

Modélisation pluie-débit distribuée avec le logiciel ATHYS

Application au Gardon à Anduze

L'ATelier HYdrologique Spatialisé, ATHYS, a pour objectif de réunir dans un environnement convivial et homogène un ensemble de modèles hydrologiques associés à des traitements de données hydro-climatiques et géographiques. Il a été développé à l'IRD pour des applications diverses : gestion de la ressource en eau, prévision des événements extrêmes, études d'impact liées à des modifications anthropiques ou climatiques.



SOMMAIRE

INTRODUCTION	2
1. GENERALITES SUR LES MODELES	3
1.1. Définitions et objectifs.....	3
1.2. Types de modèles	5
1.3. Principes des modèles ATHYS	8
1.4. Présentation détaillée du modèle SCS-LR.....	12
1.4.1. <i>Fonction de production type SCS</i>	12
1.4.2. <i>Fonction de transfert Lag and route</i>	14
2. LOGICIEL ATHYS	16
2.1. Installation ATHYS	17
2.2. Présentation des données	20
2.3. Introduction à VISHYR.....	25
2.4. Introduction à VICAIR.....	27
2.5. Introduction à MERCEDES	31
2.5.1. <i>Menu 1 : Bassin Versant</i>	32
2.5.2. <i>Menu 2 : Pluies et Débits</i>	33
2.5.3. <i>Menu 3 : Paramètres Modèles</i>	35
2.5.4. <i>Menu 4 : Optimisation</i>	38
2.5.5. <i>Menu 5 : Analyse de sensibilité</i>	40
2.5.6. <i>Menu 6 : Fichiers en sortie</i>	42
2.6. Exercices d'application.....	44
3. CALIBRATION DU MODELE SCS-LR	46
3.1. Sensibilité des crues aux incertitudes sur les paramètres	46
3.2. Calibration du modèle d'après les observations.....	47
3.3. Evaluation finale du modèle	52
3.4. Prise en compte de la variabilité événementielle d'un paramètre dans MERCEDES	53
4. IMPACT DU SPATIAL	56
4.1. Impact de l'organisation spatiale de la pluie	56
4.2. Impact de la variabilité spatiale des sols.....	57
4.3. Impact de modifications climatiques ou géographiques.....	60
4.4. Réflexions sur l'échantillonnage des données	62
4.4.1. <i>Sensibilité à la discrétisation spatiale du bassin</i>	62
4.4.2. <i>Sensibilité à la résolution spatiale des pluies radar</i>	63
5. APPLICATION DU MODELE DE L'ONDE CINEMATIQUE (TRANSFERT)	67
5.1. Présentation du modèle.....	67
5.2. Application à la simulation de l'impact de retenues	69
6. APPLICATION DU MODELE DE GREEN & AMPT (PRODUCTION)	74
7. APPLICATION DE TOPMODEL (PRODUCTION)	79
8. PREPARATION DES DONNEES	82
8.1. Préparation des données géographiques	82
8.2. Préparation des données hydro-pluviométriques.....	88
9. ORGANISATION DU PROGRAMME ET RECOMPILATION	92
10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

Introduction

Le but du présent manuel est de présenter un didacticiel pour la mise en œuvre des modèles hydrologiques spatialisés. Le logiciel ATHYS propose un environnement homogène et convivial, susceptible de faciliter la mise en œuvre des modèles spatialisés sur des bassins très divers, de comparer leurs performances ou leur adéquation aux applications envisagées - ressource, risque ou étude d'impact-. ATHYS comprend 4 modules, dont 3 sont présentés dans ce manuel, la plate-forme de modélisation Mercedes, le module de traitement des séries chronologiques Vishyr, le module de traitement des données géographiques spatialisées Vicair.

Outre la présentation des aspects techniques du logiciel, le manuel de formation a aussi pour objectif de sensibiliser à la modélisation pluie-débit en général, spatialisée en particulier. On trouvera en particulier des rappels (pour les uns) ou une introduction (pour les autres) à la modélisation, ainsi que la description de différents modèles, et dans une certaine mesure leurs avantages ou leurs inconvénients. Les questions concernant l'utilité et les limites des modèles spatialisés – que spatialiser, ou ne pas spatialiser ; pour quel gain ? – sont illustrées à travers différents exemples, susceptibles d'enrichir la réflexion sur la modélisation hydrologique.

Nota 1 : ce manuel a été écrit par Christophe Bouvier (IRD/HSM). Anne Crespy (IRD/HSM), Agnès Crès (IRD/HSM), François-Noel Crès (Polytech'Montpellier) y ont également contribué, en intervenant dans la rédaction du manuel ou en développant le logiciel ATHYS. Ce manuel pourra être cité sous la référence :

Christophe Bouvier, Anne Crespy, Agnès Crès, François-Noel Crès, 2020. Modélisation pluie-débit distribuée avec le logiciel ATHYS. Application au Gardon à Anduze. Manuel de formation, HydroSciences Montpellier, 93 pages.

Nota 2 : une documentation technique plus détaillée est fournie avec le logiciel, sous la forme de pages HTML accessibles après avoir téléchargé le logiciel. Cette documentation constitue un complément utile à ce manuel de formation.

Nota 3 : le développement du logiciel ATHYS n'aurait pas été possible sans le soutien du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable et sans celui du Service Hydrométéorologique d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), qui ont appuyé financièrement l'opération, participé aux orientations scientifiques et techniques, et fourni la plupart des données utilisées dans ce manuel. Merci à celles et à ceux qui nous ont soutenus.

Nota 4 : les informations et résultats présentés dans ce manuel ont principalement une vocation pédagogique, et ne doivent pas être considérés comme des résultats scientifiques définitifs et rigoureux. Les auteurs ne pourront être tenus pour responsables de toute utilisation du manuel autre que pédagogique.

1. GENERALITES SUR LES MODELES

1.1. Définitions et objectifs

Qu'est-ce qu'un modèle mathématique ?

"Ensemble d'équations rendant compte d'un phénomène complexe et permettant d'en décrire les caractères et d'en prévoir les évolutions".

Dans le cas d'un modèle pluie-débit, cet ensemble d'équations relie les variables d'entrée (ou variables de forçage, e.g. les pluies) aux variables de sortie (ou pronostiques, e.g. les débits), en tenant compte de variables d'état (ou variables internes, e.g. l'humidité du bassin, croissance de la végétation, niveau de remplissage des retenues...) du système.

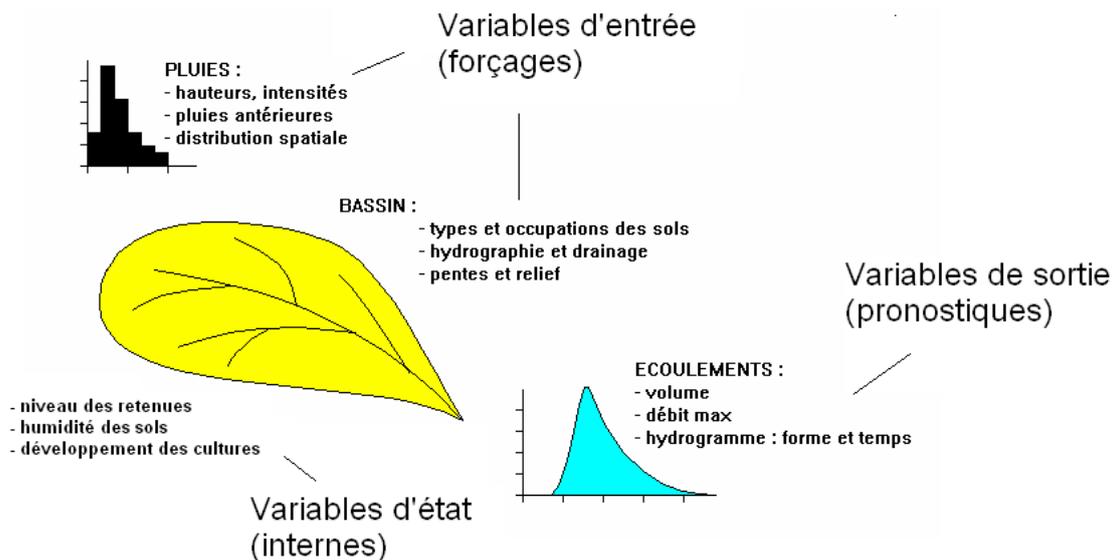


Figure 1-1

Un modèle pluie-débit est généralement constitué d'une fonction de production (qui transforme la précipitation en pluie efficace, disponible au ruissellement) et d'une fonction de transfert (qui achemine la pluie efficace à l'exutoire, et reconstitue la dynamique de la crue).

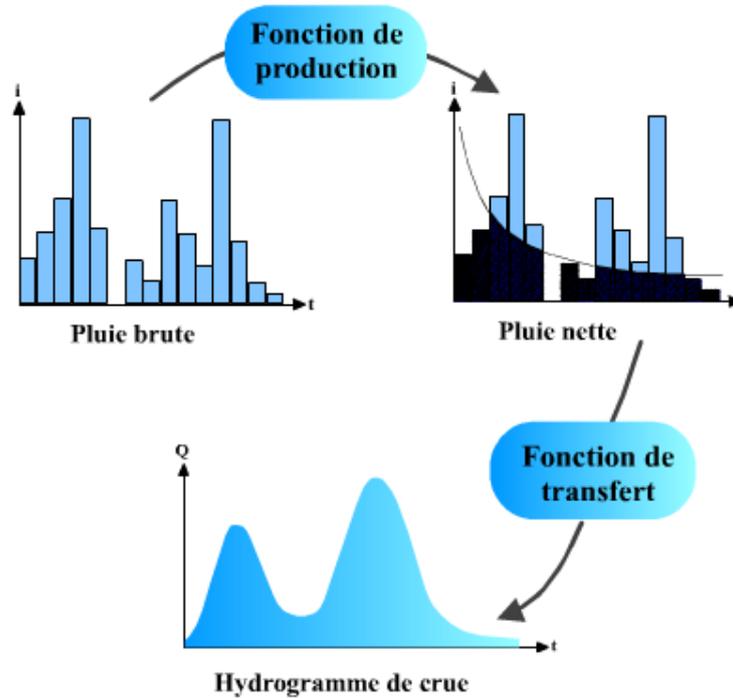


Figure 1-2(d'après <http://hydram.epfl.ch/e-drologie>)

Dans une vision très réductrice, un modèle pluie-débit revient à estimer un coefficient de ruissellement (éventuellement variable dans le temps et dans l'espace) et une vitesse d'écoulement (qui peut également varier dans le temps et dans l'espace).

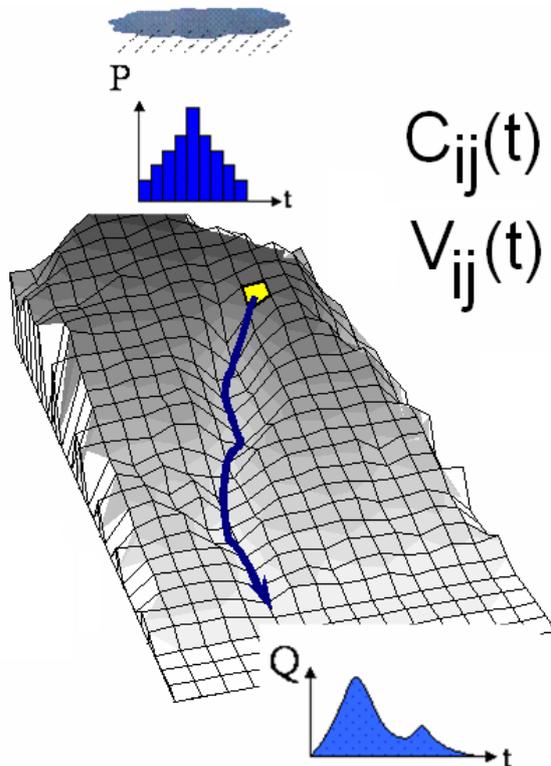


Figure 1-3

A quoi sert un modèle pluie-débit ?

Les débits des rivières sont des données relativement rares et difficiles à mesurer. Les pluies sont plus facilement mesurables et d'accès plus simple, en temps réel ou différé. Les modèles pluie-débit ont donc pour première fonction de simuler des débits à l'aide des valeurs de pluie disponibles ou vraisemblables. Par extension, un modèle pluie-débit a pour fonction de simuler les débits des rivières dans toute situation qui échappe (le plus souvent) à l'observation :

- calcul des débits rares et extrêmes
- calcul des débits sur un bassin non jaugé
- prévision des débits à différents horizons
- impact sur les débits de modifications du climat ou du bassin

Un modèle pluie-débit a également vocation à tester des hypothèses sur les processus hydrologiques. On peut par exemple imaginer un fonctionnement hydrologique, le formaliser par un modèle, et confronter ce schéma aux observations disponibles de pluie et de débit. En cas d'échec, on rejettera les hypothèses choisies (en supposant que les observations sont fiables). En cas de succès, on conclura que les hypothèses choisies sont un scénario possible.

