$

con H_{NGL} : nivel del tanque lineal de nieve [m]; K_N : coeficiente de vaciado del tanque lineal de nieve [1/s].

La salida de caudal del tanque lineal de nieve Q_{NGL} :

$$Q_{NGL} = K_N \cdot H_{NGL} \cdot S_{GL} \quad (18)$$

con Q_{NGL} : caudal de salida del tanque lineal de nieve [m³/s]; S_{GL} : superficie glaciar [m²].

El submodelo de fusión glaciar produce un caudal únicamente cuando la altura de nieve simulada es 0 ($H_N=0$). A partir de ese instante, el caudal producido por la fusión glaciar (P_{eqGL}) es transferido al tanque lineal glaciar (R_{GL}) y el caudal resultante (Q_{GL}) a la salida de la subcuenca.

La fusión glaciar Q_{GL} está definida según las *ecuaciones 19 a 21*:

$$\begin{aligned} P_{eqGL} &= 0 & \text{si } T \leq T_{cr} \text{ o } H_N > 0 \\ P_{eqGL} &= A_{GL} \cdot (T - T_{cr}) & \text{si } T > T_{cr} \text{ y } H_N = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$dH_{GL} / dt = P_{eqGL} - K_{GL} \cdot H_{GL} \quad (20)$$

$$Q_{GL} = K_{GL} \cdot H_{GL} \cdot S_{GL} \quad (21)$$

con P_{eqGL} : fusión glaciar [m/s]; A_{GL} : coeficiente de fusión glaciar grado-día [m/s/°C]; H_{GL} : nivel del tanque lineal glaciar [m]; K_{GL} : coeficiente de vaciado del tanque lineal glaciar [1/s]; Q_{GL} : caudal de salida del tanque lineal glaciar [m³/s].

Las variables de estado asociadas a este modelo son H_N , θ , H_{RN} , y H_{RGL} . Los parámetros a ajustar son A_{GL} , K_{GL} et K_N . El parámetro S_{GL} se supone constante una vez hallado.

Las entradas del modelo son la altura de nieve, la temperatura y la precipitación bruta (o equivalente procedente del modelo de nieve), y la salida es el caudal total de salida del modelo.

Transferencia – Modelo de escorrentía superficial SWMM

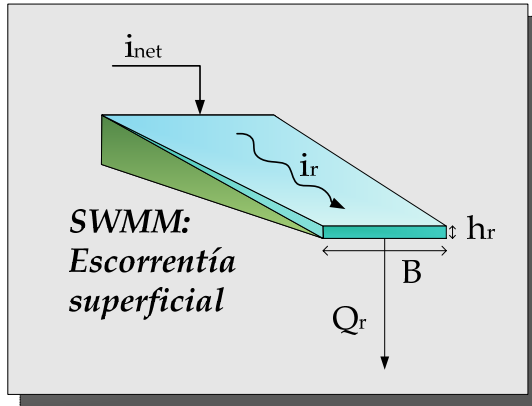


Figura 4: Modelo de escorrentía superficial SWMM

La transferencia de la intensidad neta sobre una superficie impermeable se realiza con la ayuda de un tanque no lineal de transferencia (Figura 4) según las ecuaciones 22 a 24:

$$\begin{aligned} dh_r / dt &= 2 \cdot (i_{net} - i_r) \\ h_r &> 0 \end{aligned} \quad (22)$$

$$i_r = K_s \cdot \sqrt{J_o} \cdot h_r^{5/3} \cdot B / S \quad (23)$$

$$Q_r = i_r \cdot S \quad (24)$$

con h_r : altura de agua aguas abajo de la superficie [m]; i_r : intensidad de escorrentía superficial en el punto de desagüe de la superficie [m/s]; K_s : coeficiente de Strickler [$m^{1/3}/s$]; J_o : pendiente media del plano; B: amplitud del plano [m].

Como en el modelo de infiltración GR3, se trata de resolver una ecuación diferencial ordinaria con el método de Euler de primer orden.

La variable de estado asociada a este modelo es h_r . El parámetro a ajustar es K_s . Los otros parámetros (J_o , B, S) se suponen constantes.

Alimentado aguas arriba por un hietograma de lluvia neta, el modelo SWMM (Metacalf, Eddy, 1971) proporciona un hidrograma aguas abajo de la cuenca vertiente.

Transporte en un curso de agua

A continuación se presentan tres esquemas de resolución del transporte de caudal en un curso de agua.

Transporte según St. Venant

Este esquema resuelve las ecuaciones completas de un modelo 1D no estacionario. Las ecuaciones completas de St. Venant que describen el modelo son:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + g \cdot I_1 \right) = g \cdot A \cdot (J_0 - J_f) + g \cdot I_2 \quad (26)$$

con A : superficie mojada del perfil transversal [m^2]; Q : caudal [m^3/s]; J_0 : pendiente de fondo; J_f : pendiente de rozamiento; I_1 : coeficiente del perfil [m^3]; I_2 : coeficiente de variación de la sección [m^2].

La *ecuación 25* expresa la conservación de la masa mientras que la *ecuación 26* asegura la conservación de la cantidad de movimiento. El término I_1 tiene en cuenta la forma del perfil transversal y se calcula según:

$$I_1 = \int_0^h (h - \eta) \cdot b(\eta) d\eta \quad (27)$$

El término b indica la amplitud de la sección a la altura η , que es una variable de integración según representa la *Figura 5*.

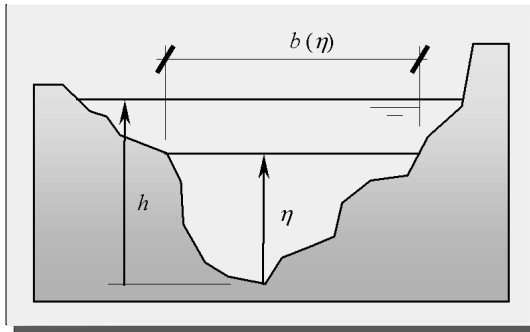


Figura 5: Descripción esquemática de los parámetros utilizados en el cálculo de I_1

Esta función de *Routing System II* es actualmente capaz de resolver las ecuaciones de St. Venant para la geometría de perfil transversal representada en la *Figura 6*.

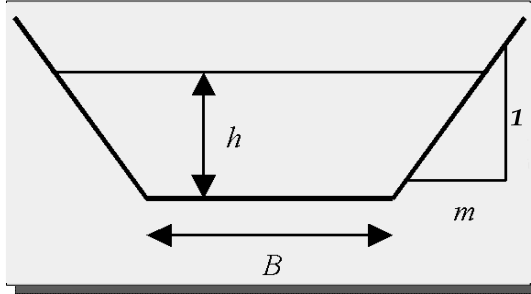


Figura 6: Perfil transversal disponible en *Routing System II* para el cálculo del tránsito de caudales.

Para esta sección trapecoidal, la ecuación que define I_1 se reduce a:

$$I_1 = \frac{B \cdot h^2}{2} + \frac{m \cdot h^3}{3} \quad (28)$$

con B: amplitud de la base del perfil transversal [m]; h: altura de agua [m]; m: relación de los taludes laterales (1 vertical / m horizontal).

La pendiente de frotamiento J_f se calcula según Manning-Strickler:

$$J_f = \frac{Q \cdot |Q|}{A^2 \cdot K^2 \cdot R_h^{3/2}} \quad (29)$$

$$R_h = \frac{A}{L_p} \quad (30)$$

con K: coeficiente de Strickler; R_h : radio hidráulico [m]; A: superficie mojada [m²]; L_p : perímetro mojado [m].

El término I_2 tiene en cuenta la variación de la sección a lo largo del curso de agua, siendo nulo en el caso de canales prismáticos. De una manera general es igual a:

$$I_2 = \int_0^h (h - \eta) \frac{\partial b}{\partial x} \Big|_{h=\eta} \quad (31)$$

Resolvemos las *ecuaciones 25 y 26* por el método de Euler de primer orden, para un canal prismático según:

$$A_{j+1}^{n+1} = A_{j+1}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{j+1}^n - Q_j^n) \quad (32)$$

$$Q_{j+1}^{n+1} = Q_{j+1}^n - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{(Q_{j+1}^n)^2}{A_{j+1}^n} - \frac{(Q_j^n)^2}{A_j^n} + g \cdot I_{1,j+1}^n - g \cdot I_{1,j}^n \right) + \Delta t \cdot g \cdot \frac{(A_j^n + A_{j+1}^n)}{2} \cdot J_0 - \Delta t \cdot g \cdot A_{j+1}^n \cdot J_{f,j+1}^n \quad (33)$$

con los subíndices j y $j+1$ representando la posición en el espacio; los superíndices n y $n+1$ representando el instante temporal; g : 9.81 [m²/s]; Δx : incremento de longitud [m].

La condición límite aguas abajo impuesta por el programa *Routing System II* es el calado normal.

En la práctica, según la situación física a modelizar, ciertos términos de las ecuaciones dinámicas completas pueden ser eliminados para llegar a expresiones simplificadas, sin que por ello se pierda en eficacia. Las soluciones aplicables son las de la onda difusiva y la onda cinemática, presentadas a continuación.

Transporte según Muskingum-Cunge

Descartando los dos primeros términos de la *ecuación 26*, ésta queda como sigue:

$$\frac{\partial I_1}{\partial x} = A \cdot (J_0 - J_f) + I_2 \quad (34)$$

Esta nueva ecuación corresponde a la aproximación de la onda difusiva. Con la hipótesis suplementaria de un canal prismático (Cunge, 1991) es posible escribir la *ecuación 26* bajo la forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{Q}{BD} \frac{dD}{dh} \right) \frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{D^2}{2B|Q|} \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (35)$$

con B : amplitud de la base del perfil transversal [m]; D : índice de caudal [m³/s].

El índice de caudal es la capacidad de transporte de un curso de agua y se define según:

$$Q = DJ_0^{1/2} \quad (36)$$

La *ecuación 35* es una ecuación en derivadas parciales de tipo parabólico que representa la convección y la difusión de la variable Q . Así, el caudal es transportado a una velocidad c (*ecuación 37*) y difuso con un coeficiente de difusión δ (*ecuación 38*):

$$c = \frac{Q}{BD} \frac{dD}{dh} \quad (37)$$

$$\delta = \frac{D^2}{2B \cdot |Q|} \quad (38)$$

Además, haciendo la hipótesis de una relación biunívoca entre el caudal Q y la altura de agua h , la *ecuación 35* se reduce a:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

Esta ecuación se llama « ecuación de la onda cinemática » y describe la convección simple del caudal a una velocidad c , según está definida en la *ecuación 37*. Puede ser resuelta por el siguiente esquema numérico en diferencias finitas:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} \approx \frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1+X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{\Delta t} \quad (40)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} \approx \frac{\frac{1}{2}(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1}{2}(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} \quad (41)$$

Aplicando este esquema a la *ecuación 39*:

$$\begin{aligned} & \frac{X(Q_j^{n+1} - Q_j^n) + (1+X)(Q_{j+1}^{n+1} - Q_{j+1}^n)}{c\Delta t} + \\ & + \frac{\frac{1}{2}(Q_{j+1}^{n+1} - Q_j^{n+1}) + \frac{1}{2}(Q_{j+1}^n - Q_j^n)}{\Delta x} = 0 \end{aligned} \quad (42)$$

La resolución de esta ecuación según la incógnita Q_{j+1}^{n+1} nos lleva a:

$$Q_{j+1}^{n+1} = C_1 Q_j^{n+1} + C_2 Q_j^n + C_3 Q_{j+1}^n \quad (43)$$

donde:

$$\begin{aligned} C_1 &= - \frac{\kappa X - \frac{\Delta t}{2}}{\kappa(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \\ C_2 &= \frac{\kappa X + \frac{\Delta t}{2}}{\kappa(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \\ C_3 &= \frac{\kappa(1-X) - \frac{\Delta t}{2}}{\kappa(1-X) + \frac{\Delta t}{2}} \end{aligned} \quad (44)$$

$$K = \frac{\Delta x}{c} \quad (45)$$

$$c = \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{A_{j+1}^n - A_j^n} \quad (46)$$

El ingeniero hidráulico reconoce aquí la fórmula de Muskingum (Boillat 2000), nombre del río de los Estados Unidos donde el método se empleó por primera vez. Así, el método Muskingum representa una aproximación en diferencias finitas de la ecuación de la onda cinemática. Pero esto es simplemente una apariencia pues, desarrollando los términos de la *ecuación 42* en series de Taylor alrededor del punto (j,n) , admitiendo que $\Delta x/\Delta t = c$ y despreciando los términos cuadráticos (Δx^2) y superiores, esta ecuación puede escribirse bajo la forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c \frac{\partial Q}{\partial x} - cB \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (47)$$

$$B = \Delta x \left(\frac{1}{2} - X \right) \quad (48)$$

Podemos distinguir en este análisis, propuesto por Cunge (1969), que la ecuación de Muskingum es una resolución en diferencias finitas de la ecuación de la onda difusiva (35) con la condición de poner correctamente el valor de los parámetros K y X . K está definido por la *ecuación 45* y X corresponde, según definición de la celeridad c y la *ecuación 48*, a:

$$X = \frac{1}{2} - \frac{D^3}{2\Delta x |Q| \frac{dD}{dh}} \quad (49)$$

Esta función de la onda difusiva de *Routing System II* es actualmente capaz de resolver la ecuación de Muskingum-Cunge para la geometría trapezoidal de un perfil transversal, según la *Figura 6*.

Transporte por onda cinemática

El modelo de onda cinemática es el modelo de transporte más simple, despreciando los términos de inercia y de presión de las ecuaciones completas de St. Venant. En consecuencia, la hipótesis cinemática supone que las fuerzas de gravedad son idénticas, aunque de signo contrario, a las fuerzas de rozamiento. Esto implica que existe una relación biunívoca entre el caudal y la altura de agua (calado normal).

La ecuación de la onda cinemática, que ya ha sido presentada en el capítulo precedente, se escribe:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(\frac{dQ}{dA} \right)_{x_0} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (50)$$

Se trata de una ecuación de convección simple, que indica que el caudal Q es transportado aguas abajo a una celeridad c definida según:

$$c = \frac{\partial Q}{\partial A} \quad (51)$$

Este modelo simple transporta a una velocidad c cada punto del hidrograma de aguas arriba a aguas abajo del curso de agua. Puesto que no aparece ningún término difusivo en la ecuación, el caudal punta no disminuye, permaneciendo constante. Por el contrario, el aspecto general de la crecida es modificado ya que los grandes caudales son transferidos aguas abajo a una velocidad mayor que los pequeños.

Los parámetros de entrada son idénticos a aquellos del modelo de onda difusiva, considerando también la misma geometría para los perfiles transversales que el descrito en el método de Muskingum-Cunge (canales trapezoidales, *Figura 6*). Contrariamente al modelo de onda difusiva, no se produce ninguna reducción de caudal como ya hemos comentado. La resolución se realiza según las ecuaciones:

$$c = \frac{Q_{j+1}^n - Q_j^n}{A_{j+1}^n - A_j^n} \quad (52)$$

$$\alpha = c \cdot \frac{\Delta t}{\Delta L} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} Q_{j+1}^{n+1} &= \alpha \cdot Q_j^n + (1 - \alpha) \cdot Q_{j+1}^n & \text{si } \alpha \leq 1 \\ Q_{j+1}^{n+1} &= \frac{1}{\alpha} \cdot Q_j^n + (1 - \frac{1}{\alpha}) \cdot Q_j^{n+1} & \text{si } \alpha > 1 \end{aligned} \quad (54)$$

Modelo GSM – Socont

El modelo GSM-SOCONT (Glacier Snow Melt – Soil CONTRibution model, Schäfli y al, 2003 y 2005) es la combinación de varios modelos hidrológicos. Según este concepto, una cuenca vertiente alpina puede separarse en una parte glaciar y una parte no-glaciar.

La parte glaciar está compuesta de un modelo de nieve aguas arriba de un modelo glaciar; la parte no-glaciar, de un modelo de nieve aguas arriba de un modelo SOCONT, compuesto él mismo de los modelos GR3 y SWMM. El caudal en el punto de desagüe de la cuenca vertiente es la suma de los caudales de ambas partes.

Parte no-glaciar

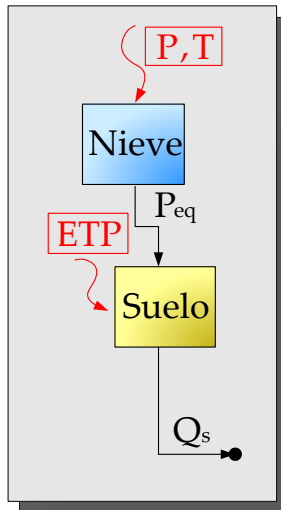


Figura 7 : Parte no-glaciar

En la parte no-glaciar (*Figura 7*) el modelo de nieve simula la evolución temporal del stock de nieve (acumulación y fusión) en función de la temperatura (T) y de la precipitación (P), produciendo una precipitación equivalente (P_{eq}) que es utilizada como entrada por el modelo SOCONT, que también tiene como entrada la evapotranspiración potencial (ETP). El caudal Q_s de salida es transferido a la salida de la cuenca vertiente.

Parte glacial

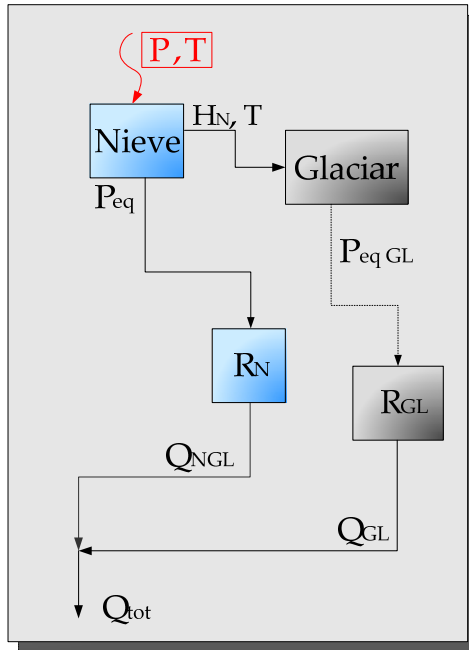


Figura 8: Parte glacial

La parte glacial (Figura 8) esta compuesta de cuatro submodelos (uno correspondiente al modelo de nieve y los otros tres al modelo glaciar).

El modelo de nieve crea una precipitación equivalente (P_{eq}) que es transferida al modelo glaciar, al igual que la altura de nieve (H_N) y la temperatura (T).

En el modelo glaciar, la precipitación equivalente se dirige al tanque lineal de nieve (R_N) y finalmente a la salida de la subcuenca (Q_{NGL}). Además, el submodelo de fusión glaciar crea un caudal cuando la altura de nieve simulada es 0 ($H_N=0$). Este caudal glaciar ($P_{eq\ GL}$) es transferido al tanque lineal glaciar (R_{GL}) y el caudal resultante (Q_{GL}) a la salida de la subcuenca.

El caudal final producido por la subcuenca (Q_{tot}) es la suma de las dos contribuciones.

Separación de caudales

La función « Derivación » de *Routing System II* es aquella que mejor ilustra el potencial de modelización funcional. En todo caso, no puede pretenderse ninguna normalización en lo que concierne a las derivaciones. Tampoco se puede pretender elaborar una lista con todos los parámetros físicos que permitan el cálculo completo de una derivación.

En resumen, todas las obras hidráulicas de derivaciones, aunque forzosamente diferentes, comparten una misma funcionalidad en el seno de una red hidráulica, la de separar caudales.

Aparte del hidrograma de entrada, esta función necesita el conocimiento de la relación « Caudal de entrada – Caudal de salida », según ilustra la *Figura 9*. De una manera general, esta relación que describe el comportamiento de la derivación no es generada por el programa *Routing System II*. El usuario debe efectuar un cálculo de comportamiento de la derivación y crear a continuación la relación « Caudal de entrada – Caudal de salida ».

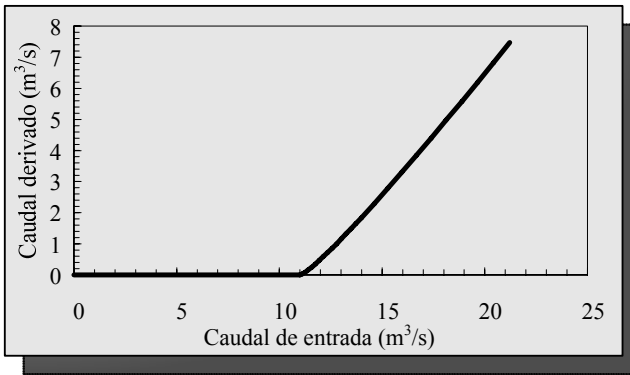


Figura 9: Ejemplo de relación Caudal de entrada – Caudal derivado, para un vertedero lateral

Con esta información, la función « Derivación » de *Routing System II* calcula ella misma el hidrograma derivado y el hidrograma que continua en la misma dirección, como muestra la *Figura 10*, según la ecuación 55:

$$Q_{total}^n = Q_{derivado}^n + Q_{no\ derivado}^n \quad (55)$$

con Q_{total}^n : caudal total en el instante n [m^3/s]; $Q_{derivado}^n$: caudal derivado en el instante n [m^3/s]; $Q_{no\ derivado}^n$: caudal no-derivado en el instante n [m^3/s].

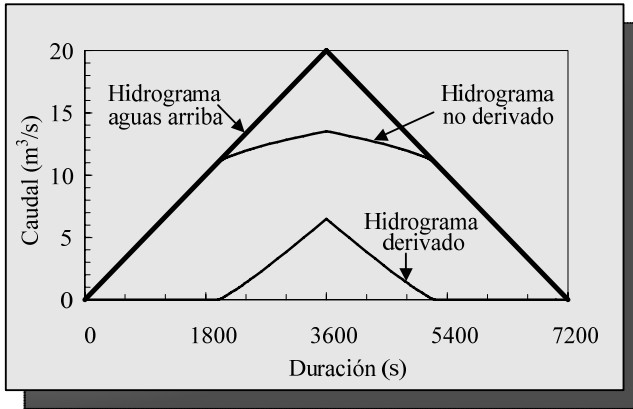


Figura 10: Ejemplo de caudal en una bifurcación

Este ejemplo ilustra bien el comportamiento no-lineal de una derivación de agua consistente en un vertedero lateral. Como vemos, incluso con un hidrograma lineal aguas arriba, los hidrogramas calculados contienen puntos suficientes para describir correctamente el comportamiento no-lineal del aliviadero.

Agregación de caudales

La función « *Confluencia* » de *Routing System II* permite calcular, de una manera general, la suma de diversas funciones. En particular permite la suma de varios hidrogramas en una confluencia según la ecuación 56:

$$Q_1^n + Q_2^n + \dots + Q_m^n = Q_{total}^n \quad (56)$$

con Q_i^n : caudales individuales en el instante n [m³/s]; Q_{total}^n : caudal total en el instante n [m³/s].

De apariencia muy simple, o incluso trivial, esta operación es sin embargo relativamente compleja debido a que las funciones que circulan en un modelo *Routing System II* no están definidas según unos intervalos de tiempo constante y tampoco están sincronizadas. En consecuencia, esta función efectúa varias interpolaciones para obtener un resultado correcto (Figura 11).

Si agregamos una función descrita por n puntos a otra con m puntos, y si ninguno de esos puntos está sincronizado, la función resultante tendrá $n + m$ puntos. Si por el contrario, dos puntos de las funciones están sincronizados, el resultado sólo conservará uno de ellos.

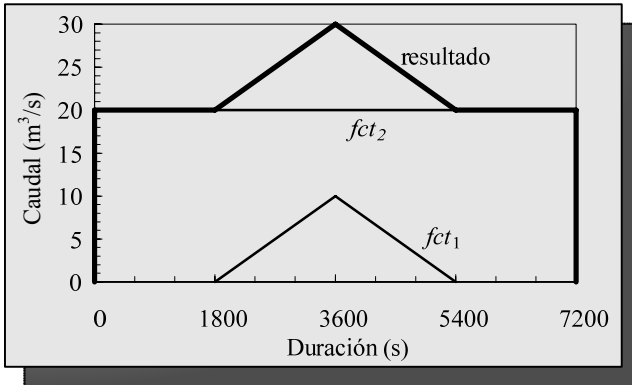


Figura 11 : Ejemplo de agregación de un hidrograma rectangular y uno triangular cuyos puntos no están sincronizados

Almacenamiento en un embalse de retención

La evolución temporal de un volumen de agua \forall en un embalse está descrita por la siguiente ecuación de retención:

$$\frac{d\forall}{dt} = Q_e - Q_s \quad (57)$$

con \forall : volumen en el embalse de retención [m^3]; Q_e : caudal de entrada en el embalse [m^3/s]; Q_s : caudal de salida [m^3/s].

La mayoría de los embalses de retención están equipados de vertederos de crecidas, que son habitualmente aliviaderos u orificios. En estos casos, el caudal de salida depende del nivel de agua en el embalse. Para resolver la *ecuación 57* es indispensable conocer el caudal de salida en función del volumen de agua \forall del embalse. Esta operación es posible si la relación entre el nivel de agua y el volumen es conocida.