1.2. Types de modèles

Les modèles pluie-débit sont nombreux, mais peuvent être regroupés selon certaines grandes familles, au sein desquelles les propriétés des modèles sont relativement semblables :

1) selon la nature des équations qui interviennent dans le modèle, et le lien plus ou moins fort avec la physique des processus : modèles empiriques (régressions, réseaux de neurones), "conceptuels" (modèles à réservoirs), "à base physique" (s'appuyant sur les équations de la mécaflu);

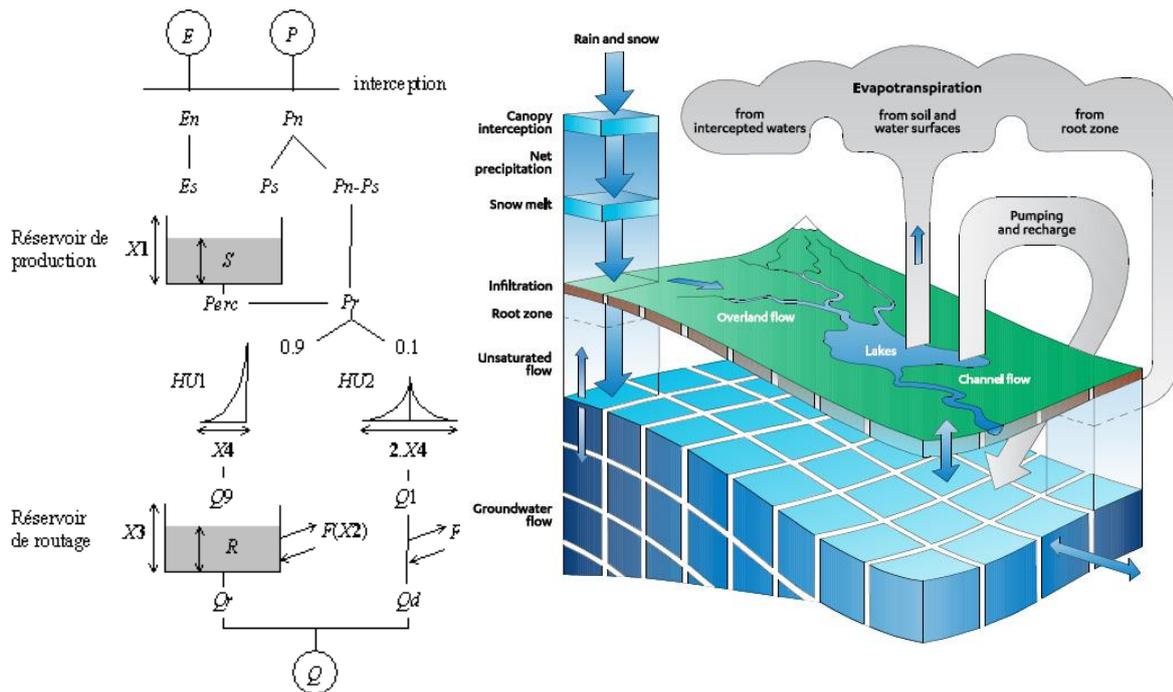


Figure 1-4 A gauche, modèle GR4J (<https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2013/04/image0021.gif>), à droite modèle Mike-SHE (<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she>)

Les modèles à base physique utilisent par exemple les équations de Richards (pour les transferts d'eau dans la zone non saturée), de Darcy (pour les transferts d'eau dans la zone saturée), de Barré de Saint Venant (pour les écoulements à surface libre), de Penman-Monteith (pour l'évapotranspiration). Ces équations font intervenir de nombreuses données du milieu, généralement peu accessibles (propriétés texturales, structurales, hydrodynamiques du sol, caractéristiques de la végétation, état de l'atmosphère...), et doivent en outre être appliquées à des échelles très fines, pour des raisons aussi bien physiques que numériques. Ces modèles sont donc difficilement applicables dans la pratique, mais sont des outils adaptés aux études d'impact (changement du climat, modifications du bassin) ou au test d'hypothèses.

Les modèles empiriques proposent une vision du fonctionnement du bassin fondée sur l'observation, à une échelle où les processus élémentaires sont intégrés dans des concepts simplifiés. Ces modèles font intervenir un nombre réduit de paramètres, et sont de ce fait plus faciles à mettre en œuvre et à caler. En revanche, leur extrapolation hors du domaine d'observation n'est pas garantie.

2) selon la gamme de débits simulés, ou les différentes phases : modèle continu (le modèle décrit l'épisode de crue, mais aussi la phase inter-événementielle, et donc l'état du système au début de chaque épisode) ou événementiel (le modèle ne décrit que l'épisode de crue, et les conditions initiales doivent être fixées de façon externe).

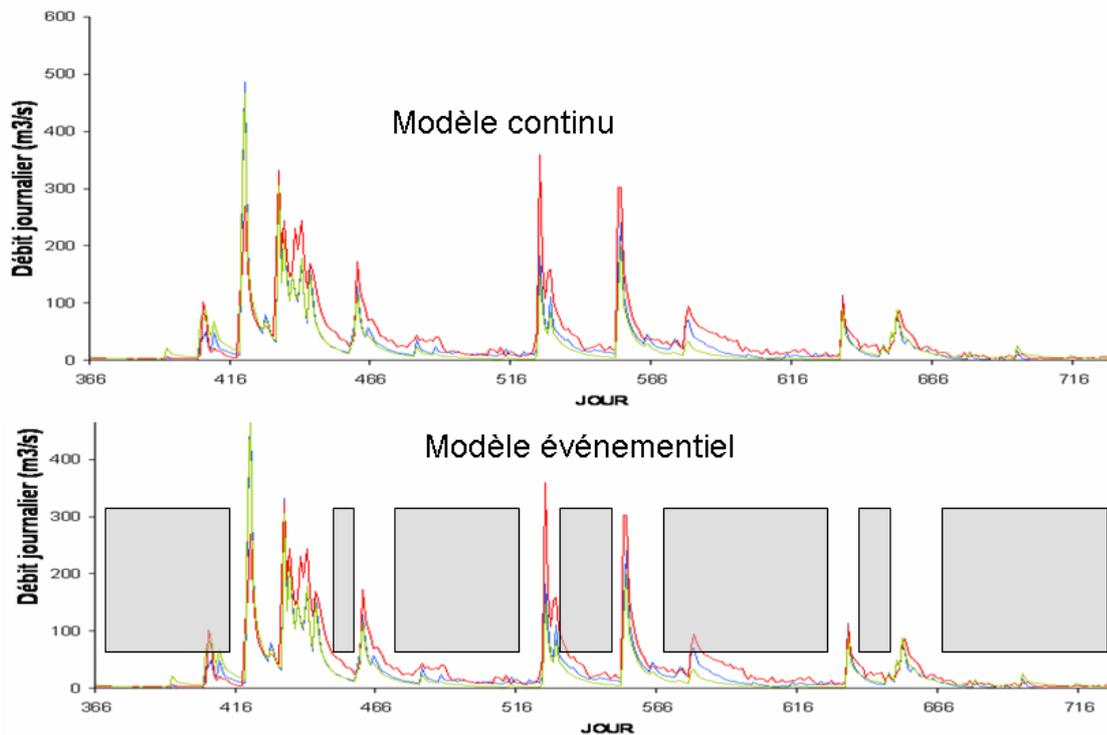


Figure 1-5

Les modèles continus ont pour avantage de simuler la totalité de la chronique de débits, et donc en particulier les conditions initiales au début d'un épisode de crue. Ces modèles font cependant intervenir un volume important de données, et potentiellement un grand nombre de paramètres (compte tenu de la complexité de la phase inter-événementielle). Les modèles événementiels sont moins exigeants en données et généralement moins complexes, mais doivent être initialisés par des variables externes.

3) selon la topologie élémentaire : modèle global (les variables sont exprimées par des valeurs moyennes sur le bassin : pluie moyenne, pente moyenne etc...) ou distribué (l'organisation spatiale est prise en compte)

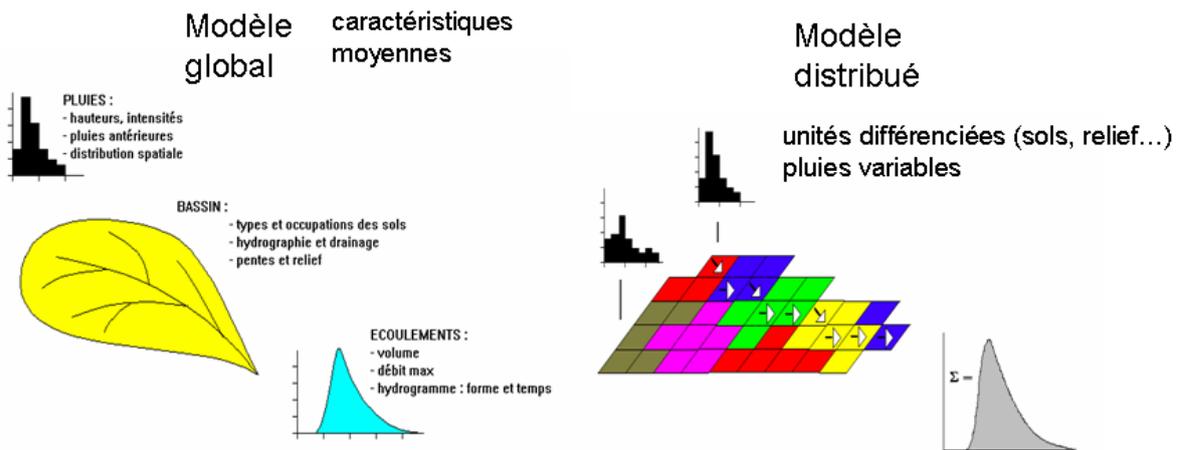


Figure 1-6

Il n'est pas indispensable d'utiliser un modèle distribué ! Dans certaines conditions d'homogénéité climatique ou géographique, un modèle global peut donner des résultats équivalents à un modèle spatialisé. Ceci étant, la structure distribuée permet d'exploiter l'information spatiale disponible, parfois sans complexification excessive du modèle.

Ainsi, dans le cas d'une pluie nettement localisée sur le bassin (à l'amont ou à l'aval), un modèle distribué simule des crues décalées dans le temps, avec des pics de crue d'autant plus atténués que la pluie est localisée à l'amont du bassin. Un modèle global, dans les 2 cas, simule la même crue (en pointillés).

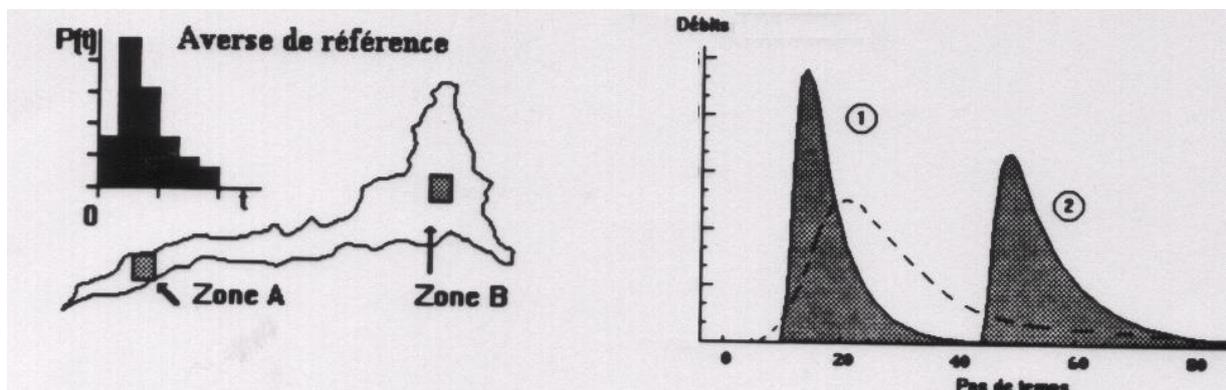


Figure 1-7

1.3. Principes des modèles ATHYS

ATHYS propose un ensemble de modèles majoritairement distribués et événementiels. Il est cependant possible d'appliquer ces modèles en mode global (1 seule maille), et/ou en mode continu.

P1. Les modèles implantés dans le logiciel ATHYS opèrent sur une structure de mailles carrées régulières. Cette structure est adaptée à la plupart des sources de données spatialisées (pluie radar, MNT pour le relief, images SPOT pour l'occupation des sols)

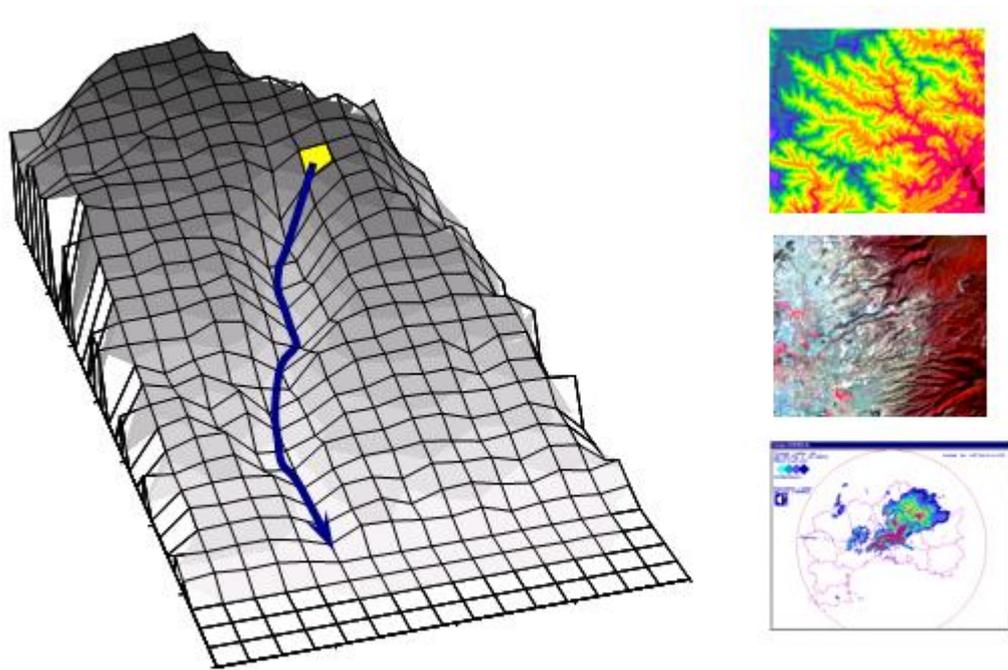


Figure 1-8

P2. La pluie est interpolée sur chacune des mailles : méthode de Thiessen ou méthode des inverses des distances.

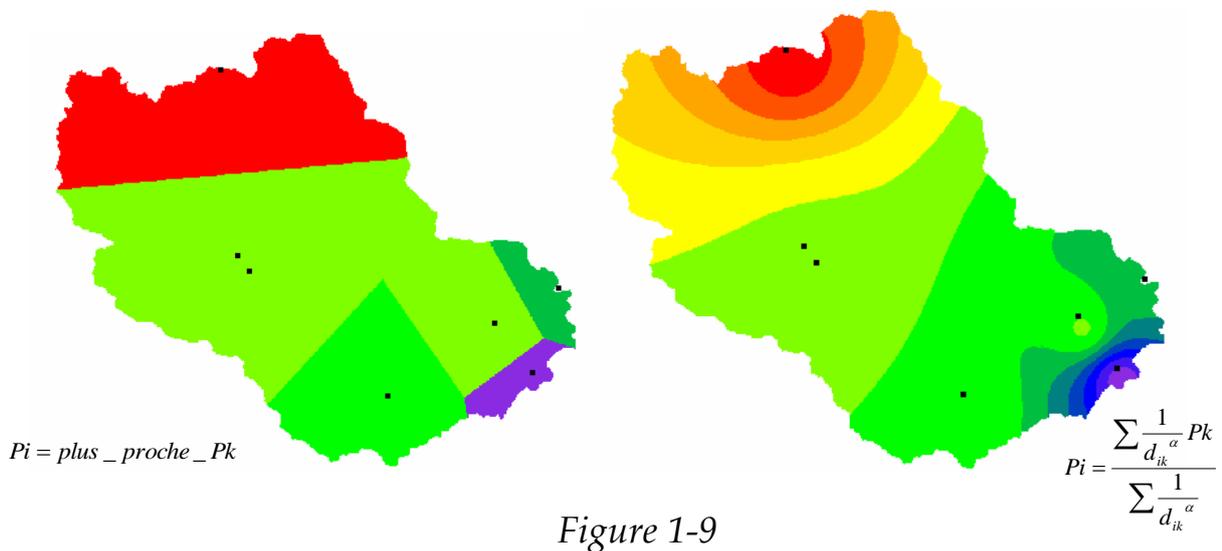


Figure 1-9

P3. On applique une fonction de production à chacune des mailles. A chaque maille est associée une fonction de production et une seule. Les fonctions de production peuvent être différentes d'une maille à l'autre

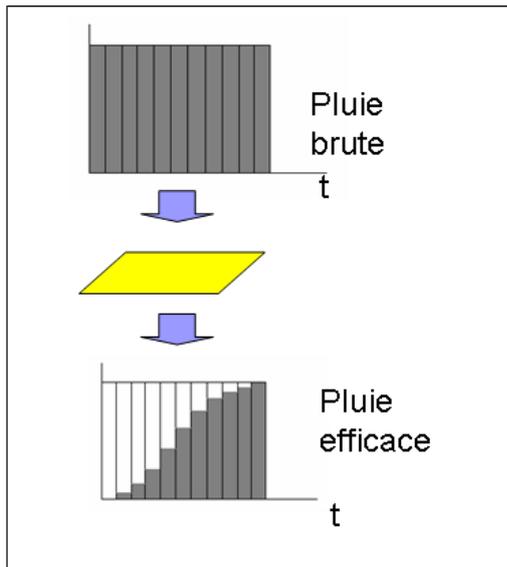


Figure 1-10

Si on note $P_b(t)$ la précipitation à l'instant t , et $P_e(t)$ la pluie efficace calculée par la fonction de production, de nombreuses relations ont été proposées, par exemple :

Infiltration constante $P_e(t) = P_b(t) - INF$

Coefficient constant $P_e(t) = COEF \cdot P_b(t)$

Seuil constant

$$P_e(t) = 0 \quad \text{si } \sum_t P_b(t) < STO$$

$$P_e(t) = P_b(t) \quad \text{sinon}$$

SCS

$$P_e(t) = P_b(t) \cdot \left(\frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right)$$

avec S capacité d'un réservoir, I_a seuil des pertes initiales, et $P(t)$ cumul de la pluie au temps t .

Green&Ampt $P_e(t) = P_b(t) - K_s \cdot \left(\frac{\Psi \cdot \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right)$

avec K_s conductivité hydraulique à saturation, $\Delta\theta$ différence entre humidité à saturation et humidité initiale, Ψ potentiel matriciel au niveau du front d'humectation, $F(t)$ infiltration cumulée depuis le début de l'épisode

TopModel

$P_e(t) = P_b(t)$ si $\delta_i(t) > 0$
 $P_e(t) = 0$ sinon

$$\text{avec } \delta_i(t) = \bar{\delta}(t) - \frac{\tau_i - \bar{\tau}}{f} \text{ et } \tau_i = \text{Ln}\left(\frac{a_i}{\text{tg}\beta}\right) \text{ et } K(\delta_i(t)) = K_0 \cdot \exp(-f\delta_i(t))$$

a_i , surface drainée par la maille i , β pente de la maille i , K conductivité hydraulique à saturation, K_0 et f paramètres d'ajustement.

P4. On transfère les pluies efficaces à l'exutoire. On distingue dans ce cas deux modes de transfert : mode mailles indépendantes et mode mailles interactives.

Le mode mailles indépendantes consiste à transférer les contributions de chaque maille à l'exutoire indépendamment les unes des autres. Le mode mailles interactives tient compte des apports à l'amont de chaque maille, et réalise un bilan des volumes réellement transités, sur chaque maille à chaque pas de temps.

Fonction Lag and Route (mode mailles indépendantes)

Cette fonction est décrite plus en détail dans la section 1.4.2. Pour résumer, chaque maille du bassin produit à l'exutoire du bassin un hydrogramme élémentaire :

$$Q_m(t) = A \cdot \int_{\tau_0}^{t-T_m} \frac{Pe(\tau)}{K_m} \cdot \exp\left(-\frac{t-T_m-\tau}{K_m}\right) d\tau$$

où Pe est la pluie efficace produite par la maille, A la superficie de la maille.

les temps de transfert T_m sont calculés en fonction des vitesses d'écoulement sur les mailles comprises entre la maille m et l'exutoire du bassin. Les temps de diffusion K_m sont des fonctions de T_m , exprimant que la diffusion est d'autant plus importante que la maille est éloignée de l'exutoire.

L'hydrogramme complet de la crue est égal à la somme des hydrogrammes élémentaires produits par les différentes mailles du bassin.

Fonction Onde cinématique (mode mailles interactives)

Cette fonction est décrite plus en détail dans la section 5. Pour résumer, la fonction de transfert Onde Cinématique réalise à chaque pas de temps de calcul et sur chaque maille un bilan des volumes stockés, tenant compte des apports amont, du stock initial au début du pas de temps, du volume écoulé vers l'aval.

Les débits sont calculés par la formule de Manning-Strickler, en assimilant la pente du fond à la pente de la ligne d'énergie :

$$Q = K \sqrt{S_0} R_h^{0.66} \cdot A$$

où K représente le coefficient de Manning-Strickler, en $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et R_h le rayon hydraulique (rapport de la section mouillée au périmètre mouillé), en m .

1.4. Présentation détaillée du modèle SCS-LR

1.4.1. Fonction de production type SCS

La fonction de production SCS est un modèle de production très souple, capable de s'adapter à différents types de processus de formation de crues (Steenhuis *et al.*, 1995). La version utilisée dans le modèle est caractérisée par :

- un coefficient de ruissellement instantané, fonction du cumul de pluie depuis le début de l'épisode
- un réservoir sol, alimenté par la fraction de la pluie qui s'infiltré, et soumis à une vidange
- un écoulement retardé, correspondant à une fraction de la vidange du réservoir sol

La pluie efficace $P_e(t)$ est calculée à partir de la précipitation $P_b(t)$:

$$P_e(t) = P_b(t) \cdot \left(\frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right)$$

Le cumul de pluie $P(t)$ correspond à la somme des précipitations depuis le début de l'épisode, diminué d'une vidange appliquée à chaque pas de temps. Cette vidange a pour objectif de simuler le ressuyage des sols au cours des périodes sans pluie, et la diminution conséquente du coefficient de ruissellement potentiel.

On peut considérer que la quantité de pluie $P(t)$ correspond au niveau d'un réservoir virtuel alimenté par l'intensité de précipitation $P_b(t)$, et vidangé par une quantité proportionnelle au niveau $P(t)$. Le niveau $P(t)$ du réservoir est déterminé par :

$$\frac{dP(t)}{dt} = P_b(t) - ds \cdot P(t)$$

$$P(0) = 0$$

où $ds \cdot P(t)$ est la vidange proportionnelle au niveau dans le réservoir :

Pour simuler un écoulement retardé, on considère également un réservoir sol alimenté par l'eau qui s'infiltré et vidangé par une quantité proportionnelle au niveau du réservoir. Le niveau $stoc(t)$ de ce réservoir est déterminé par :

$$\frac{dstoc(t)}{dt} = P_b(t) - P_e(t) - ds \cdot stoc(t)$$

$$stoc(0) = 0$$

où $ds \cdot stoc(t)$ représente une vidange liée ressuyage du sol par percolation profonde, évaporation, écoulement de sub-surface... Pour des raisons de consistance, les coefficients de vidange du réservoir virtuel du cumul de pluie et du réservoir sol sont identiques, égaux à ds : ainsi le coefficient de ruissellement est potentiellement égal à 0 lorsque l'humidité du sol est nulle.

Une fraction ω de la vidange du réservoir sol est acheminée à l'exutoire du bassin, et donc la quantité produite par la maille au temps t est égale à :

$$Pe(t) + \omega.ds.stoc(t)$$

Le modèle de production comporte donc 3 paramètres, dont 2 (ds et ω) sont des constantes du bassin et 1 (S) est influencé par les conditions antérieures et l'état du système :

S : capacité totale du réservoir sol, en mm

ds : facteur de vidange, correspondant à un temps de ressuyage des sols, en j^{-1}

ω : facteur de reprise de vidange, adimensionnel

NB : pour les pointes de crue, le paramètre le plus sensible du modèle est la capacité du réservoir S , les autres paramètres sont assez peu variables, et peuvent être estimés régionalement. Pour les bassins méditerranéens, on pourra retenir par exemple : $ds = 1 j^{-1}$, $\omega = 0.2$

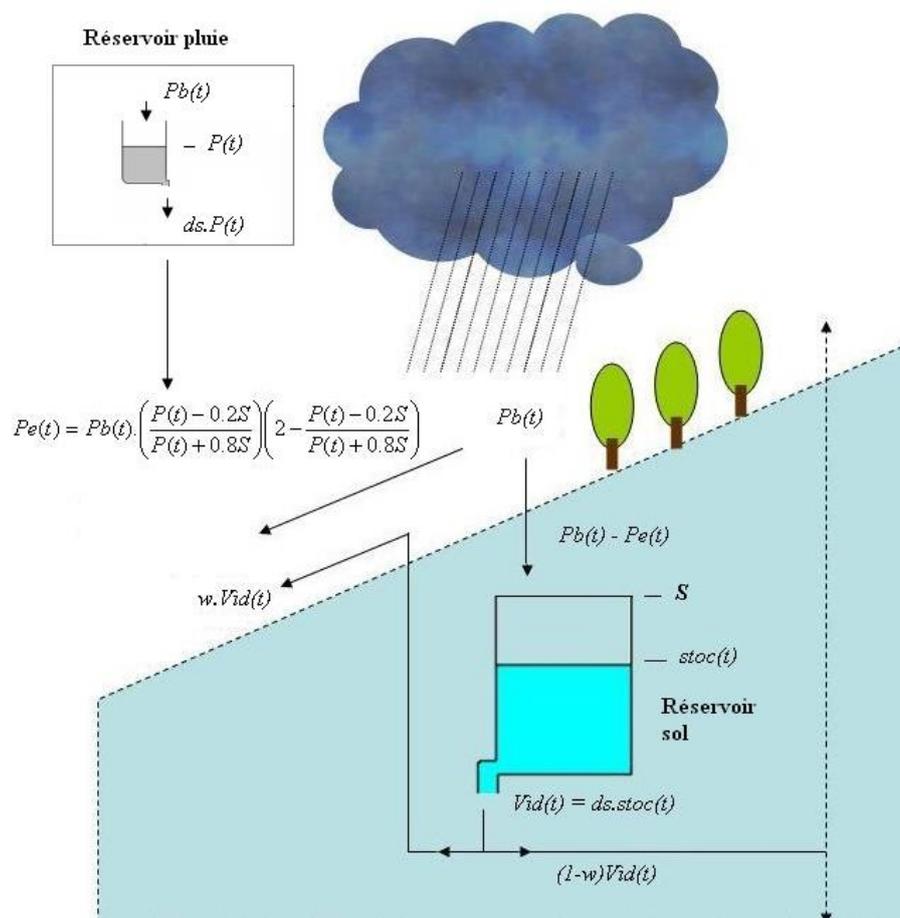


Figure 1-11

NB : le paramètre S peut être estimé en 1^{ère} approximation d'après les abaques de la littérature existant pour le modèle SCS.

1.4.2. Fonction de transfert Lag and route

La fonction de transfert lag and route achemine les volumes produits par chaque maille à l'exutoire. Chaque maille m produit ainsi un hydrogramme élémentaire à l'exutoire, qui dépend :

- d'un temps de transfert T_m (route) entre la maille m et l'exutoire du bassin, déterminé par les vitesses d'écoulement sur les mailles de la trajectoire entre la maille m et l'exutoire du bassin,
- d'un temps de diffusion K_m (lag) entre la maille m et l'exutoire du bassin, déterminé à l'aide d'un réservoir linéaire, de capacité K_m .

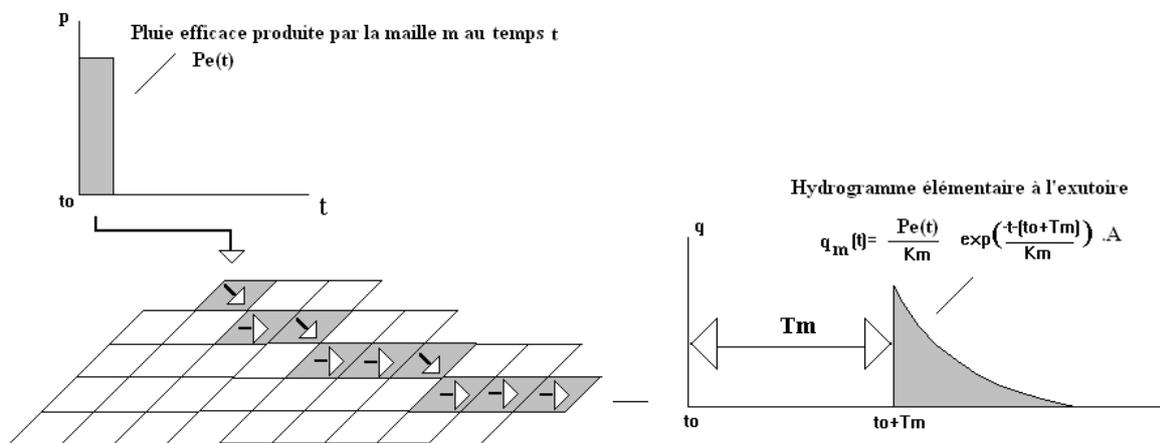


Figure 1-112

La pluie efficace produite au temps t_0 , $Pe(t_0)$, génère un hydrogramme élémentaire :

$$q_m(t) = 0 \quad \text{si } t < t_0 + T_m$$

$$q_m(t) = \frac{P_e(t_0)}{K_m} \exp\left(-\frac{t - (t_0 + T_m)}{K_m}\right) \cdot A \quad \text{sinon}$$

où A est la superficie de la maille

En intégrant toutes les pluies efficaces produites entre le début de l'épisode t_0 et le temps $t - T_m$, le débit à l'instant t de l'hydrogramme élémentaire s'écrit :

$$Q_m(t) = A \cdot \int_{t_0}^{t - T_m} \frac{P_e(\tau)}{K_m} \cdot \exp\left(-\frac{t - T_m - \tau}{K_m}\right) d\tau$$

Pour obtenir l'hydrogramme complet de la crue, on somme les contributions de toutes les mailles, pour tous les pas de temps.