La *ecuación 57* es una ecuación diferencial ordinaria en función del tiempo y del volumen. Conociendo el nivel inicial (y por lo tanto también el volumen inicial), esta ecuación se resuelve numéricamente por el método de Euler de primer orden de tal forma que:

$$\forall^{n+1} = \forall^n + Q_e^n - Q_s^n \quad (58)$$

Los datos a proporcionar son: « *Hidrograma de entrada* », relación « *Nivel-Volumen* », relación « *Nivel-Caudal de salida* » y el « *Nivel inicial* ». Los resultados obtenidos son el « *Hidrograma de salida* » del embalse y el « *Limnigrama* » del mismo, es decir, la evolución temporal del nivel en el embalse.

Este cálculo de retención se resuelve fácilmente por lo métodos clásicos del análisis numérico (Figura 12). Este ejemplo puramente teórico pone en evidencia el efecto de laminación debido tanto al embalse como a su nivel de llenado inicial.

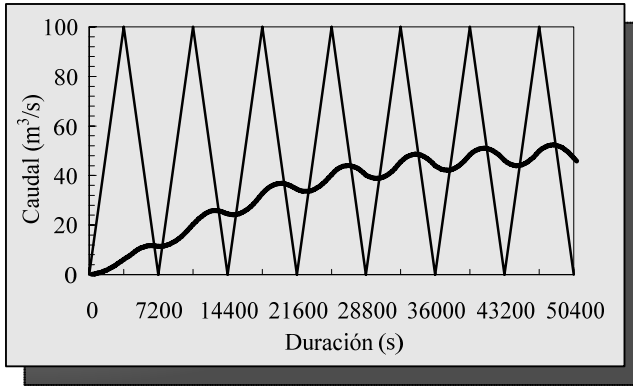


Figura 12: Ejemplo de un cálculo de retención. El hidrograma de entrada es una sucesión de crecidas triangulares. El hidrograma de salida es el representado con un trazo más grueso. Este cálculo ha sido efectuado con una embalse rectangular de 500.000 m², equipado de un aliviadero lateral estándar de 10 m de ancho.

Vertedero

Los vertidos en las obras de evacuación son calculados con la ayuda de una relación « Nivel – Caudal vertido ». El caudal vertido es por lo tanto:

$$Q_{\text{vertido}}^n = 0 \quad \text{si } H^n < H_i$$

$$Q_{\text{vertido}}^n = Q_{\text{dev},i} + (H_{i+1} - H^n) \frac{Q_{\text{vert},i+1} - Q_{\text{vert},i}}{H_{i+1} - H_i} \quad \text{si } H_i < H^n < H_{i+1} \quad (59)$$

con Q_{vertido}^n : caudal vertido en el instante n [m³/s]; H^n : altura de agua en el instante n [m]; $Q_{\text{vert},i}$: caudal vertido para un nivel de agua H_i [m³/s]; H_i : nivel de agua en el embalse [m].

Turbina / Bomba

Unido a una « Serie temporal » o a una « Fuente », este objeto proporciona o extrae un caudal determinado para cada instante de tiempo del embalse asociado:

$$Q_{\text{turbinado / bombeado}}^n = Q_{\text{fuente}}^n \quad (60)$$

con $Q_{\text{turbinado/bombeado}}^n$: caudal turbinado o bombeado en el instante n [m³/s]; Q_{fuente}^n : caudal de turbinaje o bombeo proporcionado en el instante n bajo forma de serie temporal [m³/s].

Captor

Este objeto puede ser unido a cualquier otro y, gracias a él, unas alarmas son activadas cuando se superan ciertos valores de salida del objeto asociado. La activación de estas alarmas se produce exactamente al alcanzarse en el objeto asociado los valores de los umbrales introducidos por el usuario en el objeto « *Captor* »:

$$\begin{aligned} V_{Alarma}^n &= 0 && \text{si } V^n < V_{umbral,i} \\ V_{Alarma}^n &= 1 && \text{si } V^n \geq V_{umbral,i} \end{aligned} \quad (61)$$

con V_{alarma}^n : valor de la alarma en el instante n ; V^n : valor de estudio en el instante n ; $V_{umbral,i}$: valor del umbral i .

Regulación / Estado

Con esta opción creamos automáticamente un submodelo. Dentro de este objeto (que es un submodelo) podemos crear varios « *Estados* », y posteriormente la elección del estado activo se realiza en función de las alarmas activadas en los captores asociados.

Un ejemplo típico de regulación es el empleo de una ley de turbinaje / bombeo en función del nivel existente en un embalse.

Dentro de cada « *Estado* » introducimos varios objetos en función de las necesidades (turbinaje, derivación, etc) de manera que tomaremos uno o varios datos de entrada y uno o varios datos de salida.

Por ejemplo, podemos incluir una turbina (asociado a un objeto « *Serie temporal* » o « *Fuente* ») en un « *Estado* » para proporcionar un caudal de salida de un embalse.

También debemos definir un « *Estado* » inicial que asegure el funcionamiento del modelo. Después, las transiciones entre los diferentes « *Estados* » se realizan en función de las alarmas activadas en los captores:

$$\begin{aligned} E^n &= E_1 && \text{si } n = 0 \\ E^n &= E_i && \text{si } n > 0 \end{aligned} \quad (62)$$

con E^n : Estado definido en el instante n ; E_i : Estado i definido en función de los umbrales alcanzados en los captores.

Estación virtual

El objeto « *Estación* » (al que están asociadas unas coordenadas X, Y, Z) permite la espacialización de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura, ETP) a partir de los valores disponibles en la base de datos de « *Data Environment* ». Esta base de datos se basa en una referenciación espacial en coordenadas métricas.

El método elegido para la espacialización de precipitaciones y temperaturas es el método de Shepard. La evaluación de una variable

X_s a partir de n estaciones situadas en $i=1,2,\dots,n$ se obtiene por ponderación según el inverso del cuadrado de la distancia euclidiana $d_{i,s}$, entre la estación i de la base de datos y el punto de cálculo s (estación virtual), típicamente el centro de gravedad de una cuenca vertiente:

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (63)$$

$$X_s = \frac{\sum_{i=1}^n X_i \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (64)$$

con x_i, y_i : posición de la estación i de la base de datos [m]; x_s, y_s : posición de la estación virtual s [m]; X_s : valor de la variable de estudio en la estación virtual s [U.I.]; X_i : valor de la variable de estudio en la estación empleada i de la BD [U.I.]; $d_{i,s}$: distancia entre la estación empleada i de la BD y la estación virtual s [m].

Este método ha sido concebido para tener en cuenta la evolución de ciertas variables meteorológicas en función de la altitud. Así, las variables X_i situadas a la altitud z_i pueden ser remplazadas por sus equivalentes X_i^* al nivel del mar $z_0 = 0$ m s.m. según una relación lineal con un gradiente altimétrico constante dX_s/dz asociado al punto de cálculo s :

$$X_i^* = X_i - \frac{dX_s}{dz} \cdot (z_i - z_0) \quad (65)$$

El resultado del método de Shepard al nivel del mar proporciona el equivalente X_s^* de la variable X_s , que es reescendida a la altitud z_s del punto de cálculo en función del gradiente altimétrico:

$$X_s = X_s^* + \frac{dX_s}{dz} \cdot (z_s - z_0) \quad (66)$$

Las n estaciones con las que se efectúa la interpolación espacial en s son determinadas automáticamente, siendo todas aquellas estaciones de la base de datos que respeten la ecuación 67. El número n de estaciones es por lo tanto variable para cada pareja (s, r_s) :

$$d_{i,s} \leq r_s \quad (67)$$

Capítulo 3

Recomendaciones de instalación

La instalación del programa *Routing System II* se efectúa fácilmente con el CD de instalación si el *Service Pack Microsoft .Net Framework* (gratuito) está instalado en el ordenador.

Este capítulo presenta los requisitos de hardware y software necesarios para utilizar emplear el programa, así como el procedimiento de instalación y desinstalación.

Contenido

- Requisitos de hardware y software
- Procedimiento de instalación y desinstalación

Requisitos de hardware y software

Antes de proceder a la instalación del programa *Routing System II*, debemos asegurarnos que nuestro ordenador posea el hardware y el software necesarios. Para obtener un buen rendimiento con el programa, los valores recomendados son indicados entre paréntesis. Este programa *Routing System II* funciona en un PC que posea las siguientes características:

- Cualquier ordenador compatible IBM equipado de un procesador Pentium 1.0 o superior (recomendado Pentium 2.4 o superior).
- Un disco duro con al menos 20 MB de espacio libre (100 MB o más recomendados).
- Un lector de CD ROM.
- Un mínimo de 256 MB de RAM (512 o más recomendados).
- Un ratón.
- Una pantalla color VGA (resolución de 1024x768 con 65'536 colores recomendada).
- Microsoft Windows 98, Windows NT4, 2000, XP o superior.
- Microsoft .Net Framework Service Pack 1.1 o superior.

Procedimiento de instalación y desinstalación

Al tratarse únicamente de un fichero ejecutable llamado « *Routing System II* », éste programa puede ser lanzado directamente a partir del CD o del disco duro. No existe ningún lugar en particular donde localizarlo y puede ser desplazado a voluntad.

La desinstalación del programa únicamente consistirá en borrar dicho archivo ejecutable « *Routing System II* » del ordenador.

Capítulo 4

Utilización de *Routing System II*

Sobre la base del concepto descrito en los anteriores capítulos, es posible crear modelos semidistribuidos eligiendo de manera coherente, en primer lugar, los objetos del modelo y, en segundo, todos los parámetros y las variables de estado necesarias.

La programación orientada a objetos permite conectar los diferentes objetos hidráulicos e hidrológicos automáticamente. Las confluencias son implantadas aguas abajo de las cuencas y conectadas a los cauces de los ríos. Otros objetos como embalses, aprovechamientos hidroeléctricos, vertederos y turbinas son también implantados fácilmente.

Contenido

- Barra de menú
- Barra de herramientas
- Paleta de objetos

Barra de menú

La « *Barra de menú* » contiene ciertos comandos sobre los que podemos clicar para acceder a determinadas opciones o funciones del programa. También es posible pulsar *Alt + la letra inicial de cada comando*.

- File

-*New*: Supresión del modelo existente en la interfaz gráfica y apertura de un nuevo modelo vacío.

-*Open...*: Apertura de un modelo existente.

-*Save As...*: Almacenamiento de un modelo bajo un nombre a definir por el usuario. El programa crea un fichero de extensión */.sim/*.

-*Save*: Almacenamiento de las modificaciones aportadas a un modelo que al menos ya ha sido guardado vez.

-*Data Environment...*: Apertura de un cuadro de diálogo para proceder a la lectura de una base de datos.

-*Close*: Cierre del modelo en curso sin almacenamiento del mismo.

-*Exit*: Salida del programa.

- Edit

Este menú no ha sido todavía programado.

- Model

-*Edit as Objet*: Apertura de un cuadro de diálogo para la modificación de los valores de un objeto o del submodelo actualmente seleccionado en la interfaz gráfica (descripción, logo, parámetros,...).

-*Save Sub Model as...*: Almacenamiento como submodelo del conjunto de objetos cargados actualmente en la interfaz gráfica.

- Solver

-*Solve*: Inicio de una simulación.

-*Edit Solver*: Apertura del cuadro de diálogo para la modificación de la fecha de inicio del cálculo (« *Data Start* »), la fecha de finalización (« *Data End* »), el intervalo de tiempo entre cada cálculo (« *Constant Time Step* ») y el intervalo de tiempo entre cada almacenamiento de datos (« *dt Save* »).

Barra de herramientas

Las funcionalidades de las herramientas son las mismas que las del menú «*File*», habiéndose añadido además las ayudas para la construcción del modelo.



Abreviación de *File* → *New*.



Abreviación de *File* → *Open*.



Abreviación de *File* → *Save*.



Herramienta para la selección de un objeto.



Herramienta para la conexión entre objetos.



Herramienta para la conexión entre «*Estados*» y donde se definen las transiciones entre ellos durante la programación de una «*Regulación*».



Visualización del cuadro de diálogo de un objeto o de un submodelo con sus características.



Retorno al modelo jerárquico superior.



Supresión del objeto seleccionado.



Abreviación de *File* → *Data Environment*.

Paleta de objetos

Los objetos disponibles para la construcción de un modelo se encuentran siempre visibles en la pantalla (*Figura 13*):



Figura 13 : *Paleta de objetos*

Clicando una vez sobre un icono de la *Paleta de objetos* creamos ese objeto en la interfaz gráfica. Haciendo doble clic sobre él, abrimos un cuadro de diálogo con sus características (*Figura 14*).