Dans Mercedes, la paramétrisation du modèle Lag and Route comprend 5 paramètres :

- 3 paramètres μ , α , β associés à la vitesse d'écoulement V_k sur la maille k , et permettant de calculer le temps de propagation entre la maille m et l'exutoire du bassin :

$T_m = \sum \frac{l_k}{V_k}$ avec l_k et V_k longueur et vitesse d'écoulement des mailles comprises entre maille m et exutoire

$$V_k = \mu I_k^\alpha \cdot S_k^\beta$$

où I_k et S_k représentent la pente de la maille k et la superficie du bassin drainé par la maille k . Cette paramétrisation fait donc explicitement varier la vitesse de transfert en fonction de la pente de la maille et de la superficie amont. Les valeurs recommandées sont $\alpha = 0.5$ et $\beta = 0.2$, les pentes étant exprimées en m/m et les superficies drainées en km^2 .

Cette paramétrisation peut être utilisée sous sa forme la plus simple, avec $\alpha = 0$ et $\beta = 0$. La vitesse de transfert est alors constante sur l'ensemble ou sur une partie du bassin, égale à $V_0 = \mu$, μ ayant dans ce cas la dimension d'une vitesse, en m/s,

NB : Lorsque μ a la signification d'une vitesse (lag and rout simple), ce paramètre peut être estimé en 1^{ère} approximation à partir des formules de temps de concentration existant dans la littérature.

- 2 paramètres k_0 et k_1 associés au temps de diffusion K_m :

$$K_m(t) = K_0 \cdot T_m + K_1 \quad K_m(t) = k_0 \cdot T_m + k_1$$

Le temps de diffusion est ainsi une fonction croissante du temps de transfert (paramètre k_0). Le paramètre k_1 est principalement utilisé dans le cas d'un modèle à une maille, simulant un modèle global; dans ce cas, on utilise $V_0 = 10000$ m/s, $K_m = k_1$. Dans les autres cas, il est recommandé de choisir $k_1 = 0$ et $K_m = k_0 \cdot T_m$. Dans ce cas, le temps de diffusion K_m est proportionnel au temps de propagation T_m .

2. LOGICIEL ATHYS

L'ATelier HYdrologique Spatialisé, ATHYS, a pour objectif de réunir dans un environnement convivial et homogène un ensemble de modèles hydrologiques associés à des traitements de données hydro-climatiques et géographiques (Bouvier et Delclaux, 1996 ; Bouvier et al., 2010 ; Bouvier et al., 2012). Il a été développé à l'IRD pour des applications diverses : gestion de la ressource en eau, prévision ou prédétermination des événements extrêmes, études d'impact liées à des modifications anthropiques ou climatiques.

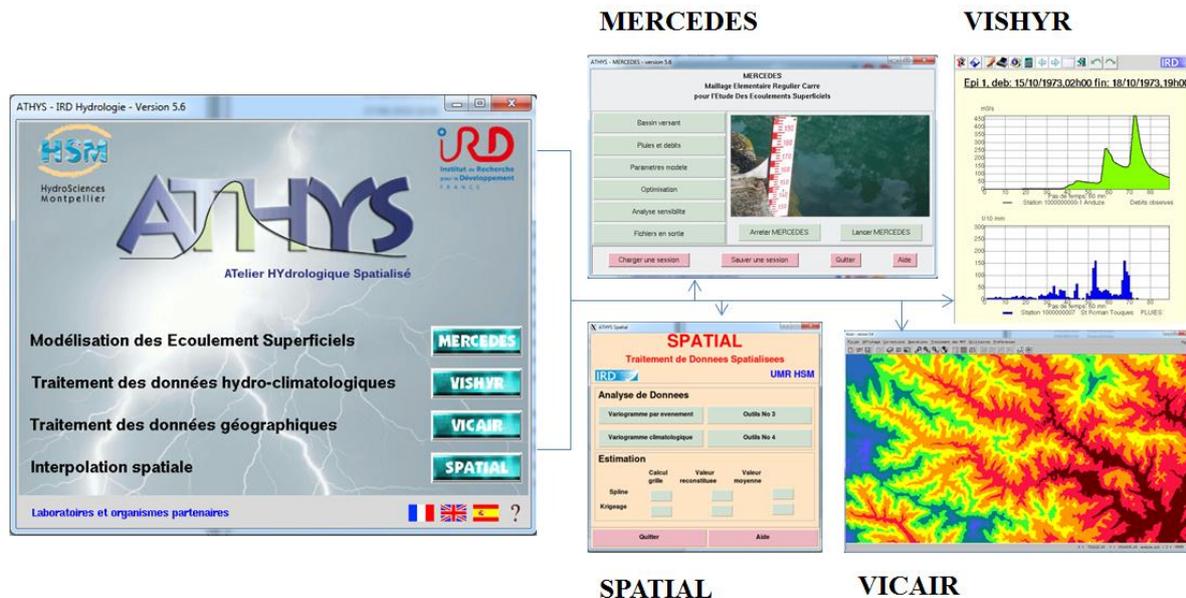


Figure 2-1

ATHYS est constitué de 4 modules :

- MERCEDES : plate-forme de modélisation distribuée
- VISHYR : traitement des données hydro-climatiques locales
- VICAIR : traitement des données géographiques spatialisées
- SPATIAL : plate-forme d'interpolation spatiale

L'objet de ce chapitre est de présenter brièvement les modules VICAIR et VISHYR, puis plus longuement la plate-forme de modélisation MERCEDES.

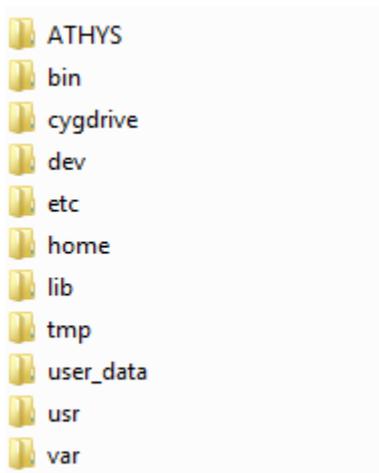
2.1. Installation ATHYS

ATHYS peut être téléchargé sur le site www.athys-soft.org, dans une version Windows ou dans une version Linux. Pour la version Windows, l'émulateur Linux CYGWIN est utilisé et également installé lors du téléchargement.

Lors de l'installation pour Windows, les étapes sont les suivantes :

- Téléchargement et exécution du setup.exe
- Définition d'un répertoire d'accueil (ex : C:\ATHYS)
- Copie des fichiers sur le disque
- Installation de l'émulateur Cygwin
- Installation du logiciel ATHYS
- Création des raccourcis et des icônes
- Installation du compilateur Acotools dans la rubrique ATHYS (Tous les Programmes)

A l'issue de l'installation, le répertoire d'accueil comprend notamment les dossiers :



ATHYS contient l'ensemble des programmes du logiciel

home désigne le compte utilisateur, où sont stockées initialement les données du Gardon Anduze

Les autres dossiers sont des dossiers relatifs à l'émulateur Linux Cygwin, et ne sont pas exploités par l'utilisateur

A l'issue de l'installation, une icône a été créée sur le bureau :



Figure 2-2

qui permet de démarrer l'applicatif, menu d'accueil :



Figure 2-3

Une fenêtre est également créée, dans laquelle figureront tous les déroulements des traitements : calculs, résultats des différentes requêtes

Pour sortir de l'appli, on active  du menu d'accueil ou de la console ATHYS

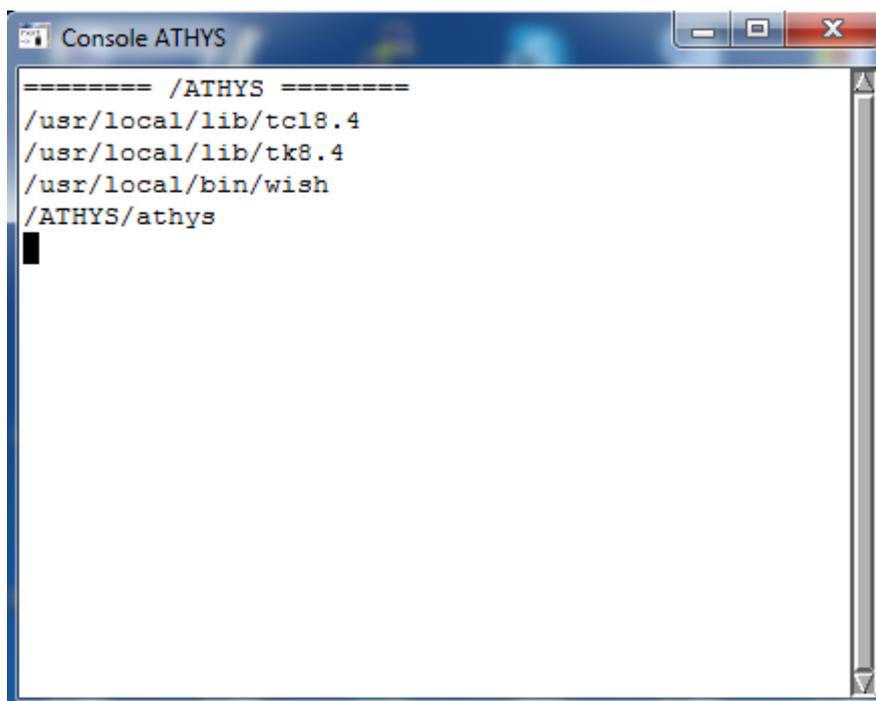
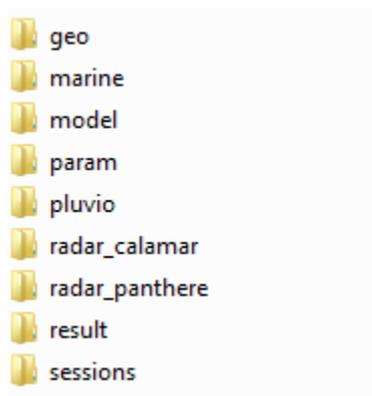


Figure 2-4

Les données du Gardon d'Anduze ont été placées dans le dossier /home/athys, qui comprend notamment :



geo contient les fichiers de données géographiques spatialisés : MNT et dérivés, sols

pluvio contient les fichiers des données hydro-pluviométriques : pluies, débits ...

sessions contient les différentes configurations de traitement sauvegardées : modèle, paramètres, données d'entrée et de sortie

2.2. Présentation des données

Le bassin du Gardon d'Anduze est situé dans les Cévennes méridionales, à environ 70 km au nord-est de Montpellier, et couvre une superficie de 545 km².

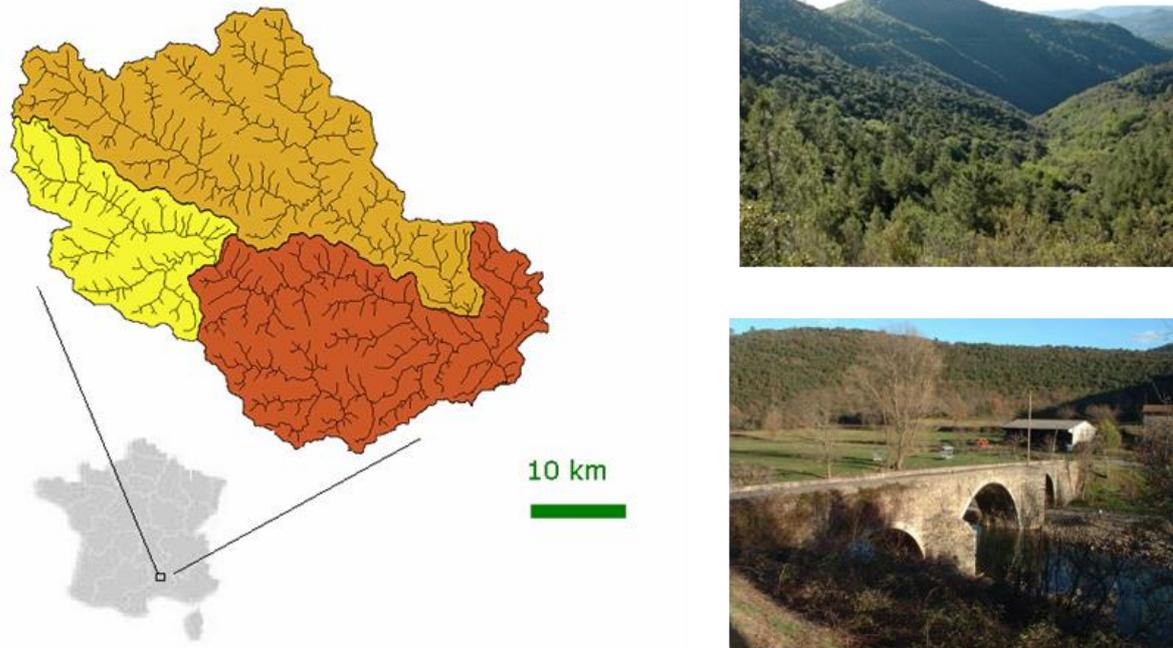


Figure 2-5

Le bassin du Gardon à Anduze est sujet à des crues soudaines, liées à des cumuls de précipitations pouvant atteindre plusieurs centaines de millimètres en 24 heures, notamment en automne. La crue des 8-9 septembre 2002, dont le débit maximal a été estimé à plus de 3000 m³/s, a une période de retour estimée à 50 ans.



Figure 2-6



Figure 2-7

Le bassin est constitué de 3 unités géologiques dominantes : schistes (jaune), granites (bleu), calcaires (gris).

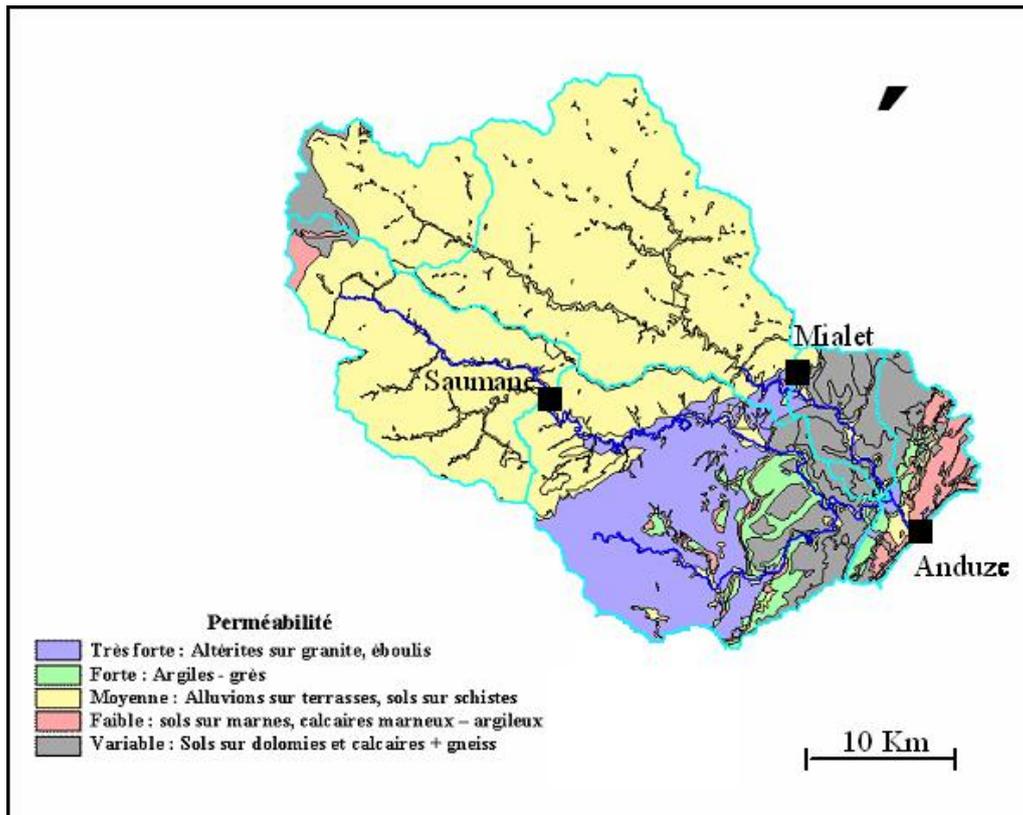


Figure 2-8 (source Ayrat, 2005)

Les sols sont peu profonds, rarement au-delà de 1 mètre. La profondeur moyenne est de l'ordre de 30 à 50 cm. Les perméabilités sont généralement assez élevées, et les sols sont susceptibles de stocker plusieurs dizaines, voire centaines de millimètres de précipitation avant le déclenchement de la crue.

Données géographiques

Les données géographiques de base sont :

- le modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 50 m
- le fichier des directions de drainage, issu de ce MNT.

Ces fichiers se trouvent dans le dossier geo (voir section 8.2 pour la préparation de ces fichiers) :

anduze.mnt : Modèle Numérique de Terrain au pas de 50 m = altitudes aux nœuds d'une grille 700x600, Origine du point en bas à gauche : $X0 = 699\ 837$; $Y0 = 1\ 890\ 630$ dans la projection Lambert2 étendu

anduze.dr1 : Modèle de drainage au pas de 50 m = directions de drainage, codées de 0 à 8, aux nœuds d'une grille 700x600, Origine du point en bas à gauche : X0 = 699 837 ; Y0 = 1 890 630 dans la projection Lambert2 étendu

Unité du MNT =1 (mètre)

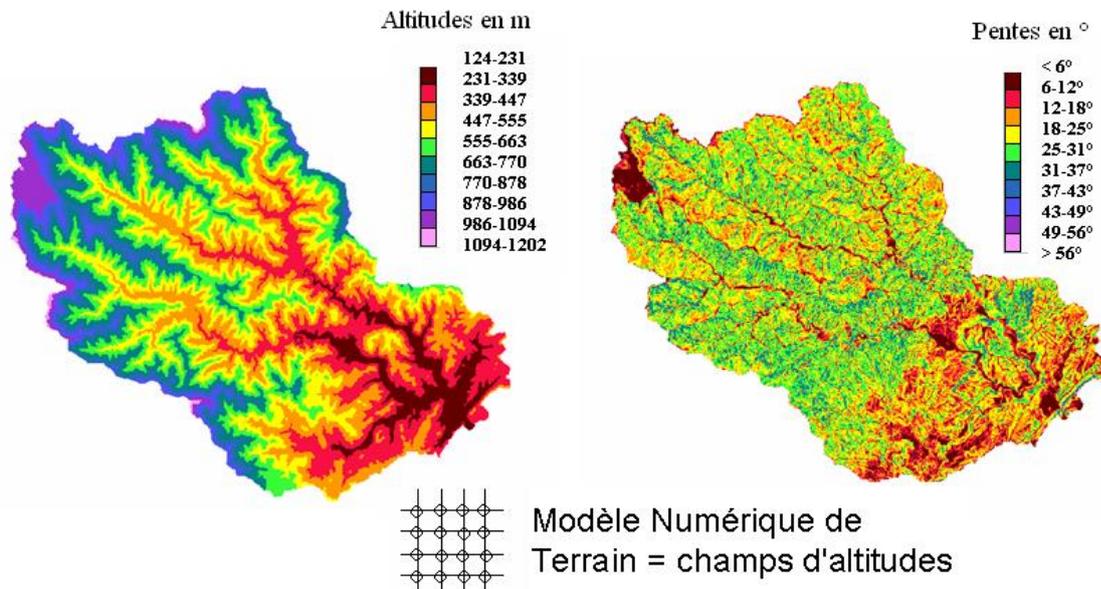


Figure 2-9

Les altitudes varient de 124 à 1202 m, et les pentes sont fortes, 40% en moyenne. Le MNT à 50 m permet d'obtenir de nombreuses informations sur la topographie et la morphologie du bassin, les directions de drainage qui permettent de reconstituer les bassins versants et le réseau hydrographique (Fig. 2.10).

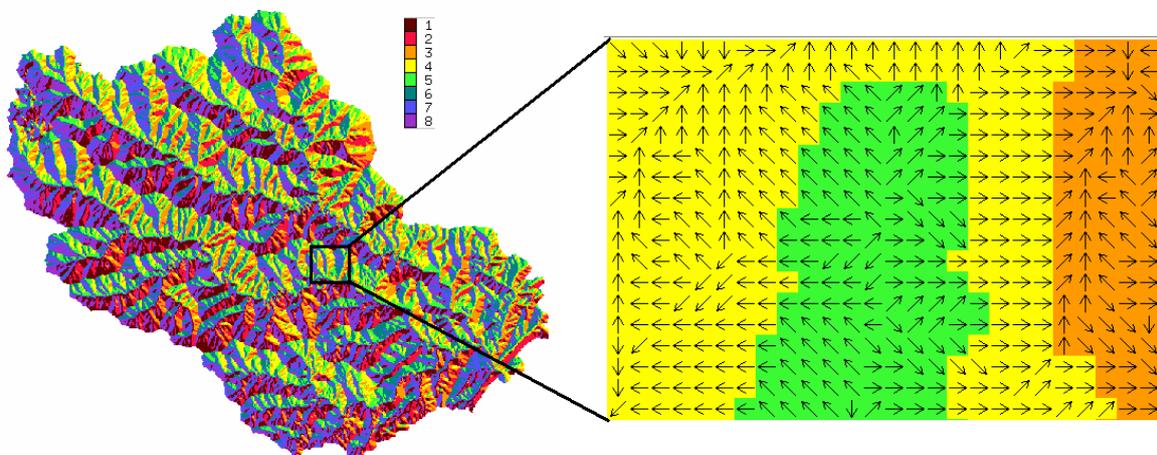


Figure 2-90 : Directions de drainage de chaque maille du bassin. La direction de drainage de chaque maille est orientée vers la maille voisine de plus faible altitude

D'autres fichiers sont également fournis :

anduze.sol : Carte des sols, pixel 50 m. Chaque pixel est codé de 1 à 9, selon la classe de sol associée.

Données hydro-pluviométriques

Les données hydro-pluviométriques de base sont contenues dans le fichier :

base28.txt : Données pluie-débit au pas de temps horaire, 28 épisodes de crue de 1973 à 2003, 1 station de débits (Anduze), 6 stations pluviométriques + pluie moyenne (calculée par interpolation Thiessen).

Ligne 1	Code associé au format txt (ici 5000)
Ligne 2	Type de station (débit observé Q-obs ; débit injecté Q-inj ; pluie P ; température T0 ; évapotranspiration Ev ; concentration C%) sur 5 caractères maxi
Ligne 3	Code numérique associé à la station (maximum 10 caractères pour P, T0, Ev, C%, et 12 caractères pour Q-obs et Q-inj)
Ligne 4	Noms des stations
Ligne 5	Longitudes des stations dans la projection utilisée (Lambert, UTM ...)
Ligne 6	Latitudes des stations, dans la projection utilisée (Lambert, UTM ...)
Ligne 7	Un saut de ligne pour démarrer un nouvel épisode
Ligne 8 et suivantes	date (jj/mm/aaaa) et heure (hh:mm), puis les X valeurs aux différentes stations

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5000							
2	Q-obs	P	P	P	P	P	P	P
3	1000000000-1	1000000005	1000000006	1000000007	1000000008	1000000009	1000000004	1000000000
4	Anduze	Barre-des-Cévennes	Mialet	Saint-Roman-de-Tousq	Saumane	Soudorgues	Anduze	Pmoy
5	732087	705562	726074	714690	714232	719440	738043	700000
6	1896930	1916178	1903962	1906295	1903081	1896440	1907177	1900000
7								
8	15/10/1973 03:00	1.80	-10.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00
9	15/10/1973 04:00	1.80	-10.00	0.00	5.00	-10.00	5.00	4.00
10	15/10/1973 05:00	1.80	-10.00	5.00	5.00	-10.00	10.00	5.00
11	15/10/1973 06:00	1.80	-10.00	10.00	5.00	-10.00	10.00	5.00
12	15/10/1973 07:00	1.80	-10.00	10.00	5.00	-10.00	15.00	8.00
13	15/10/1973 08:00	1.80	-10.00	15.00	10.00	-10.00	25.00	5.00
14	15/10/1973 09:00	1.80	-10.00	15.00	5.00	-10.00	5.00	20.00
15	15/10/1973 10:00	1.80	-10.00	20.00	10.00	-10.00	15.00	10.00
16	15/10/1973 11:00	1.80	-10.00	10.00	5.00	-10.00	5.00	10.00
17	15/10/1973 12:00	1.80	-10.00	5.00	5.00	-10.00	5.00	0.00
18	15/10/1973 13:00	1.80	-10.00	10.00	5.00	-10.00	5.00	10.00
19	15/10/1973 14:00	1.80	-10.00	5.00	5.00	-10.00	5.00	0.00
20	15/10/1973 15:00	1.80	-10.00	15.00	5.00	-10.00	5.00	0.00
21	15/10/1973 16:00	2.01	-10.00	5.00	10.00	-10.00	15.00	10.00
22								
23	18/10/1973 14:00	100.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00
24	18/10/1973 15:00	97.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00
25	18/10/1973 16:00	91.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00
26	18/10/1973 17:00	85.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00
27	18/10/1973 18:00	80.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00
28	18/10/1973 19:00	77.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00
29								
30	11/09/1976 16:00	15.60	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00

Tableau 2-1

NB :

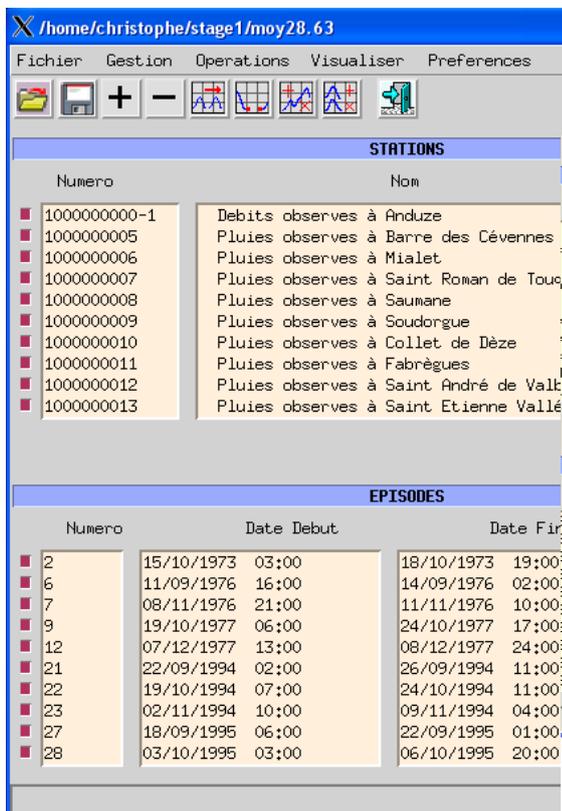
- unités par défaut : m3/s pour les Q, 1/10mm pour les P, Ev, °C pour T0, % pour les C%
- les lacunes P, Ev, To, C% sont codées -10, les lacunes Q sont codées -100
- le séparateur date/heure est un espace. Tous les autres séparateurs sont des tabulations
- le séparateur décimal est le . (point)
- dans le format txt, la date figurant sur une ligne correspond à la fin du pas de temps Δt . La pluie indiquée sur cette ligne correspond au cumul de pluie entre date $-\Delta t$ et date. Le débit indiqué sur cette ligne correspond au débit moyen entre date $-\Delta t$ et date.

On dispose également de données de pluies radar, fournissant la pluie au pas de temps de 5mn, et à la maille 1 km².(voir section 8.2)

2.3. Introduction à VISHYR

VISHYR propose différentes opérations de correction, calcul, gestion et visualisation de données hydro-climatiques locales.