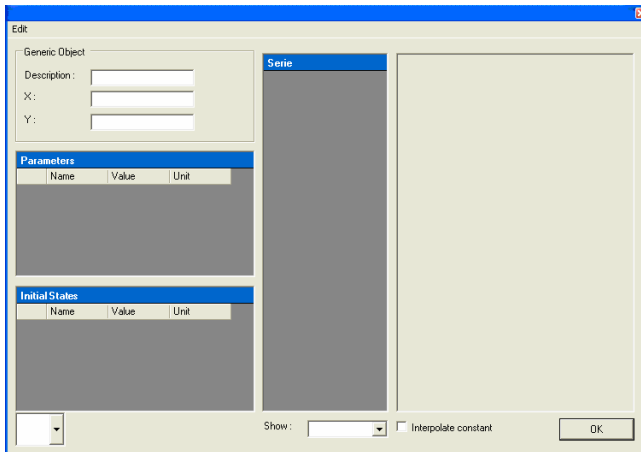


Figura 14: *Cuadro de diálogo general de los objetos*

En la parte « *Generic Object* », podemos modificar el nombre del objeto (« *Description* ») y su posición en la interfaz gráfica (« *X* », « *Y* »). También podemos modificar otras características como los parámetros, los valores iniciales y ciertas series de valores.

Objetos

Como ya hemos indicado, este programa dispone de objetos hidráulicos e hidrológicos caracterizados por su función hidráulica. Gracias a su combinación permiten definir funciones más complejas que pueden ser agregadas en nuevos submodelos.

El programa *Routing System II* contiene 21 objetos cuyas principales características se muestran a continuación:

Estación virtual (objeto aguas arriba)



El objeto « *Estación* » permite la espacialización de las variables meteorológicas (precipitación, temperatura, ETP) a partir de los valores disponibles en la base de datos del « *Data Environment* ». La « *Estación* » posee una referenciación espacial en coordenadas métricas y los parámetros que podemos modificados son los siguientes:

- Coordenadas reales (« *X* », « *Y* » y « *Z* ») en m.
- Radio de búsqueda (« *Search Radius* ») en m.
- Gradiente de precipitación (« *Gradient i* ») en mm/h/m.
- Gradiente de temperatura (« *Gradient T* ») en °C/h/m.
- Gradiente de ETP (« *Gradient ETP* ») en mm/h/m.
- Coeficiente de ponderación pour la précipitation (« *Coeff P* »).
- Coeficiente de ponderación para la temperatura (« *Coeff T* »).
- Coeficiente de ponderación para la ETP (« *Coeff ETP* »).

La unión entre el « *Data Environment* » y el objeto « *Estación* » no es explícita y no está representada por una flecha. En todo caso la base de datos cargada en memoria viva a partir del « *Data Environment* » se utiliza automáticamente.

Serie temporal (objeto aguas arriba)



En este objeto podemos introducir directamente series temporales de caudal, precipitación, temperatura o ETP. Los tiempos son incorporados en segundos y los valores asociados en las unidades correspondientes bajo la forma « $t(s)$ – *parámetro* ».

Embalse



Con este objeto creamos los embalses. Introducimos tanto la relación « *Nivel - Volumen* » como el « *Nivel inicial* » del embalse, recomendándose poner los niveles en altitud [m s.m].

Vertedero



Los vertederos de los embalses son simulados con este objeto, debiendo introducir la relación « *Nivel – Caudal vertido* ». Vuelve a ser recomendable introducir los niveles en altitud [m s.m.]

Curso de agua

Las posibilidades son diversas. Podemos seleccionar entre los métodos de resolución de Muskingum-Cunge, Onda cinemática o St. Venant.



Muskingum-Cunge



Onda cinemática



St. Venant

En todos los casos debemos proporcionar los siguientes parámetros:

- Ancho de la base de la sección (« BO ») en m.
- Pendiente ($1V / mH$) de los taludes laterales (« m ») en m.
- Pendiente de fondo del canal (« J_o »)

- Rugosidad (« K_s ») en $m^{1/3}/s$
- Longitud (« L ») en m
- Caudal inicial (« Q_{mi} ») en m^3/s

Turbina / Bomba



Unida a una « *Serie temporal* » o a una « *Fuente* », este objeto calcula el turbinaje / bombeo de un embalse hacia una confluencia, un curso de agua u otro embalse.

Derivación



Todas las obras hidráulicas de derivaciones comparten la misma funcionalidad, la de separar caudales. Esta función necesita la relación « *Caudal de entrada-Caudal de salida* » (el usuario deberá hacer un cálculo previo del comportamiento de la derivación para hallar esa relación). Con esta información, la función « *Derivación* » de *Routing System II* calcula ella misma el hidrograma derivado y aquel que continua en la misma dirección.

Confluencia



La función « *Confluencia* » de *Routing System II* permite calcular la suma de varias variables. En particular es capaz de sumar varios hidrogramas en su punto de unión.

Submodelo



Todos los modelos o submodelos que han sido salvados bajo forma de ficheros */.sim/* pueden ser integrados como submodelos en la interfaz gráfica.

Fuente (objeto aguas arriba)



Con este objeto cargamos la serie temporal de caudal de una base de datos (se busca la estación de la base de datos con el mismo nombre) para emplearla como turbinaje, bombeo o directamente como caudal.

Captor



El objeto « *Captor* » contiene diversos umbrales introducidos por el usuario y que activan ciertas alarmas al ser alcanzados por la variable del objeto asociado. Es utilizado para la regulación. Por ejemplo, puede medir los niveles de agua en un embalse y activar las alarmas en función de los niveles existentes.

Regulación



Este objeto permite crear una « *Regulación* », a partir de la cual se abre una interfaz gráfica para la construcción de modelos regulados.

Estado



En la « *Regulación* », podemos incluir varios objetos « *Estado* » según el ejemplo del esquema (Figura 15). En cada momento se emplea un « *Estado* » distinto en función de las alarmas activadas en los captores asociados.

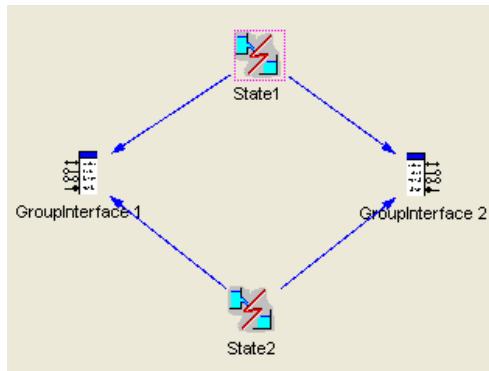


Figura 15 : Ejemplo de regulación con dos « Estados »

GroupInterface



Este objeto es indispensable para unir un submodelo con el modelo jerárquico superior o con otro submodelo, permitiendo trasladar sus variables de entrada o de salida. Para cada submodelo creado hay que utilizar un objeto « *Groupinterface* » para adquirir directamente los valores de entrada

de otro submodelo (o del modelo jerárquico superior) y un segundo « *Groupinterface* » para transferir los valores de salida.

GR3 (infiltración)



Esta función de producción determina la parte de la lluvia bruta que participa en la escorrentía superficial, transformando por lo tanto la lluvia bruta en lluvia neta. El modelo llamado « *GR3* » es una función de producción creada a partir de un tanque de infiltración. Este modelo permite calcular al mismo tiempo que la transformación de una lluvia bruta en neta, un caudal base y una evapotranspiración real. El modelo « *GR3* » está particularmente bien adaptado a las simulaciones hidrológicas continuas por el hecho de que su capacidad de infiltración aumenta durante los periodos secos, además de por tener en cuenta la evapotranspiración, indispensable para el establecimiento del balance hídrico a largo plazo.

SWMM (escorrentía superficial)



Esta función de transferencia permite calcular un hidrograma a partir de una lluvia neta. El modelo « *SWMM* » es un modelo conceptual no-lineal tipo tanque, resultante de la combinación de una ley de rozamiento empírico, la de Manning-Strickler, y de la ecuación de continuidad. En este caso, la ley de rozamiento pasa a ser la ley de vaciado del tanque.

Nieve



Este objeto simula la evolución temporal del stock de nieve (acumulación y fusión) en función de la temperatura (T) y de la precipitación (P), produciendo una precipitación equivalente (P_{eq}) que es utilizada como entrada por el modelo de infiltración o por el modelo glaciar.

Glaciar



El modelo glaciar calcula un caudal de fusión en los tanques lineales de nieve y glaciar, en función de la lluvia bruta o de la precipitación equivalente, de la temperatura y de la presencia o no de nieve sobre el glaciar, produciendo un caudal resultante total. Es por ello que su rendimiento mejora cuando se instala un modelo de nieve aguas arriba y se conecta a él.

Suma



La función « *Suma* » es un coeficiente multiplicador de cualquier variable. Se integra en el modelo aguas abajo de un objeto y permite la multiplicación de su serie temporal por un factor seleccionado por el usuario.

Bases de datos

Routing System II funciona con una base de datos *Access*. Su estructura se presenta en la *Figura 16* con las siguientes 4 tablas relacionadas:

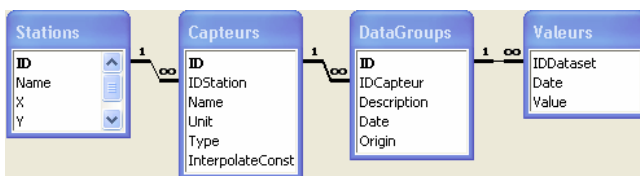


Figura 16 : Atributos y relaciones entre las tablas de la base de datos *Access*

El procedimiento para construir una base de datos consiste en abrir una base de datos *Access* vacía y crear las 4 tablas con las relaciones mostradas. Tras ello, simplemente habrá que completar las tablas con los valores deseados.

Tabla « *Estaciones* »: Es la tabla principal en la que son almacenadas las estaciones de medida y sus coordenadas.

Tabla « *Captore*s »: La segunda tabla de la base de datos es la de los captore, donde se encuentran los parámetros medidos y sus unidades correspondientes.

Tabla « *DataGroup* »: En esta tabla se encuentra la hora de creación de los datos y su origen.

Tabla « *Valore*s »: En la última tabla se hallan las series temporales <fecha, valor> de las variables medidas.

Esta base de datos contiene por lo tanto los datos fuente del cálculo hidrológico de *Routing System II*. En la *Figura 17* presentamos un ejemplo de una base de datos *Access*.

The screenshot shows a Microsoft Access database window titled "Stations : Table". It displays a hierarchical table structure with four levels of data:

- Level 1:** A table with columns ID, Name, X, Y, and Z. It contains 6 records for stations: 1 Simplon-Dorf, 2 Brig, 3 Visp, 4 Ackersand, 5 Grächen, and 6 Zermatt.
- Level 2:** A table for station 6 (Zermatt) with columns ID, Name, Unit, Type, and InterpolateConstant. It contains 1 record: 7 Pluie, mm/h, i, with InterpolateConstant checked.
- Level 3:** A table for record 7 (7311 Heure) with columns ID, Description, Date, and Origin. It contains 1 record: 7311 Heure, 09:12:01, SMA.
- Level 4:** A table for record 7311 (Heure) with columns Date and Value. It contains 14 records showing hourly values from 01:00:00 to 14:00:00 on 03.10.1999.

At the bottom of the window, the status bar indicates "Record: 30 of 10992".

| ID | Name | X | Y | Z |
|----|--------------|--------|--------|------|
| 1 | Simplon-Dorf | 647570 | 116130 | 1495 |
| 2 | Brig | 642090 | 129920 | 671 |
| 3 | Visp | 634125 | 126100 | 655 |
| 4 | Ackersand | 633625 | 121100 | 700 |
| 5 | Grächen | 630825 | 116030 | 1617 |
| 6 | Zermatt | 624350 | 97550 | 1638 |

| ID | Name | Unit | Type | InterpolateConstant |
|----|-------|------|------|-------------------------------------|
| 7 | Pluie | mm/h | i | <input checked="" type="checkbox"/> |

| ID | Description | Date | Origin |
|------|-------------|----------|--------|
| 7311 | Heure | 09:12:01 | SMA |

| Date | Value |
|---------------------|-------|
| 03.10.1999 01:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 02:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 03:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 04:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 05:00:00 | 0.4 |
| 03.10.1999 06:00:00 | 0.3 |
| 03.10.1999 07:00:00 | 0.1 |
| 03.10.1999 08:00:00 | 0.1 |
| 03.10.1999 09:00:00 | 0.1 |
| 03.10.1999 10:00:00 | 0 |
| 03.10.1999 11:00:00 | 0.3 |
| 03.10.1999 12:00:00 | 0.1 |
| 03.10.1999 13:00:00 | 0.3 |
| 03.10.1999 14:00:00 | 0.9 |

Figura 17 : Ejemplo de base de datos Access con sus cuatro tablas

Capítulo 5

Trabajar con *Routing System II*

Las posibilidades ofrecidas por *Routing System II* son numerosas, siendo necesario sintetizar las etapas de utilización de esta herramienta. Este capítulo presenta los fundamentos básicos del programa *Routing System II* para llegar a realizar simulaciones numéricas.