VISHYR, menu principal



VISHYR, fenêtre graphique

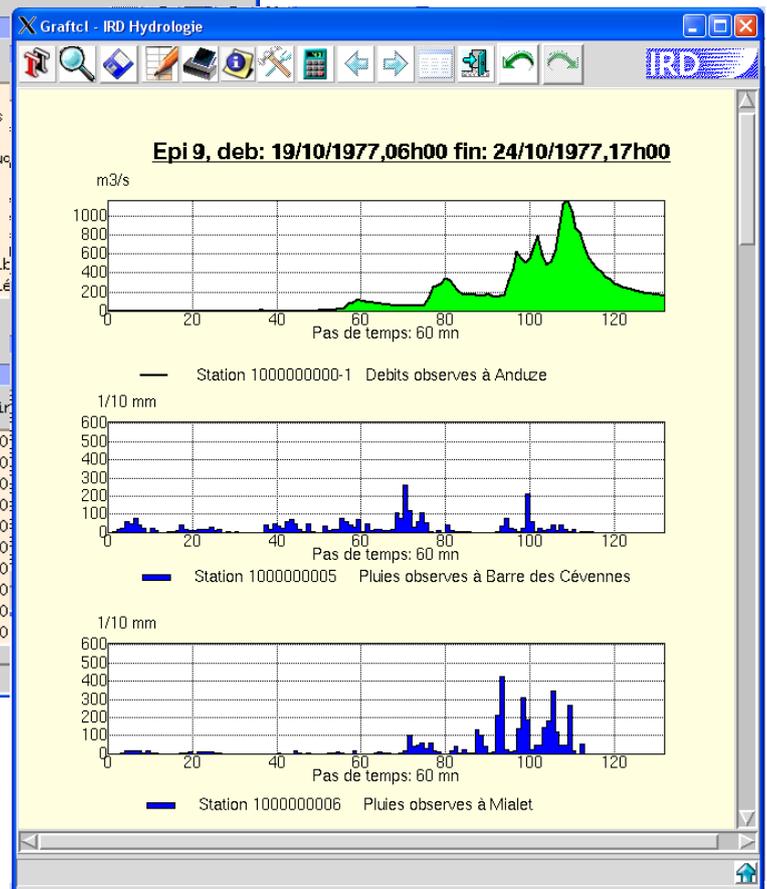


Figure 2-102

Les données doivent être préalablement archivées dans un fichier au format TXT. Trois possibilités pour former ces fichiers (cf 4.4) :

- constitution de ce fichier dans Excel, et exportation au format TXT, avec séparateur tabulation
- constitution de ce fichier à partir d'images radar type CALAMAR ou ANTILOPE/PANTHERE
- constitution de ce fichier à partir de fichiers ASCII exportés de PLUVIOM et HYDROM

La première opération consiste à ouvrir le fichier des données hydro-pluviométriques



Après ouverture, les stations et les épisodes contenus dans le fichier apparaissent dans les listes correspondantes. Les différents épisodes peuvent être visualisés successivement, en actionnant les touches :



visualisation de l'épisode courant



visualisation de l'épisode suivant



visualisation de l'épisode précédent

Les  activent ou désactivent la visualisation de la station ou de l'épisode correspondant.

On peut également supprimer une station ou un épisode contenu dans le fichier, ou ajouter une station ou un épisode contenu dans un autre fichier :



suppression d'une station ou d'un épisode



ajout d'une station ou d'un épisode

Une fois le fichier chargé, plusieurs types d'opérations sont accessibles :

- visualiser l'épisode
- corriger les pluies ou les débits (opérations algébriques)
- calculer les caractéristiques de l'épisode
- gérer les listes de stations et d'épisodes

On se référera aux pages d'aide du logiciel pour une description détaillée des fonctionnalités de VISHYR et de leur utilisation

Applications :

1/ ouvrir le fichier des épisodes pluie-débit base28.txt, qui contient les données fournies pour le Gardon d'Anduze

2/ visualiser les épisodes pluie-débit

3/ calculer les caractéristiques de ces épisodes

4/ modifier les listes des stations et des épisodes

2.4. Introduction à VICAIR

VISHYR propose différentes opérations de correction, calcul, gestion et visualisation de données géographiques ou hydro-météorologiques spatialisées.

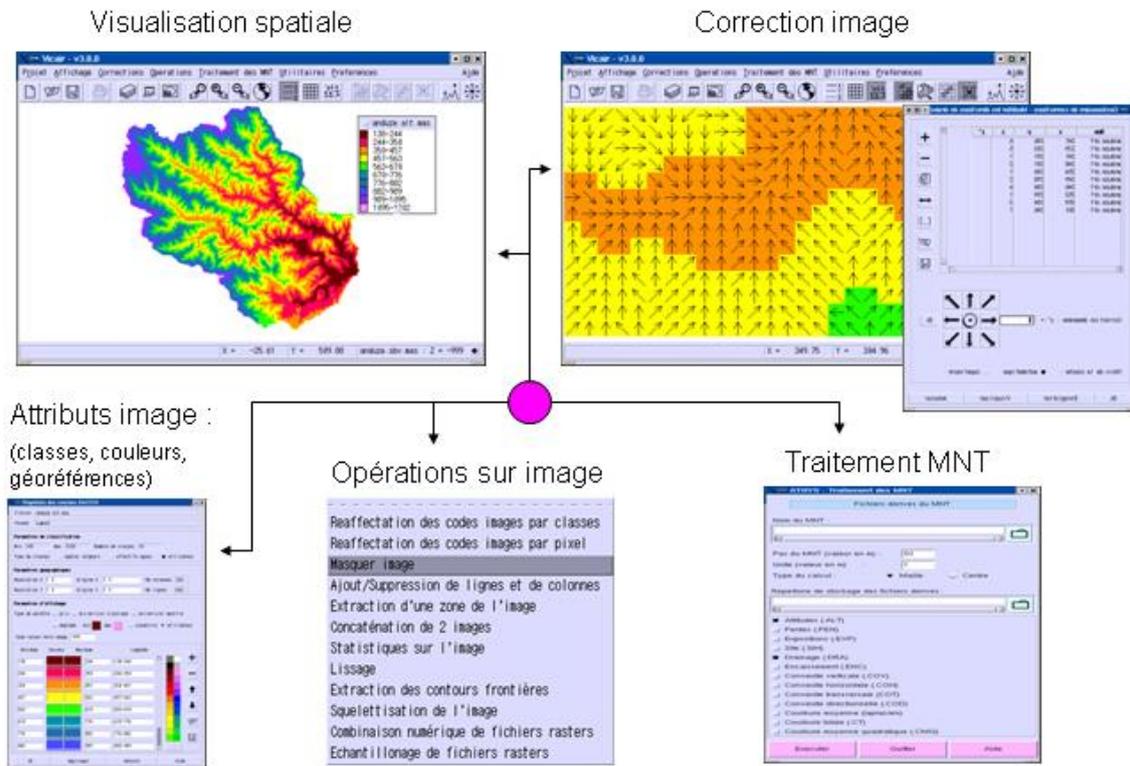


Figure 2-113

VICAIR opère à partir de différents formats standard :

- export ascii ArcInfo ou MapInfo
- export binaire ou ascii Grass
- export ascii Surfer

Visualiser un fichier dans Vicair consiste à :

- ouvrir un projet :
fonction *Projet / Nouveau* ou *Projet / Ouvrir* (dans le cas d'un projet préexistant)
- ces fonctions ouvrent le gestionnaire de couches, dans lequel seront gérés les différents fichiers composant le projet (superposition de différentes images ou cartes géographiques)

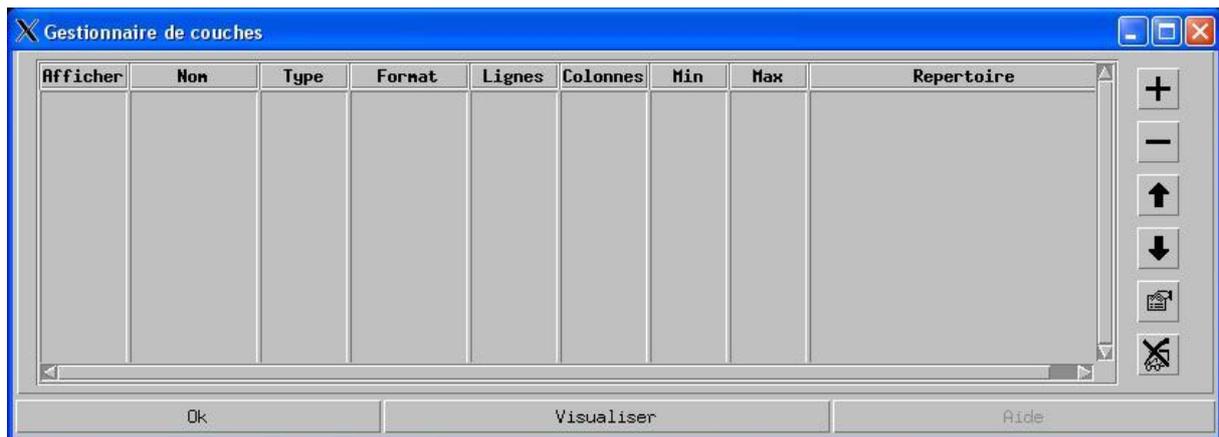


Figure 2-14

- ouvrir un fichier :
icône  du gestionnaire de couches

cet icône (widget) active un navigateur (browser) permettant le choix du fichier. Le fichier est ensuite affiché dans le [gestionnaire de couches](#)



Figure 2-15

- activer la visualisation :
bouton *Visualiser* du gestionnaire de couches

cette touche active la vue de l'image associée au fichier, avec des attributs numériques et graphiques fixés par défaut (ici 10 classes de couleur)

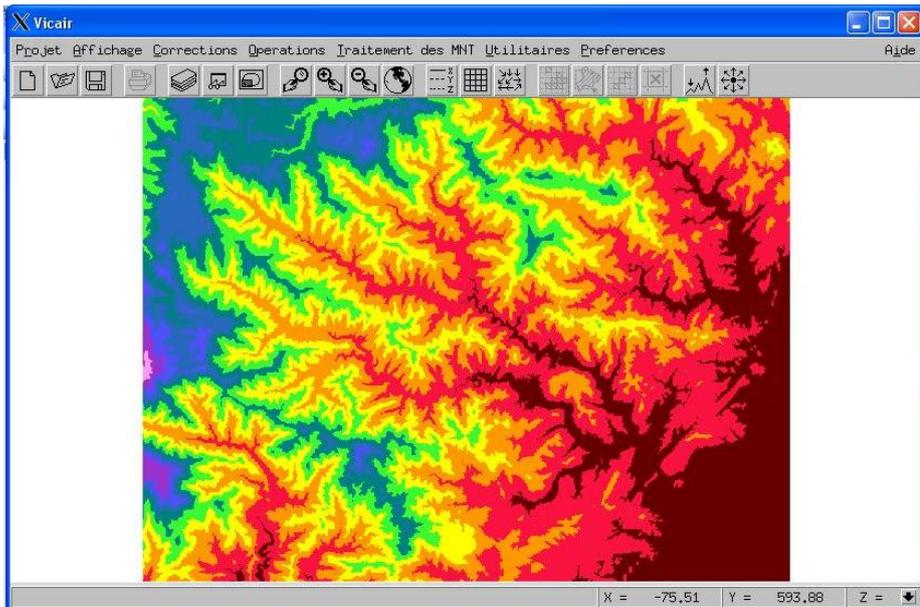


Figure 2-16

- (éventuellement) modifier les propriétés du fichier :

icône  du gestionnaire de couches, qui ouvre le [gestionnaire des propriétés](#) associées à l'image :

- * nombre de classes
- * géoréférencement dans la projection géographique, pour le positionnement des images dans l'espace
- * choix de la palette de couleur, etc...

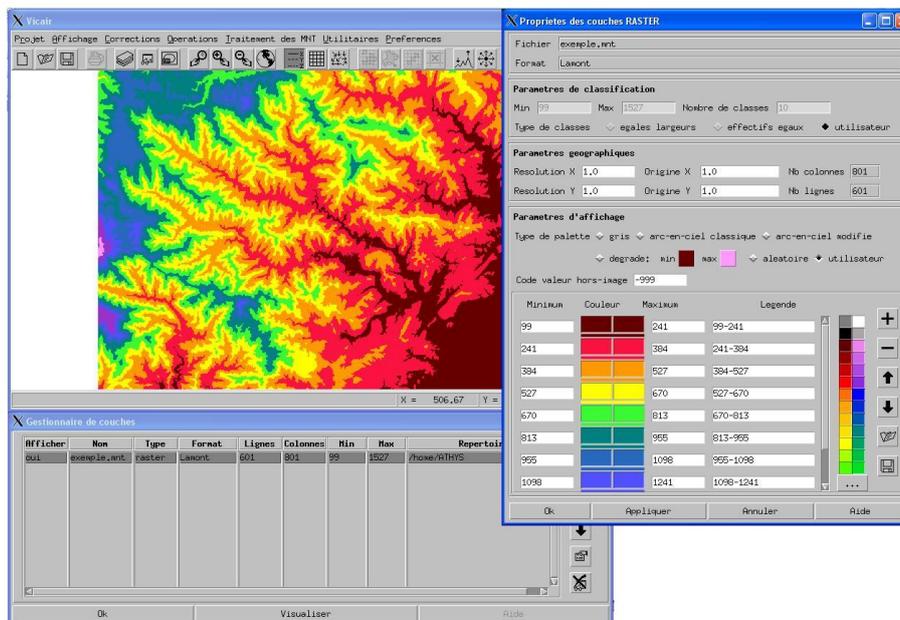


Figure 2-17

- (éventuellement), modifier les valeurs du fichier :

fonction *Correction/ Correction de pixel* ou icône  de Vicair. Cette fonction permet de **corriger la valeur numérique d'un pixel** ou d'un groupe de pixel de l'image. Pour des raisons de précision, l'image est généralement agrandie lorsqu'on active cette fonction. Cette fonction ouvre également le **gestionnaire de corrections**, qui liste les corrections demandées :

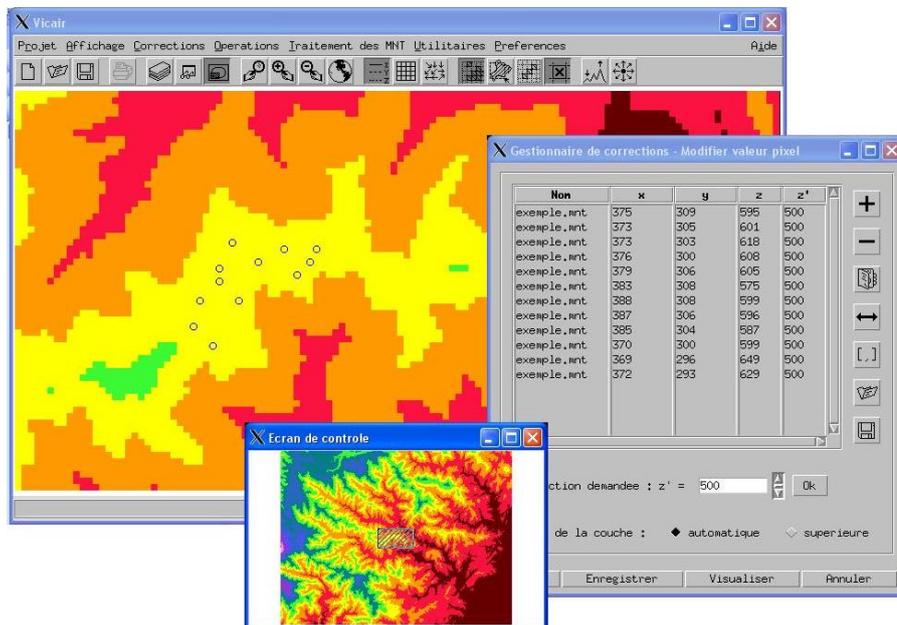


Figure 2-18

2.5. Introduction à MERCEDES

Le module MERCEDES est composé de 6 menus permettant d'implémenter une session de calcul.



Figure 2-129

- **Bassin versant** : description du bassin versant à traiter
- **Pluies et débits** : caractéristiques hydro-pluviométriques des événements à simuler
- **Paramètres modèles** : définition des modèles à utiliser
- **Optimisation** : calcul automatique des paramètres des modèles
- **Analyse sensibilité** : analyse globale des fonctions critères
- **Fichiers en sortie** : déclaration des fichiers de résultats

On peut par ailleurs **Charger** ou **Sauvegarder** une **session**. Une session est l'enregistrement de toutes les informations permettant d'informer les différents menus, correspondant à un modèle donné pour un bassin (ou un groupe de bassins) donné.

2.5.1. Menu 1 : Bassin Versant

Ce menu décrit les caractéristiques du ou des bassins versant à traiter.

ATHYS - MERCEDES

Geographie du bassin versant

Fichiers en entree :

Taille du pixel (m) : 50

Unite du MNT (m) : 1

Coordonnees origine : X0 699837 Y0 1890630

Fichier MNT: /home/agnes/anduze/geo/anduze.alt

Directions de drainage: /home/agnes/anduze/geo/anduze.dr1

Fichier Pentes:

Fichier des Superficies Drainees:

Classes de production:

Classes de transfert:

Fichier masque:

Liste des exutoires

Num	Nom	X	Y
1	Anduze	732087	1896930

Ajouter...
Modifier
Supprimer

Liste des retenues

Num	Nom	X	Y
-----	-----	---	---

Ajouter...
Modifier
Supprimer

Taux d'echantillonnage

Tx d'echantillonnage en X: 50
Tx d'echantillonnage en Y: 50

OK Annuler Aide

Figure 2-20

La **taille du pixel** est la longueur du coté d'une maille (en mètres), alors que l'**unité du MNT** permet de gérer des unités différentes du mètre (facteur multiplicatif du mètre : 10 pour décamètre par exemple; 0.1 pour décimètre). Les **coordonnées origine X0 et Y0** correspondent aux références du MNT (coordonnées du coin inférieur gauche) dans la projection géographique utilisée. Les champs "taille du pixel" et coordonnées origine X0 et Y0" sont remplis automatiquement lors du chargement du fichier MNT.

Deux fichiers sont indispensables à toute simulation.

Le **fichier Modèle Numérique de Terrain (MNT)** est un fichier de type raster. Différents formats peuvent être utilisés, dont les formats export de ArcView ou MapInfo. Ce fichier est de taille M×N (M lignes et N colonnes) et indique l'altitude des nœuds délimitant chaque maille.

Le **fichier des directions de drainage** indique, pour chaque maille, dans quelle direction l'eau va couler (donc vers quelle autre maille) à partir d'un codage de 1 à 8 (Nord=1, Nord-Est=2, ...). Le code 0 indique une dépression que MERCEDES ne pourra pas traiter (arrêt du programme), et qu'il faudra donc éliminer, au moins dans l'espace délimité par les différents sous bassins versants définis par les coordonnées des exutoires. La création du fichier de drainage et son traitement (élimination des dépressions) se fait avec le module VICAIR. C'est un fichier de taille MxN.

Les autres fichiers sont optionnels, et seront définis ultérieurement.

Dans la partie droite du menu, figurent les **coordonnées des exutoires** (codes des points de calculs) où les calculs de débits simulés vont être réalisés. Ces coordonnées sont exprimées dans la même projection géographique que celle utilisée pour les coordonnées X0 et Y0 précédentes.

Le bouton  permet de reconstituer les bassins versant en amont de ces exutoires (pour contrôle).

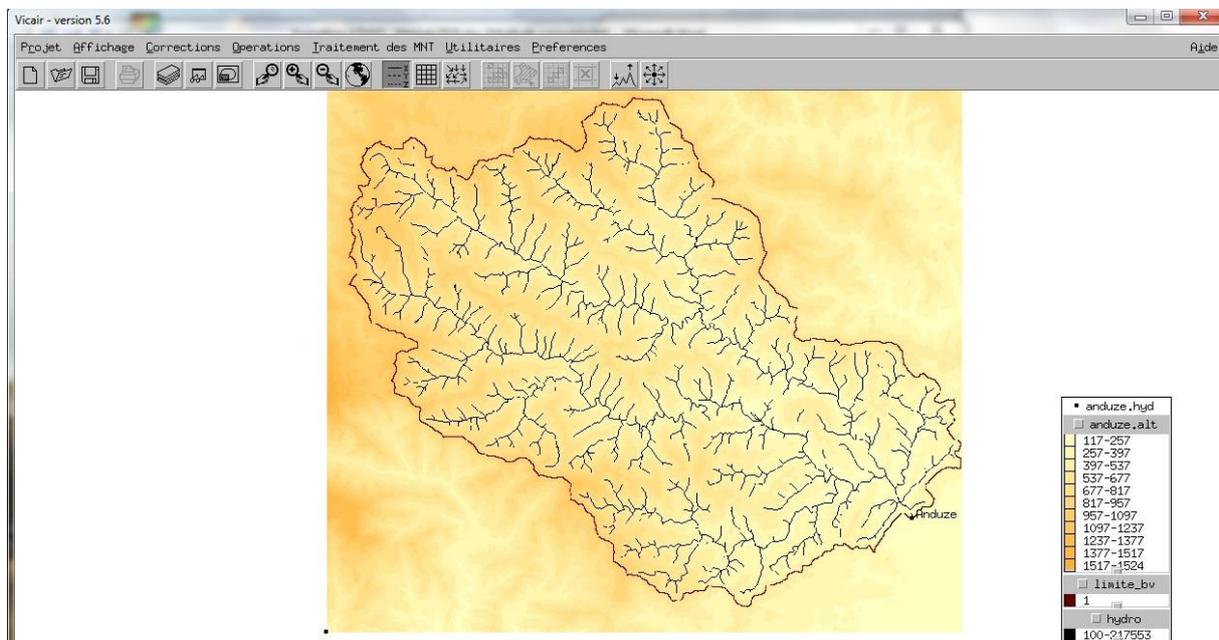


Figure 2-21

Enfin, le **taux d'échantillonnage** en X et Y permet de réduire les temps de calcul en limitant le nombre de mailles à prendre en compte. Pour un taux d'échantillonnage de 10 par exemple en X et Y, seule 1 maille sur 100 sera prise en compte dans les calculs (mais sa superficie sera multipliée par 100).

NB : Un taux d'échantillonnage important peut modifier sensiblement les hydrogrammes, et on veillera à comparer les résultats par rapport à ceux obtenus avec les images de base.

2.5.2. Menu 2 : Pluies et Débits

Ce menu décrit les caractéristiques hydro-pluviométriques des évènements qui seront simulés.

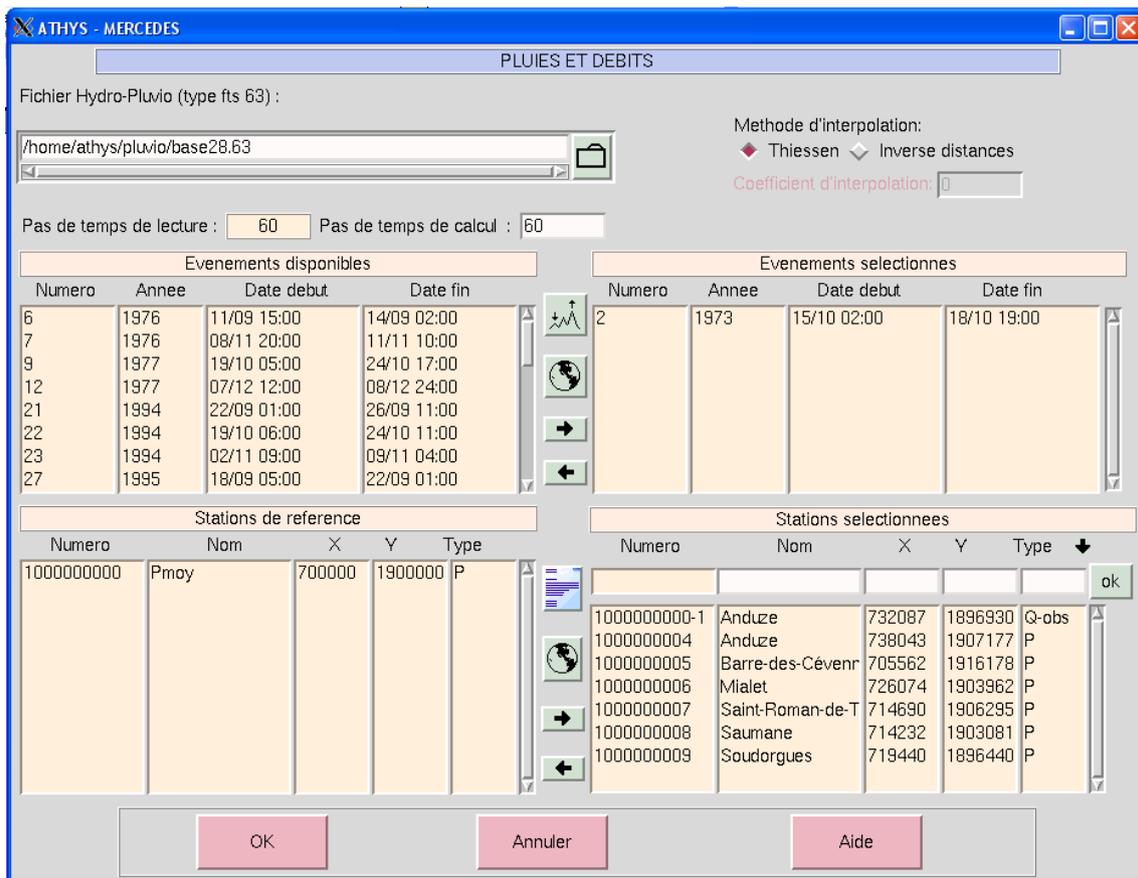


Figure 2-22

Le fichier contenant les informations hydro-pluviométriques est un fichier au format TXT. La 1^{ère} opération consiste à nommer ce fichier. Une fois le fichier validé, les données sont affichées dans les listes (stations et épisodes).

Dans l'exemple ci-dessus, le fichier (base28.txt) regroupe 28 **épisodes de crue**. On peut choisir de simuler de 1 à 28 épisodes en faisant passer l'épisode dans la fenêtre de droite (événements sélectionnés) :

- sélectionner (clic gauche) l'épisode dans la fenêtre de gauche ou de droite,
- cliquer  ou  pour faire passer l'événement d'une fenêtre à l'autre

Un double-clic gauche sur un événement le bascule d'une fenêtre vers l'autre. On peut cliquer plusieurs événements en utilisant la touche Shift du clavier (sélection en continuité) ou la touche Ctrl (sélection événement par événement).

Les événements peuvent être visualisés un par un en utilisant le bouton  une fois l'événement sélectionné.

Le **pas de temps de calcul** qui va servir dans l'exécution des modèles est exprimé en minutes, et doit être un diviseur ou un multiple du temps de lecture. Initialement, le pas de calcul est fixé égal au pas de lecture.

Les **stations pluviographiques et débitométriques** de référence figurent sur le deuxième niveau de la fenêtre. On valide les stations pluviométriques qui serviront à l'interpolation

spatiale des pluies en les transférant vers la fenêtre de droite (et inversement). La sélection des stations débimétriques permet de restituer les observations correspondantes dans les fichiers résultats du modèle. En cas d'optimisation des paramètres, la station correspondant aux débits observés auxquels seront comparées les débits simulés doit impérativement être sélectionnée.

Le bouton  correspond à l'introduction de coordonnées à partir d'un fichier Texte (cet aspect sera abordé plus tard et est utile notamment pour des pluies radar)

Le bouton  correspond à une visualisation du positionnement des pluviomètres.

Les boutons en haut à droite de l'écran "**Méthodes d'interpolation – Thiessen ou Inverse Distances**" permettent de choisir quelle méthode on va utiliser pour interpoler les pluies sur chaque maille.

2.5.3. Menu 3 : Paramètres Modèles

Ce menu sert à définir les modèles et les paramètres qui vont être utilisés pour la fonction de production et la fonction de transfert.