Contenido

- Arranque del programa
- Construcción de un modelo hidrológico
- Inicio de una simulación numérica
- Visualización de resultados

Arranque del programa



El programa *Routing System II* se presenta bajo la forma de un icono ejecutable dentro del entorno de Windows. Para arrancar el programa es suficiente con hacer doble clic sobre dicho icono *Routing System II*. Acto seguido aparece la ventana principal (*Figura 18*) del mismo en la pantalla.

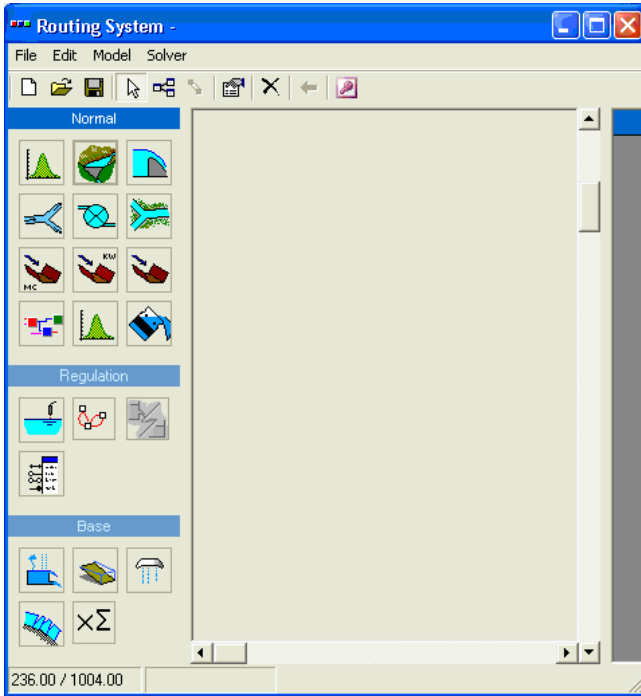


Figura 18: *Ventana principal de Routing System II*

A partir de ese momento podemos abrir un modelo existente o construir uno nuevo.


Construcción de un modelo hidrológico

Creación de objetos

Para proceder a la creación de un objeto clicamos una vez sobre el icono deseado, existente en la « *Paleta de objetos* », y éste aparecerá en la interfaz gráfica. Después de su creación, el objeto puede ser desplazado a voluntad para ordenar el modelo según una topología deseada.

Haciendo doble clic sobre cualquier objeto existente en la interfaz gráfica se abre un cuadro de diálogo con las características de ese objeto. Es aquí donde es posible cambiar los valores de sus parámetros asociados.


Unión entre objetos

La conexión entre objetos es fácil. Es posible clicar en el icono  de la « *Barra de herramientas* » o pulsar la barra espaciadora. La flecha del ratón se transforma en una cruz. A continuación hacemos un clic de un objeto a otro según el sentido del flujo para conectarlos. Si no aparece ninguna flecha, los objetos no son compatibles y no pueden ser conectados directamente.

Los objetos se unen de aguas arriba a aguas abajo y el programa valida automáticamente la conexión si las variables a transmitir son compatibles. Haciendo doble clic sobre la flecha creada aparece un cuadro de diálogo con las características de la/s variable/s transferida/s de un objeto al otro pudiendo suprimir manualmente alguna de ellas si es necesario.

Es posible pasar de *modo conexión* a *modo selección* pulsando de nuevo la barra espaciadora.

Inicio de una simulación numérica

Antes de efectuar una simulación hay que abrir un modelo hidrológico o construirlo (*Figura 19*). Si ya tenemos uno creado y queremos abrirlo, simplemente hay que clicar en el icono  o ir a *File* → *Open...* y seleccionar el modelo hidrológico deseado.

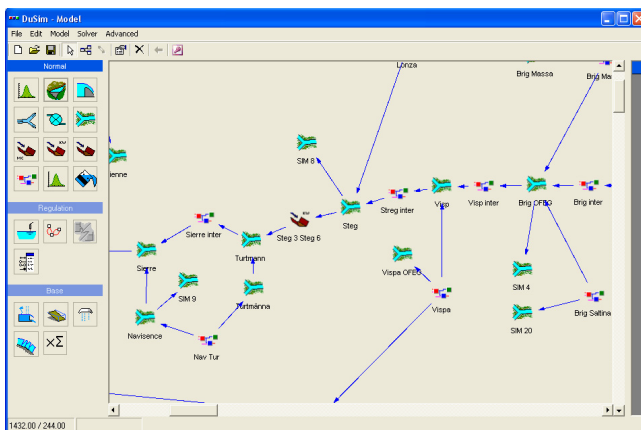



Figura 19 : Ejemplo de modelo hidrológico (Jordan, 2007)

Si existen objetos « Estación » o « Fuente » en un modelo, es necesario cargar la base de datos donde se encuentran los valores de las variables meteorológicas del periodo a simular.

Para ello es suficiente con hacer un clic en  o en el Menú (*File* → *Data Environment...*) y a continuación cargar la base de datos (BD) seleccionando *File* → *Open Access* en el cuadro de diálogo.

Tras cargar la base de datos, elegimos el periodo de simulación clicando sobre el menú *Solver* → *Edit Solver* y a continuación introducimos:

- la fecha de inicio del periodo (« *Data Start* »)
- la fecha de finalización (« *Data End* »)
- el intervalo de tiempo entre dos cálculos consecutivos en los que son determinadas las variables (« *Constant Time Step* »)
- el intervalo de tiempo entre dos copias de datos en el disco duro (« *dt Save* »)

Para lanzar el cálculo simplemente elegimos en el menú la opción *Solver* → *Solve*.

Visualización de resultados

Una vez la simulación terminada, todas las variables como los caudales, las alturas de agua en los embalses, las alturas de nieve, etc. pueden ser visualizadas, haciendo doble clic en el objeto correspondiente (Figura 20).

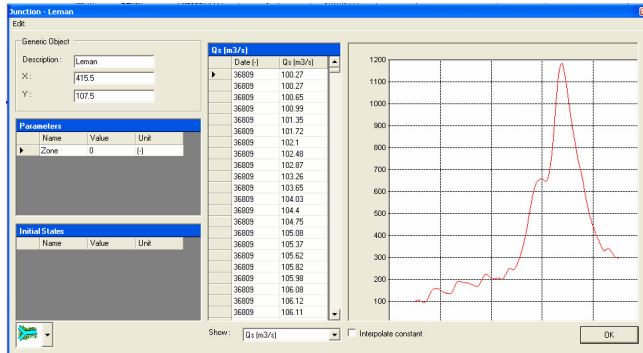


Figura 20 : Ejemplo de hidrograma

Si hay más de una variable calculada tenemos la opción de seleccionar la deseada en la lista desplegable « Show » que se encuentra en el mismo cuadro de diálogo.

Capítulo 6

Ejemplos de aplicación

En este capítulo proponemos algunos ejemplos de aplicación con el fin de profundizar en los conocimientos del programa. Estos ejemplos básicos están destinados a facilitar el aprendizaje del programa *Routing System II*, estando organizados según un orden de dificultad creciente.

La utilización de *Routing System II* en el estudio de casos reales ha evidenciado la capacidad del programa para reproducir correctamente el comportamiento real de cuencas vertientes. Además, este programa facilita la búsqueda de escenarios de funcionamiento determinantes y puede optimizar de una manera satisfactoria sistemas complejos.

Este capítulo contiene tres ejemplos con fines didácticos.

Contenido

- Ejemplo 1- Transferencia y transporte
- Ejemplo 2- Producción, transferencia y transporte
- Ejemplo 3- Construcción de submodelos

Ejemplo 1 – Transferencia y transporte

En el primer ejemplo el objetivo es modelizar la transferencia lluvia neta-caudal sobre dos superficies impermeables, el transporte de los hidrogramas en los cursos de agua, la suma de las dos contribuciones en una confluencia y su transporte final hasta el punto de desagüe representado por un lago (*Figura 21*).

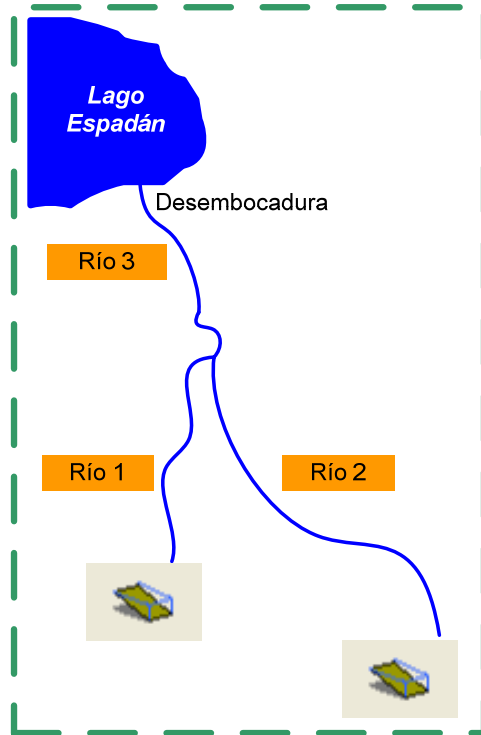


Figura 21 : Esquema del modelo

Admitimos que las dos superficies impermeables se encuentran en la misma región y que por lo tanto reciben una precipitación idéntica. Cada superficie tiene su punto de desagüe en un cauce diferente, uniéndose posteriormente en un último tramo antes de desembocar en un lago. Los parámetros y las variables de estado de las dos superficies, de los 3 cursos de agua y los datos de la precipitación son facilitados en la *Tabla 1*. Los 3 cursos de agua son modelizados con el modelo de onda cinemática.

Capítulo 6 - Ejemplos de aplicación

El resultado solicitado es el hidrograma en el punto de desagüe del modelo (punto de desembocadura al lago) durante las 24 horas posteriores al inicio de la precipitación.

Tabla 1 : Características de los objetos

Precipitación

| t(h) | lluvia (mm/h) |
|------|---------------|
| 0 | 0 |
| 1 | 1.08 |
| 2 | 1.44 |
| 3 | 1.80 |
| 4 | 2.88 |
| 5 | 5.40 |
| 6 | 8.28 |
| 7 | 9.97 |
| 8 | 6.84 |
| 9 | 5.04 |
| 10 | 3.24 |
| 11 | 2.63 |
| 12 | 1.44 |
| 13 | 0.72 |
| 14 | 0 |

SWMM 1

| Param. | Valor | Unid. |
|--------|----------|---------------------|
| Área | 1.00E+07 | m ² |
| Long. | 1500 | m |
| JO | 0.1 | - |
| K | 1.9 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

SWMM 2

| Param. | Valor | Unid. |
|--------|----------|---------------------|
| Área | 4.00E+06 | m ² |
| Long. | 3000 | m |
| JO | 0.05 | - |
| K | 1.5 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

Río 1

| Param. | Valor | Unid. |
|--------|-------|---------------------|
| BO | 6 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 3000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Río 2


| Param. | Valor | Unid. |
|--------|-------|---------------------|
| BO | 4 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.005 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 6000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Río 3

| Param. | Valor | Unid. |
|--------|-------|---------------------|
| BO | 7 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |


Resolución del Ejemplo 1

Este primer ejemplo es una representación simplificada de la realidad. A pesar de ello permite familiarizarse con el concepto de *Routing System II* y conocer algunos de sus objetos hidráulicos e hidrológicos.

Comenzamos creando el objeto « *Serie temporal* » . Clicando una vez sobre su icono de la *Paleta de objetos* creamos el objeto en la interfaz gráfica. Haciendo doble clic en este objeto abrimos su cuadro de diálogo asociado, donde introducimos los valores « *tiempo (s)* – *lluvia neta (m/s)* » en las unidades empleadas por *Routing System II* (Figura 22).

| Serie | | |
|-------|----------|----------|
| | Time (s) | i (m/s) |
| ▶ | 0 | 0 |
| | 3600 | 3E-07 |
| | 7200 | 4E-07 |
| | 10800 | 5E-07 |
| | 14400 | 9E-07 |
| | 18000 | 1.5E-06 |
| | 21600 | 2.3E-06 |
| | 25200 | 2.77E-06 |
| | 28800 | 1.9E-06 |
| | 32400 | 1.4E-06 |
| | 36000 | 9E-07 |
| | 39600 | 7.3E-07 |
| | 43200 | 4E-07 |
| | 46800 | 2E-07 |
| | 50400 | 0 |

Figura 22 : Valores de la « *Serie temporal* »

A continuación creamos las dos superficies de escorrentía mediante el objeto « *SWMM* » . Para cada una definimos los parámetros haciendo doble clic en el objeto correspondiente e introduciéndolos en el cuadro de diálogo.



Después incorporamos los tres cursos de agua seleccionando el modelo « *Onda cinemática* » . De nuevo habrá que clicar una vez sobre el icono deseado de la *Paleta de objetos* para crearlo y dos veces sobre el nuevo objeto de la interfaz gráfica para abrir su cuadro de diálogo. Los parámetros propuestos se encuentran en la *Tabla 1*. Introducimos igualmente el caudal inicial (Q_{mi}) para cada curso de agua. Finalizamos el modelo con la inclusión de dos objetos « *Confluencia* » . La interfaz gráfica tiene este aspecto (Figura 23):



Figura 23 : *Interfaz gráfica Routing System II con los nuevos objetos*

Tras crear los nuevos objetos, establecemos las conexiones o uniones topológicas. Para ello pulsamos la barra espaciadora del teclado y el cursor en forma de flecha se transforma en una cruz. A continuación clicamos del objeto « *Serie temporal* » al objeto « *SWMM 1* » para crear su unión topológica, apareciendo una flecha en la interfaz gráfica entre los dos objetos. Conectamos de la misma manera los demás objetos (*Figura 24*). Haciendo doble clic en las flechas verificamos una transferencia de intensidad entre « *Serie temporal* » y las dos superficies de escorrentía y un transferencia de caudal entre todos los demás objetos. Estas transferencias siempre se producen de aguas arriba a aguas abajo (« *Transfert Up-Down* »).

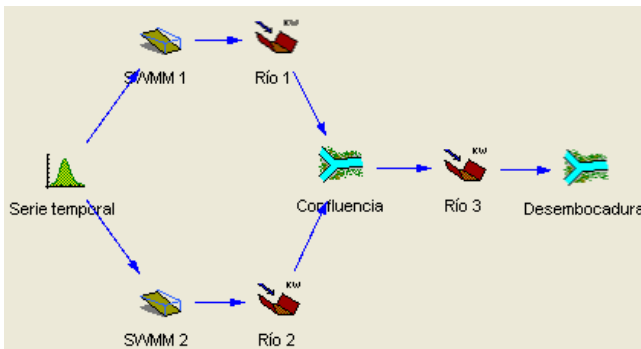


Figura 24 : *Uniones topológicas entre los diferentes objetos del modelo*

Antes de efectuar el cálculo modificamos los parámetros de la simulación (fechas) clicando sobre *Solver* → *Edit Solver*. Como « *Date Start* » proponemos una fecha cualquiera, eligiendo la « *Date End* » 24 horas más tarde para tener una simulación con una duración de 24 horas. Como intervalos de tiempo (para cálculo y copia de datos) dejaremos los propuestos por el programa, 600 s en los dos casos. Finalmente iniciamos la simulación clicando sobre el botón *Solver* → *Solve*.

Para acceder a los resultados de cálculo de cada objeto es suficiente con clicar en cualquiera de ellos. Por ejemplo, haciendo doble clic en el objeto *Desembocadura* se abre su cuadro de diálogo con el hidrograma simulado mostrado a continuación (Figura 25):

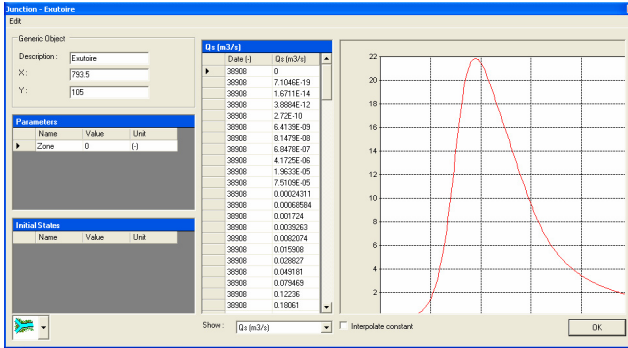


Figura 25 : Resultados de la simulación en la desembocadura del modelo

El hidrograma en la desembocadura (Figura 26) muestra una laminación inicial de la lluvia neta debido a las superficies impermeables, siendo después casi nula en los de cursos de agua debido al modelo empleado de onda cinemática. Para tratar los resultados es necesario exportar los hidrogramas hacia otros programas (Excel u similares). Esto se realiza fácilmente clicando en la esquina superior izquierda de la tabla de resultados con el botón derecho del ratón y eligiendo la opción « Copiar ». Abriendo por ejemplo *Excel*, podemos copiar esa tabla con el célebre *Control+V*.

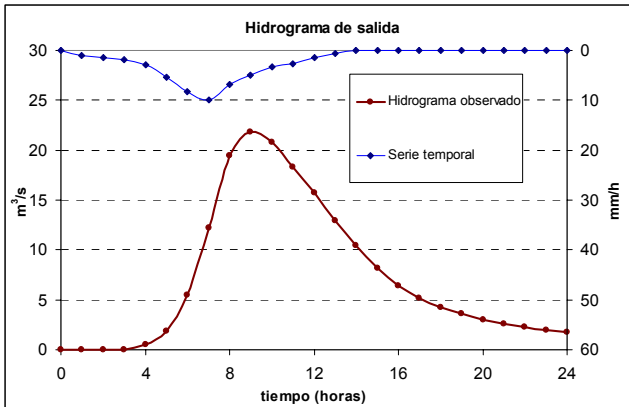


Figura 26 : Resultados superpuestos de lluvia neta e hidrograma en la desembocadura

Ejemplo 2 – Producción, transferencia y transporte

El objetivo del *ejemplo 2* es crear un modelo hidrológico de producción (fusión de nieve, glaciér e infiltración), transferencia y transporte de flujo para calcular el caudal creado sobre una cuenca vertiente en función de unas precipitaciones y temperaturas determinadas. Se trata de realizar un modelo hidrológico con dos subcuencas vertientes que desembocan en el mismo cauce. Representamos este modelo en la *Figura 27*.

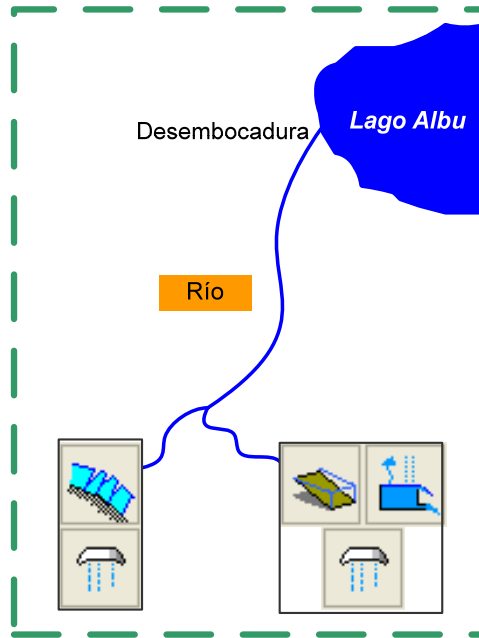


Figura 27 : Esquema del modelo

La primera subcuenca se compone de un modelo de nieve y de un glaciér y la segunda de un modelo de nieve, uno de infiltración y un último de escorrentía superficial. Las dos subcuencas desembocan en el mismo lugar dando lugar a un curso de agua que alcanza el punto de desagüe.

Los parámetros de los objetos son proporcionados en la *Tabla 2* y los datos de precipitación y temperatura se encuentran en la base de datos « *BD Horaria 2000* ».

Capítulo 6 - Ejemplos de aplicación

El objetivo de este ejemplo es determinar el hidrograma en el punto de desagüe del sistema durante el periodo comprendido entre el 04.03.2000 00.00h y el 15.03.2000 00.00h.

Tabla 2 : Características de los objetos

Estación 1

| Parámetros | Valor | Unid. |
|------------|---------|-------|
| X | 606482 | m |
| Y | 92777 | m |
| Z | 3035 | m |
| Radio | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Estación 2

| Parámetros | Valor | Unid. |
|------------|---------|-------|
| X | 602508 | m |
| Y | 110222 | m |
| Z | 1247 | m |
| Radio | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Modelo Nieve 1

| Parámetros | Valor | Unid. |
|------------|--------|----------------|
| An | 10 | mm/C/día |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m ² |
| Thetaini | 0 | (-) |

Modelo Nieve 2

| Parámetros | Valor | Unid. |
|------------|--------|----------|
| An | 10 | mm/C/día |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m |
| Thetaini | 0 | (-) |

Glaciar

| Parámetros | Valor | Unid. |
|--------------|----------|-------------------|
| A | 4.00E+06 | m ² |
| Agl | 6 | mm/C/día |
| Kgl | 0.8 | (-) |
| Kn | 0.8 | (-) |
| Qini,glaciar | 0 | m ³ /s |
| Qini,nieve | 0 | m ³ /s |

GR3

| Parámetros | Valor | Unid. |
|------------|----------|----------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| hMax | 0.3 | m |
| K | 0.00025 | (-) |
| Hini | 0.2 | m |





SWMM

| Parámetros | Valor | Unid. |
|------------|----------|---------------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| L | 1000 | m |
| Jo | 0.1 | (-) |
| K | 2 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

Rivière

| Parámetros | Valor | Unid. |
|------------|-------|---------------------|
| BO | 5 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/5} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Resolución del Ejemplo 2

En primer lugar realizamos la subcuenca con el modelo de nieve y el modelo glaciar. Los objetos creados son: « Estación » , « Nieve » , « Glaciar »  y « Confluencia » . Después introducimos los parámetros asociados a cada uno de ellos y conectamos los objetos según indica la *Figura 28*:

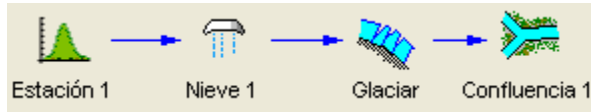


Figura 28 : Uniones topológicas entre los diferentes objetos

Las relaciones creadas entre los objetos (*Figura 29*) son visualizadas haciendo doble clic en cada flecha:

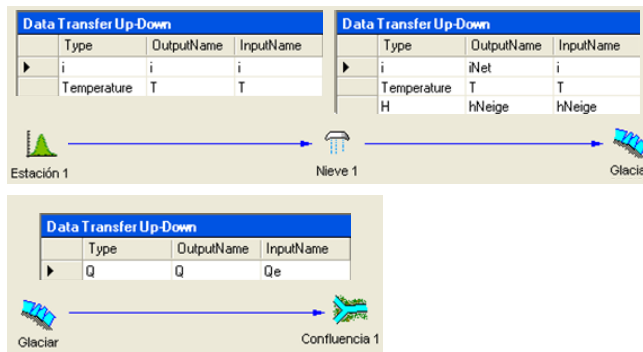







Figura 29 : Relaciones entre objetos

En segundo lugar construimos la subcuenca con el modelo de nieve, el modelo de infiltración y el modelo de escorrentía superficial. Para su realización creamos los objetos: « Estación » , « Nieve » , « GR3 » , « SWMM »  y « Confluencia » , introduciendo los parámetros asociados a cada objeto y uniéndolos según el esquema de la *Figura 30*:

Capítulo 6 - Ejemplos de aplicación

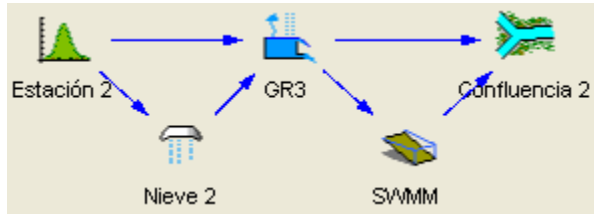


Figura 30 : Uniones topológicas entre los diferentes objetos

Las características de las relaciones creadas en este caso son (Figura 31):

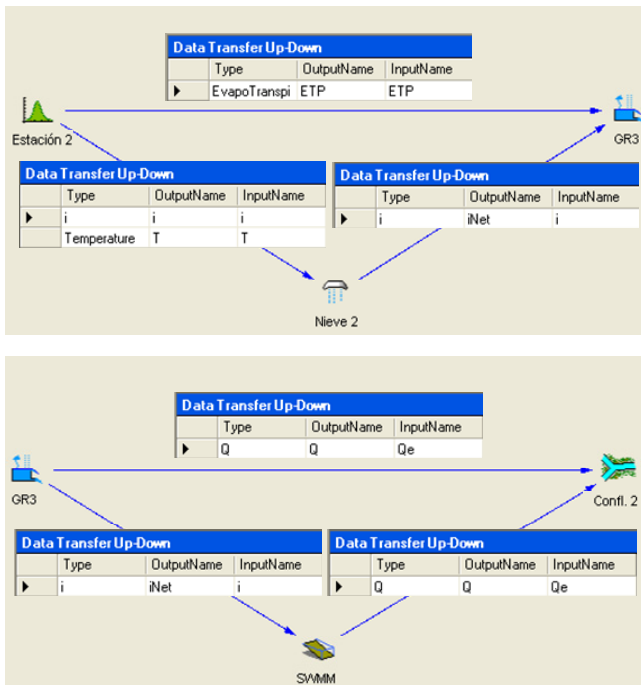




Figura 31 : Relaciones entre objetos

Agregamos los objetos «Curso de agua»  (onda cinemática) y «Confluencia»  antes de reordenar y unir todos los objetos según se presenta en la Figura 32:

Capítulo 6 - Ejemplos de aplicación

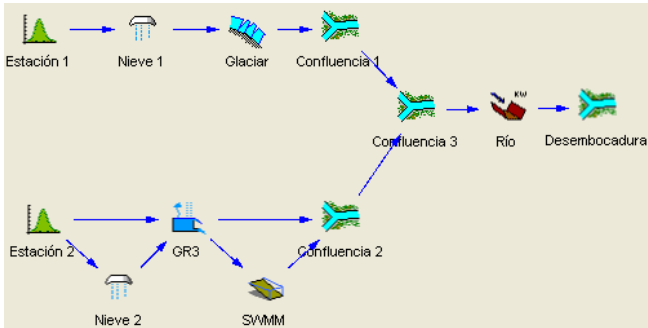



Figura 32 : Topología del modelo de Producción, transferencia y transporte

Las últimas relaciones creadas aguas arriba y aguas abajo del «Curso de agua» permiten la transferencia de caudal.

Guardamos el modelo construido clicando en el menú *File* → *Save As...* con el nombre de “Ejemplo 2”. De esta manera el modelo podrá ser cargado posteriormente para realizar nuevas simulaciones.

Antes de lanzar el cálculo abrimos el cuadro de diálogo de la base de datos clicando en  o mediante el menú *File* → *Data Environment* para posteriormente cargar el fichero correspondiente a partir del menú *File* → *Open Access*. Únicamente queda determinar los parámetros de la simulación en el menú *Solver* → *Edit Solver*, donde elegimos las fechas indicadas en el enunciado del ejemplo. En este instante es posible iniciar la simulación clicando en el botón *Solver* → *Solve*.

Una vez terminado el cálculo podemos ver, entre otros, el hidrograma en el punto de desagüe del sistema (*Figura 33*). También podemos conservar los resultados guardando de nuevo el modelo (*File* → *Save*).

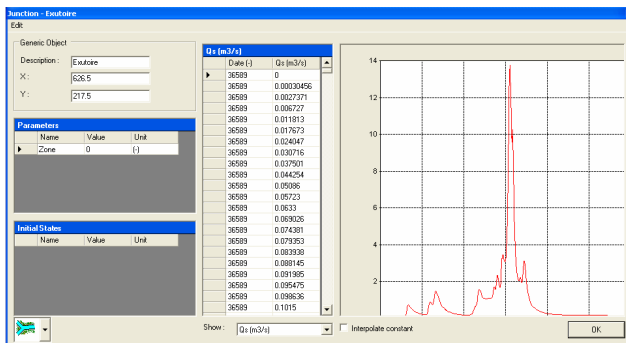


Figura 33 : Hidrograma en el punto de desagüe del sistema

Ejemplo 3 – Construcción de submodelos

En este ejemplo el objetivo es descubrir el potencial de *Routing System II* para la jerarquización de los componentes de una cuenca vertiente más complicada. Se trata de realizar un modelo compuesto de dos submodelos (subcuenas vertientes) conectados a dos cursos de agua que se unen en un último cauce antes de llegar a un lago. Sobre uno de los cursos de agua construimos un aprovechamiento hidroeléctrico (*Figura 34*).

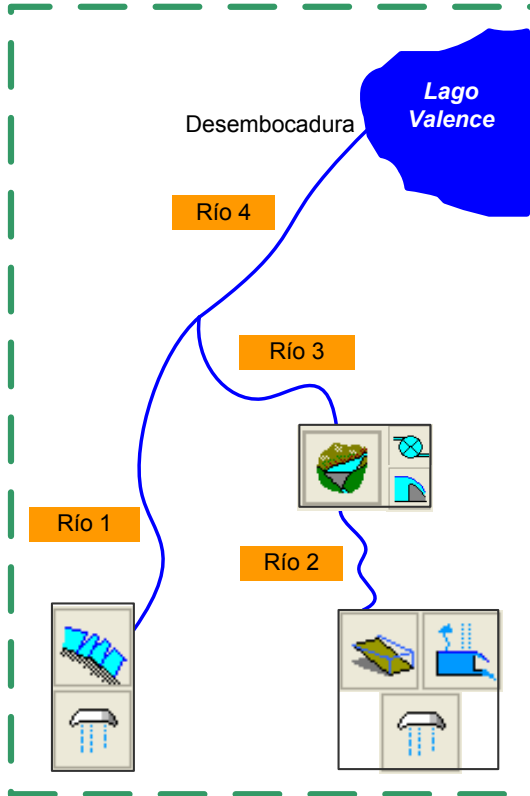


Figura 34 : Esquema del modelo

El primer submodelo es una subcuenca vertiente compuesta de un modelo de nieve y de un modelo glaciario, aguas abajo del cual se encuentra el *Río 1*.

El segundo submodelo es una subcuenca vertiente compuesta de un modelo de nieve, un modelo de infiltración y un modelo de escorrentía superficial. De este submodelo nace el *Río 2* sobre el que construimos

un embalse, con una turbina y un aliviadero, aguas abajo del cual se encuentra el *Río 3*.

Los dos cauces se unen al inicio del *Río 4*, que fluye hasta el punto de desagüe del modelo.

Todos los parámetros de los diferentes objetos son proporcionados en la *Tabla 3*. Los datos de temperaturas y precipitaciones se encuentran en la base de datos « *BD Horaria 2000* ».

El resultado esperado en este ejemplo es el cálculo de los hidrogramas de salida de las dos subcuencas vertientes y del aliviadero, así como el producido en el punto de desagüe del sistema para el periodo comprendido entre el 04.03.2000 00.00h y el 15.03.2000 00.00h.

Tabla 3 : Características de los objetos

Estación 1

| Parám. | Valor | Unid. |
|-----------|---------|-------|
| X | 606482 | m |
| Y | 92777 | m |
| Z | 3035 | m |
| Radio | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Estación 2

| Parám. | Valor | Unid. |
|-----------|---------|-------|
| X | 602508 | m |
| Y | 110222 | m |
| Z | 1247 | m |
| Radio | 50000 | m |
| Grad i | 0 | m/s/m |
| Grad T | -0.0065 | C/m |
| Grad ETP | 0 | m/s/m |
| Coeff i | 1 | (-) |
| Coeff T | 1 | (-) |
| Coeff ETP | 1 | (-) |

Modelo Nieve 1

| Parám. | Valor | Unid. |
|-----------|--------|----------|
| An | 10 | mm/C/día |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m |
| Thetalni | 0 | (-) |

Modelo Nieve 2

| Parám. | Valor | Unid. |
|-----------|--------|----------|
| An | 10 | mm/C/día |
| ThetaCrit | 0.1 | (-) |
| bp | 0.0125 | (-) |
| hlni | 0 | m |
| Thetalni | 0 | (-) |

Glaciar

| Parám. | Valor | Unid. |
|--------------|----------|-------------------|
| A | 4.00E+06 | m ² |
| Agl | 6 | mm/C/día |
| Kgl | 0.8 | (-) |
| Kn | 0.8 | (-) |
| Qini,glaciar | 0 | m ³ /s |
| Qini,nieve | 0 | m ³ /s |

GR3

| Parám. | Valor | Unid. |
|--------|----------|----------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| hMax | 0.3 | m |
| K | 0.00025 | (-) |
| Hini | 0.2 | m |

SWMM

| Parám. | Valor | Unid. |
|--------|----------|---------------------|
| A | 9.00E+06 | m ² |
| L | 1000 | m |
| Jo | 0.1 | (-) |
| K | 2 | m ^{1/3} /s |
| Hini | 0 | m |

Capítulo 6 - Ejemplos de aplicación

Embalse

| Parám. | Valor | Unid. |
|--------|--------|-------|
| hini | 1435.5 | m |

| H (ma.s.l.) | V (m3) |
|-------------|----------|
| 1360 | 0 |
| 1380 | 1.10E+06 |
| 1400 | 2.90E+06 |
| 1420 | 5.50E+06 |
| 1440 | 9.00E+06 |

Vertedero

| H (ma.s.l.) | Q (m3) |
|-------------|--------|
| 1436 | 0 |
| 1437 | 5 |
| 1438 | 25 |
| 1439 | 100 |
| 1440 | 250 |

Serie temp. turbina

| Time (s) | Q (m3/s) |
|----------|----------|
| 0 | 1 |
| 3.00E+06 | 1 |

Río 1

| Parám. | Valor | Unid. |
|--------|-------|---------------------|
| BO | 5 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Río 2

| Parám. | Valor | Unid. |
|--------|-------|---------------------|
| BO | 25 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Río 3

| Parám. | Valor | Unid. |
|--------|-------|---------------------|
| BO | 25 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 4000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Río 4

| Parám. | Valor | Unid. |
|--------|-------|---------------------|
| BO | 30 | m |
| m | 1 | - |
| JO | 0.001 | - |
| K | 30 | m ^{1/3} /s |
| L | 2000 | m |
| Qini | 0 | m ³ /s |

Resolución del Ejemplo 3

- Creación del primer submodelo






En primer lugar construimos la subcuenca vertiente con los modelos de nieve y glaciar. Los objetos creados son: « Estación » , « Nieve » , « Glaciar » , « Confluencia » , y « GroupInterface » , cada uno a completar con sus parámetros propios. Después conectamos los distintos objetos como en la Figura 35:



Figura 35 : Uniones topológicas entre los diferentes objetos

Las relaciones creadas (Figura 36) pueden ser visualizadas haciendo doble clic en cada flecha:

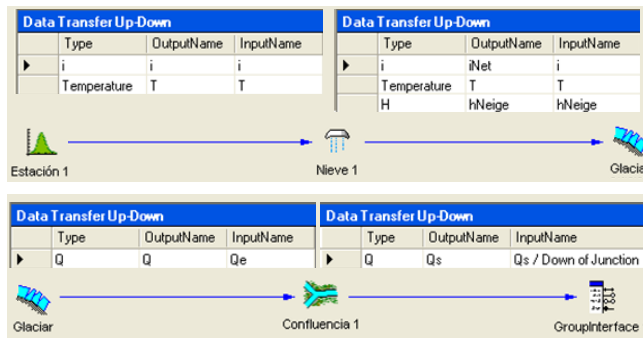



Figura 36 : Relaciones entre objetos

Todas las relaciones se crean automáticamente salvo las relaciones con los « GroupInterface » en las que tenemos que seleccionar el parámetro adecuado (caudal) de la lista despegable que aparece al hacer la conexión.

A continuación, guardamos la subcuenca como submodelo mediante el menú *Model* → *Save Sub Model as...*, dándole el nombre de «SbMglac». De esta forma será posible recuperarlo posteriormente. Tras ello borramos el modelo de la interfaz gráfica mediante el icono « Nuevo modelo » , estando en disposición de construir nuestro segundo submodelo.

- Creación del segundo submodelo

El segundo submodelo contiene él mismo un submodelo que realizaremos en primer lugar. Se trata de un submodelo compuesto de los modelos de infiltración y escorrentía. Para construirlo seleccionaremos los objetos «GR3», «SWMM», «Confluencia», y «GroupInterface» dos veces, uniéndolos como en la Figura 37:

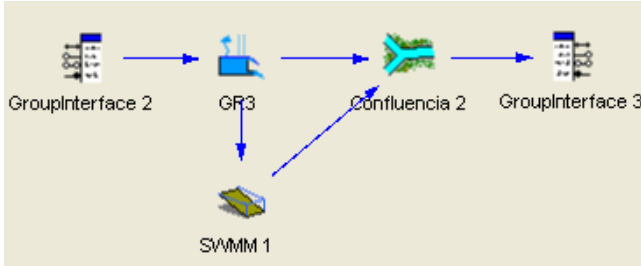


Figura 37 : Uniones topológicas entre los diferentes objetos

Las relaciones creadas son (Figura 38):

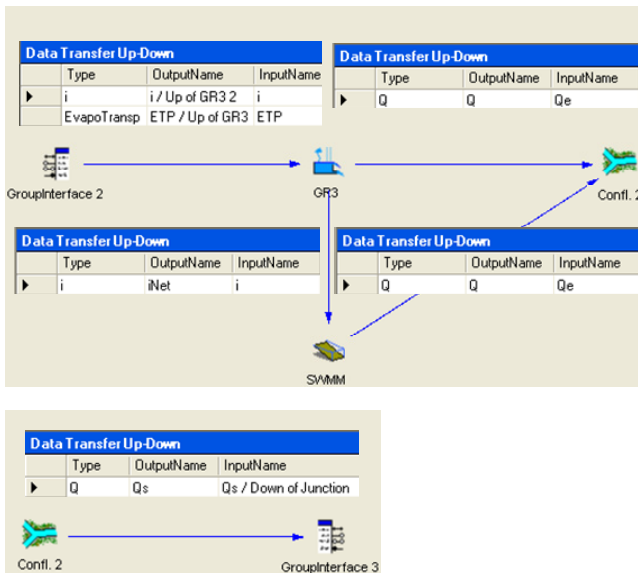










Figura 38: Relaciones entre objetos

Guardamos este submodelo gracias al menú *Model* → *Save Sub Model as...*, con el nombre de “*SbMsoc*”.

Ahora ya es posible construir la segunda subcuenca borrando una vez más el contenido de la interfaz gráfica con el botón « *Nuevo modelo* » . Los objetos que creamos esta vez son: « *Estación* » , « *Nieve* » , « *Confluencia* » , « *GroupInterface* »  y « *Submodelo* » . Clicando sobre este último icono abrimos un cuadro de diálogo desde el que podemos cargar el submodelo construido precedentemente, “*SbMsoc*”. Para representar de una manera correcta este nuevo objeto podemos modificar algunas de sus características haciendo doble clic en el mismo y seleccionando acto seguido la opción del menú *Model* → *Edit as Object*. De esta manera abrimos un cuadro de diálogo. Utilizando el menú desplegable situado en la esquina inferior izquierda podemos cambiar el icono general de submodelo por . Para volver al nivel jerárquico precedente es suficiente con utilizar el botón de « *Retorno al nivel jerárquico superior* » .

Ahora conectamos los objetos entre ellos según la *Figura 39*:

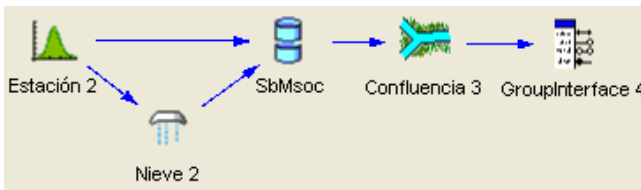


Figura 39: Uniones topológicas entre los diferentes objetos

Las relaciones que deben existir son (Figura 40):

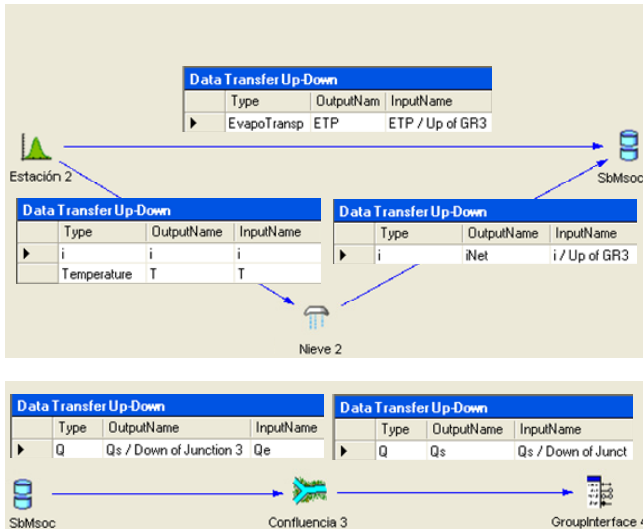


Figura 40: Relaciones entre objetos

Guardamos esta subcuenca como submodelo con el menú *Model* → *Save Sub Model as...* con el nombre de "SbMnoglac". Borramos de nuevo la interfaz gráfica con el icono « Nuevo modelo »

- Creación del modelo final

Todos los elementos son finalmente reunidos para construir el modelo completo con las dos subcuenca vertientes (Figura 41). En primer lugar importaremos las dos subcuenca construidas precedentemente ("SbMglac" y "SbMnoglac") gracias al icono « Submodelo » de la Paleta de objetos, modificando la forma del icono () como hemos visto anteriormente.

Además añadimos los objetos « Embalse » , « Vertedero » , « Turbina » , « Serie temporal » , « Curso de agua » 4 veces y « Confluencia » 9 veces , cada uno con sus parámetros correspondientes.

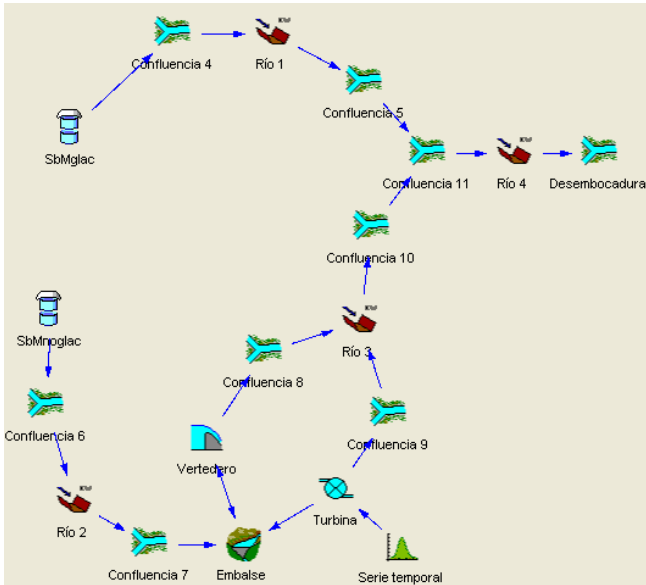


Figura 41: Imagen del modelo completo del ejemplo 3

Las nuevas relaciones son de transferencia de caudal, hechas automáticamente durante la unión de los objetos. Las excepciones son las transferencias entre el embalse y el vertedero y entre el embalse y la turbina, que en todo caso son creadas automáticamente al realizar la unión del embalse hacia los otros dos objetos como hacemos habitualmente, según el sentido del flujo (Figura 42).

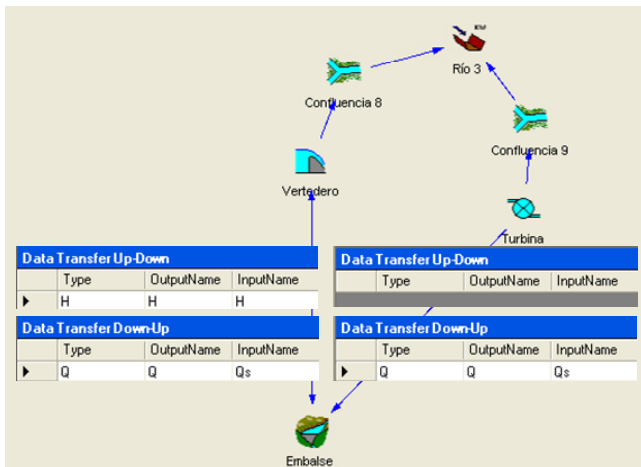



Figura 42 : Relaciones entre objetos

Capítulo 6 - Ejemplos de aplicación

Finalizada la construcción (*Figura 41*), guardamos el modelo con el menú *File* → *Save As...* dándole el nombre de “*Ejemplo 3*”. A partir de ahora, este modelo podrá ser utilizado cuantas veces queramos para realizar simulaciones.

La última etapa consiste en cargar la base de datos clicando en  o con el menú *File* → *Data Environment...* y luego en *File* → *Open Access* para seleccionar el fichero « *BD Horaria 2000* ».

Por último escogemos los parámetros necesarios de la simulación en el menú *Solver* → *Edit Solver* según las fechas propuestas en el enunciado, dejando los otros valores (intervalos de tiempo) como indica el programa, siendo 600 s en los dos casos.

- Inicio de la simulación y resultados

Iniciamos la simulación clicando en el botón *Solver* → *Solve*. Todos los resultados pueden ser visualizados haciendo doble clic en los objetos correspondientes (*Figuras 43 a 46*).

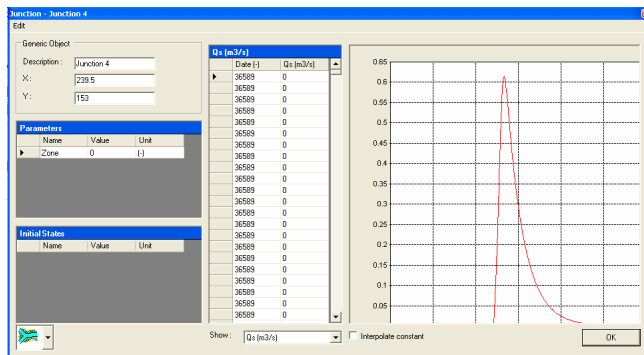


Figura 43: Hidrograma en la salida de la primera cuenca vertiente

Capítulo 6 - Ejemplos de aplicación

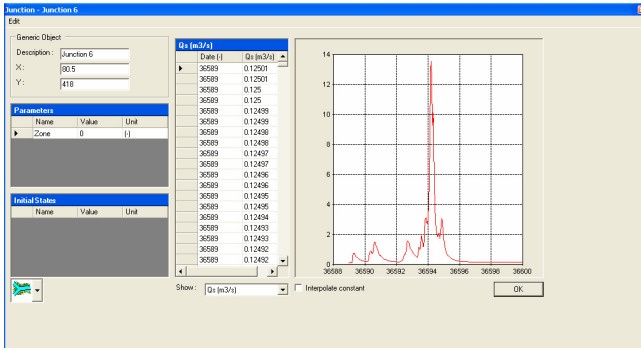


Figura 44: Hidrograma en la salida de la segunda cuenca vertiente

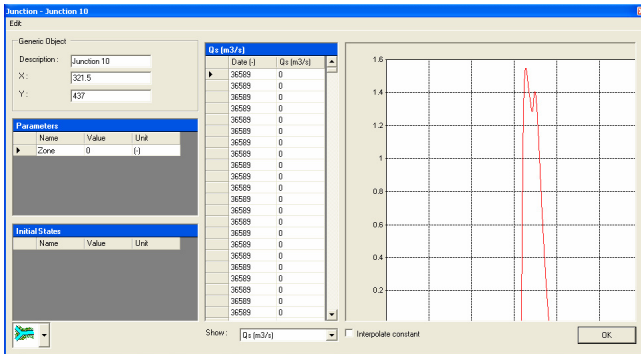


Figura 45: Hidrograma en la salida del vertedero

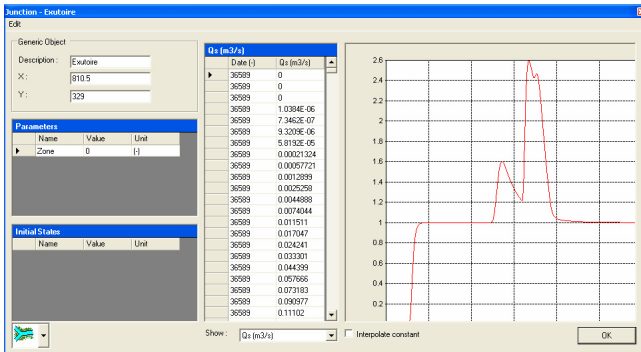


Figura 46: Hidrograma en el punto de desagüe del modelo

Bibliografía

Bérod, D. (1994). Contribution à l'estimation des crues rares à l'aide de méthodes déterministes. Apport de la description géomorphologique pour la simulation des processus d'écoulement, Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

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.

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.

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., Boillat, J.L. (2000). Routing System: Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre. Ed. Dr A. Schleiss.

Hamdi, Y., Hingray, B., and Musy, A. (2003). Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°1 volet B : Modélisation hydrologique, Technical report, EPFL.

Hamdi, Y., Hingray, B., and Musy, A. (2005). Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°3 volet B : Modélisation hydrologique, Technical report, EPFL.

Jordan, F. (2007). *Modèle de prévision et de gestion des crues - optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue*, Ph.D. Thesis N°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

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.

Bibliografia

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.

Schäfli, B., Hingray, B., Niggli, M. and Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 2: 73-117.

- N° 21 2005 Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues
- N° 22 2005 INTERREG IIIB - Projet ALPRESERV. Conférence sur la problématique de la sédimentation dans les réservoirs - Gestion durable des sédiments dans les réservoirs alpins
- N° 23 2005 Master of Advanced Studies (MAS) in hydraulic schemes
Collection des articles des travaux de diplôme
- N° 24 2006 S. Sayah
Efficiency of brushwood fences in shore protection against wind-wave induced erosion
- N° 25 2006 P. Manso
The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets
- N° 26 2006 M. Andaroodi
Standardization of civil engineering works of small high-head hydropower plants and development of an optimization tool
- N° 27 2006 Symposium érosion et protection des rives lacustres
Bases de dimensionnement des mesures de protection des rives lacustres
- N° 28 2007 A. Vela Giró
Bank protection at the outer side of curved channels by an undulated concrete wall
- N° 29 2007 F. Jordan
Modèle de prévision et de gestion des crues - Optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue
- N° 30 2007 P. Heller
Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements hydrauliques à buts multiples
- N° 31 2007 P. Heller
Analyse qualitative des systèmes complexes à l'aide de la méthode de Gomez & Probst
- N° 32 2007 J. García Hernández, F. Jordan, J. Dubois, J.-L. Boillat
Routing System II - Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques



ISSN 1661-1179

Prof. Dr A. Schleiss
Laboratoire de constructions hydrauliques - LCH
EPFL, Bât. GC, Station 18, CH-1015 Lausanne
<http://lchwww.epfl.ch>
e-mail: secretariat.lch@epfl.ch