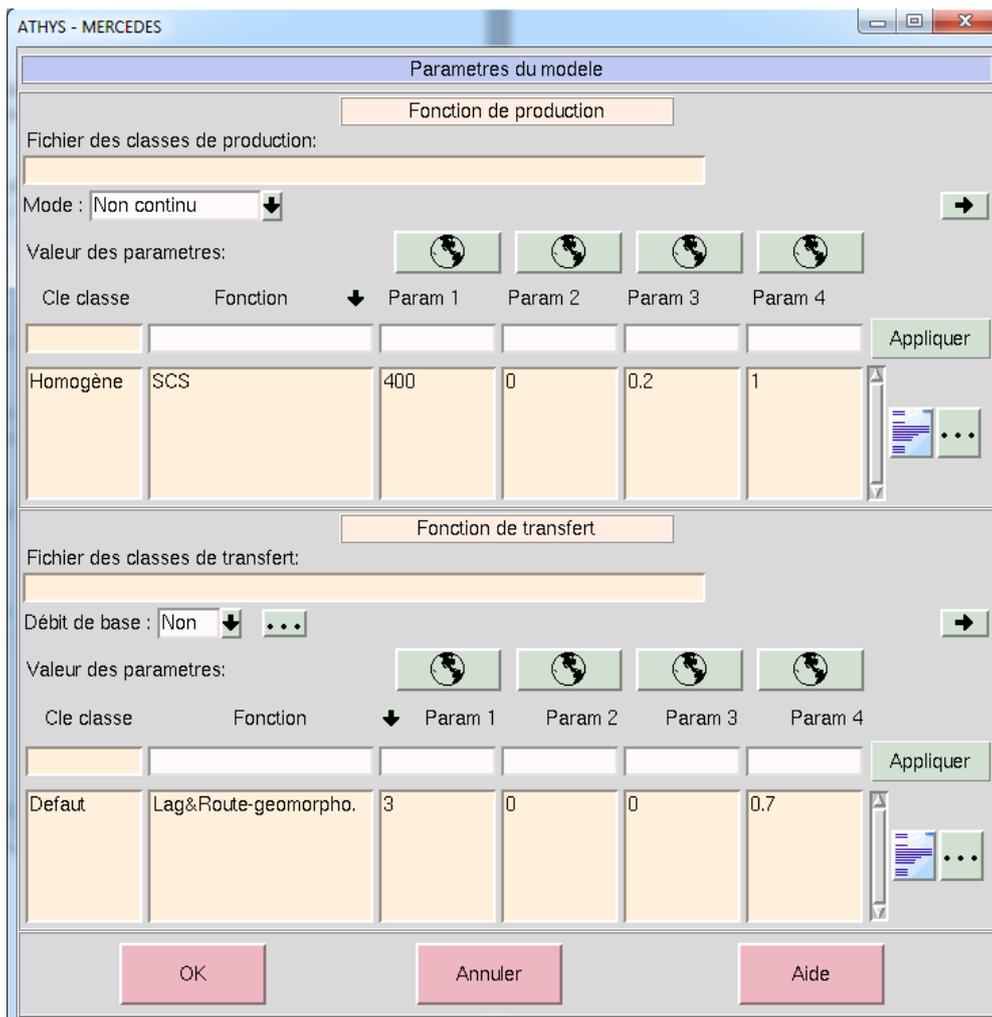


Figure 2-23

Fonction de Production

La flèche  permet le choix entre les fonctions de production programmées. Une fois la fonction choisie, elle apparaît dans le bandeau supérieur. On peut alors choisir la valeur des paramètres du modèle et valider ce choix par le bouton Appliquer à droite du bandeau.

Le Mode "**Continu**" ou " **Non continu**" désigne le comportement du réservoir sol, notamment l'état initial de ce réservoir quand des événements pluviométriques se succèdent. Le mode continu implique que le niveau H_0 du réservoir au début d'un épisode dépend du niveau H_1 à la fin de l'épisode précédent et de la durée t_0-t_1 séparant les 2 épisodes : $H_0 = H_1.exp(-ds(t_0-t_1))$, où ds est le coefficient de vidange retenu dans la fonction de production. Chaque fonction de production peut admettre 8 paramètres, dont 4 seulement sur le même écran.

Les 4 autres paramètres sont accessibles en cliquant sur la flèche , sur le côté droit de l'écran.

En mode non continu, le niveau H_0 est fixé à une valeur constante, indépendamment de celui l'épisode précédent.

Il est possible de faire varier les paramètres de production d'un événement à l'autre (voir section 3.4).

Il est possible de choisir différentes fonctions ou différents paramètres sur le bassin (voir section 4.2 et section 6).

Fonction de Transfert

La flèche  permet le choix entre les fonctions de transfert programmées. Une fois la fonction choisie, elle apparaît dans le bandeau supérieur. On peut alors choisir la valeur des paramètres du modèle et valider ce choix par le bouton Appliquer à droite du bandeau.

Chaque fonction de production peut admettre 8 paramètres, dont 4 seulement sur le même écran.

Les 4 autres paramètres sont accessibles en cliquant sur la flèche , sur le côté droit de l'écran.

Comme pour la production, il est possible Il est possible de faire varier les paramètres de transfert d'un événement à l'autre (voir section 3.4), ou de choisir différentes fonctions ou différents paramètres sur le bassin (voir section 4.2 et section 6).

Débit de base

Le mode **Débit de base** (Oui/Non) permet de prendre en compte et de modéliser le débit de base dans la simulation des épisodes de crue. Le mode Débit de base – Oui permet de reconstituer un débit de base de la forme :

$$Q(t) = Q_0. \exp(-\alpha.(t-t_0))$$

où

- Q_0 et α sont fixés constants pour tous les épisodes (FIX)
- Q_0 et α sont déduits des observations à une station de référence (OBS)
- Q_0 et α sont déduits de l'épisode précédent (AJUST)

Ces options sont à définir dans la fenêtre qui apparaît lorsqu'on active le mode Débit de base :

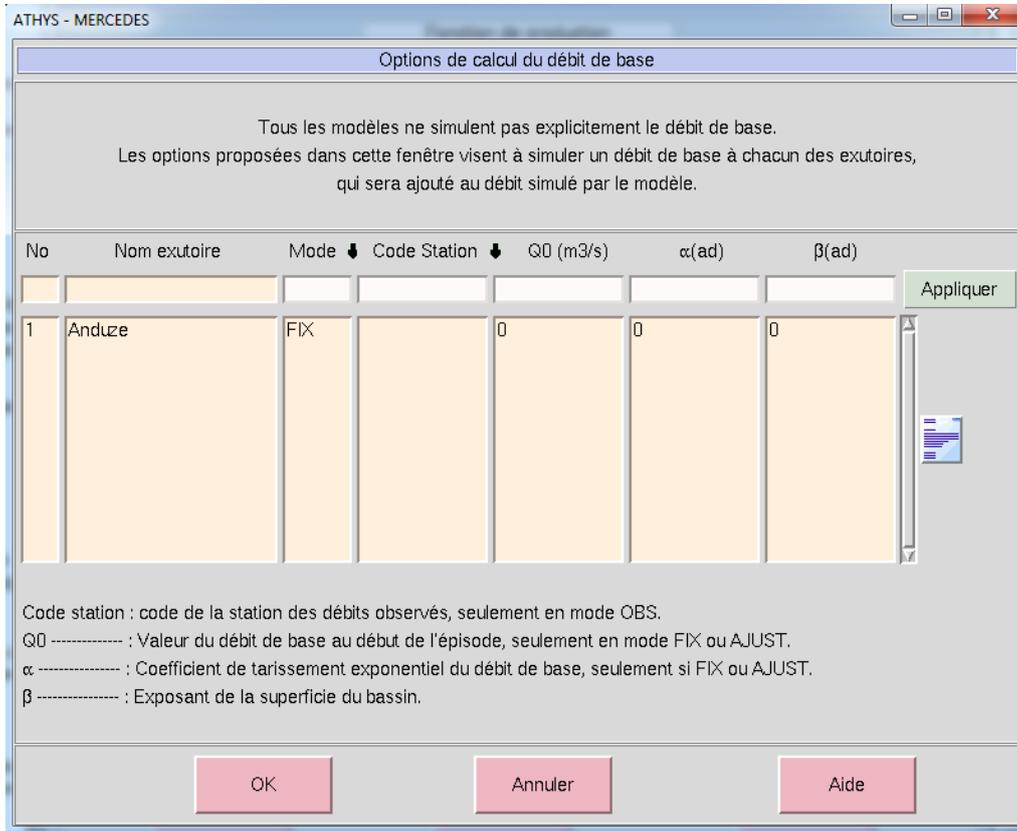


Figure 2-24

Icones

Les icones  permettent de faire varier dans l'espace les paramètres de la colonne correspondante, en fonction d'une carte géographique (voir section 6)

Les icones  permettent de faire varier pour chaque épisode les paramètres de la colonne correspondante, en fonction des valeurs définies dans un tableau (voir section 3.4)

Les icones  permettent de remplir le tableau des paramètres en fonction d'un fichier organisé comme suit, dans le cas de plusieurs classes de production ou de transfert :

Clé classe	Fonction	Par1	Par2	Par3	Par4	Par5	Par6	Par7	Par8
------------	----------	------	------	------	------	------	------	------	------

2.5.4. Menu 4 : Optimisation

Ce menu permet de calculer automatiquement les paramètres « optimaux » d'un modèle, par minimisation d'une fonction d'erreur entre valeurs observées et valeurs simulées par le modèle.

The screenshot shows the 'Procédure d'optimisation' window. It contains the following sections:

- Paramètres de production:** A table with columns 'Cle classe', 'Fonction', 'Param 1', 'Param 2', 'Param 3', and 'Param 4'. The 'Homogène' class is selected for 'SCS' with values 400, 0.2, 0.2, and 1. Below it are 'Bornes' (lower and upper) for each parameter.
- Paramètres de transfert:** A similar table with 'Defaut' class for 'Lag&Route-gec' with values 3, 0, 0, and 0.7. It also includes 'Bornes'.
- Station hydro de référence:** A dropdown menu set to '1000000000-1 Anduze'.
- Exutoire associée:** A dropdown menu set to '1 Anduze'.
- Mode optimisation:** Checkboxes for 'Methode d'optimisation' (Simplex, BLUE), 'Type d'optimisation' (Separee, Simultanee), and 'Evenements' (Non groupes, Groupes).
- Domaine de calage:** 'Calcul sur:' set to 'tout l'episode'. 'Bornes debits (em m3/s)' with 'Q inf.' = 50 and 'Q sup.' = 6000. 'Bornes temps (en pdt)' with 't inf.' = 1 and 't sup.' = 100.
- Choix du critère:** 'Transfert:' set to 'EQM' and 'Nombre d'iterations:' set to 300.

Buttons for 'OK', 'Annuler', and 'Aide' are at the bottom.

Figure 2-25

Sélection des paramètres à optimiser

Les paramètres à optimiser sont sélectionnés par un double clic gauche sur la valeur du paramètre. Celui-ci apparaît alors entouré des symboles < >.

Remarque : à l'ouverture de ce menu, les noms des paramètres ne sont pas renseignés. Il suffit de cliquer sur le nom de la fonction pour que ces noms soient renseignés

Remarque : il faut faire attention aux **bornes de variation** du paramètre à caler : la valeur initiale du paramètre – celle qu'on lui affecte dans le menu 3 et qui apparaît dans ce menu – doit aussi être incluse dans les bornes que l'on définit.

Bornes de variation

Les bornes inférieures et supérieures fixent le domaine des valeurs possibles pour les paramètres à optimiser. On veillera à choisir une valeur initiale à l'intérieur de ces bornes.

Choix des débits observés et simulés

On définira la station de référence des débits observés, et l'exutoire de référence des débits simulés. La station et l'exutoire de référence doivent avoir les mêmes coordonnées. Dans le

cas contraire, un message signale une différence entre ces coordonnées, qui doivent être corrigées pour la station (menu 2) ou l'exutoire (menu 1) de référence, ou sélectionner une autre station et/ou un autre exutoire.

Méthode d'optimisation

Deux méthodes d'optimisation sont disponibles, pour explorer l'espace des paramètres et déterminer le jeu de paramètres « optimal » qui minimise la fonction d'erreur entre valeurs observées et valeurs simulées.

La méthode du simplexe est une méthode d'exploration géométrique, alors que la méthode BLUE converge selon le gradient de chaque paramètre (pente – ou dérivée – du modèle par rapport au paramètre considéré). La convergence est plus rapide dans le cas du BLUE, mais le Simplexe est plus robuste, et peut contraindre effectivement les valeurs du paramètre à optimiser dans un intervalle borné (ce qui n'est pas toujours possible avec le BLUE).

Type d'optimisation

Le type d'optimisation "**Séparée**" correspond à un calage en deux temps : les paramètres du modèle de production sont d'abord calés à l'aide d'une fonction d'erreur calculée sur les volumes écoulés à l'exutoire, puis, une fois ces paramètres fixés, les paramètres de la fonction de transfert sont calés à l'aide d'une fonction d'erreur sur les débits à l'exutoire.

Le type d'optimisation "**Simultanée**" correspond à un calage simultané de tous les paramètres demandés, à l'aide d'une fonction d'erreur sur les débits à l'exutoire.

L'option "**Evènements Non groupés**" ou "**Evènement groupés**" correspond à une optimisation :

- soit individuelle sur chaque événement : on obtiendra pour chaque événement un jeu de paramètres optimaux
- soit sur l'ensemble des événements: on obtiendra un seul jeu de paramètres optimaux, commun à tous les évènements.

Domaine de calage

Le calcul peut s'effectuer sur :

tout l'épisode : le critère est calculé sur toute la totalité de l'événement, depuis la date de début jusqu'à la date de fin de l'épisode (dans le cas d'évènement non groupés) ou de l'ensemble des épisodes (dans le cas d'évènements groupés)

Pointe de crue : le critère est calculé uniquement sur le débit de pointe de crue, c'est-à-dire à la date du débit maximum observé.

Débits bornés : le critère est calculé uniquement pour les valeurs de débits observés comprises entre deux bornes Q_{inf} et Q_{sup} .

Temps bornés : le critère est calculé uniquement pour des valeurs de débit comprises entre deux dates t_{inf} et t_{sup} , exprimées en nombre de pas de temps.

Débits et temps bornés : il s'agit de l'association des 2 contraintes précédentes

Choix du critère

Selon le choix du mode d'optimisation précédent, on choisit un critère de calage pour les fonctions de production et de transfert.

Si on a choisi un type d'optimisation simultanée, on ne choisit qu'un critère pour le fonction de transfert, car le calage ne se fera que sur la comparaison débits mesurés / débits calculés.

Quatre critères sont actuellement proposés :

- Ecart Arithmétique Moyen **EAM** = $\frac{\sum |X_i - Y_i|}{\sum Y_i}$
- Ecart Quadratique Moyen **EQM** = $\frac{\sqrt{\sum (X_i - Y_i)^2}}{\sum Y_i}$
- Critère de **Nash** = $1 - \frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}$
- Critère **CREC** = $\sum \left(1 - \frac{\bar{X}}{Y_i}\right) \times \sum \left(1 - \frac{Y_i}{\bar{Y}}\right) \times \frac{1}{N}$

où les X_i désignent les N valeurs calculées et Y_i les N valeurs observées et \bar{Y} est la valeur moyenne des N valeurs observées.

X et Y représentent les volumes écoulés dans le cas d'une optimisation séparée des paramètres de production, et les débits dans le cas d'une optimisation simultanée des paramètres de production et de de transfert.

Remarque : dans le cas du critère de Nash, ne sont pris en compte que les couples de valeurs (observées et calculées) correspondant à des valeurs observées strictement positives.

2.5.5. Menu 5 : Analyse de sensibilité

Ce menu permet de faire varier 2 critères dans une plage de valeurs donnée, et de visualiser la variation de la fonction critère utilisée. L'analyse de sensibilité est complémentaire à l'optimisation, et outre la localisation des jeux de paramètres optimaux, indique la variabilité du critère autour de la valeur optimale, la présence de différentes régions où le critère est proche de la valeur optimale, une éventuelle dépendance entre paramètres.....

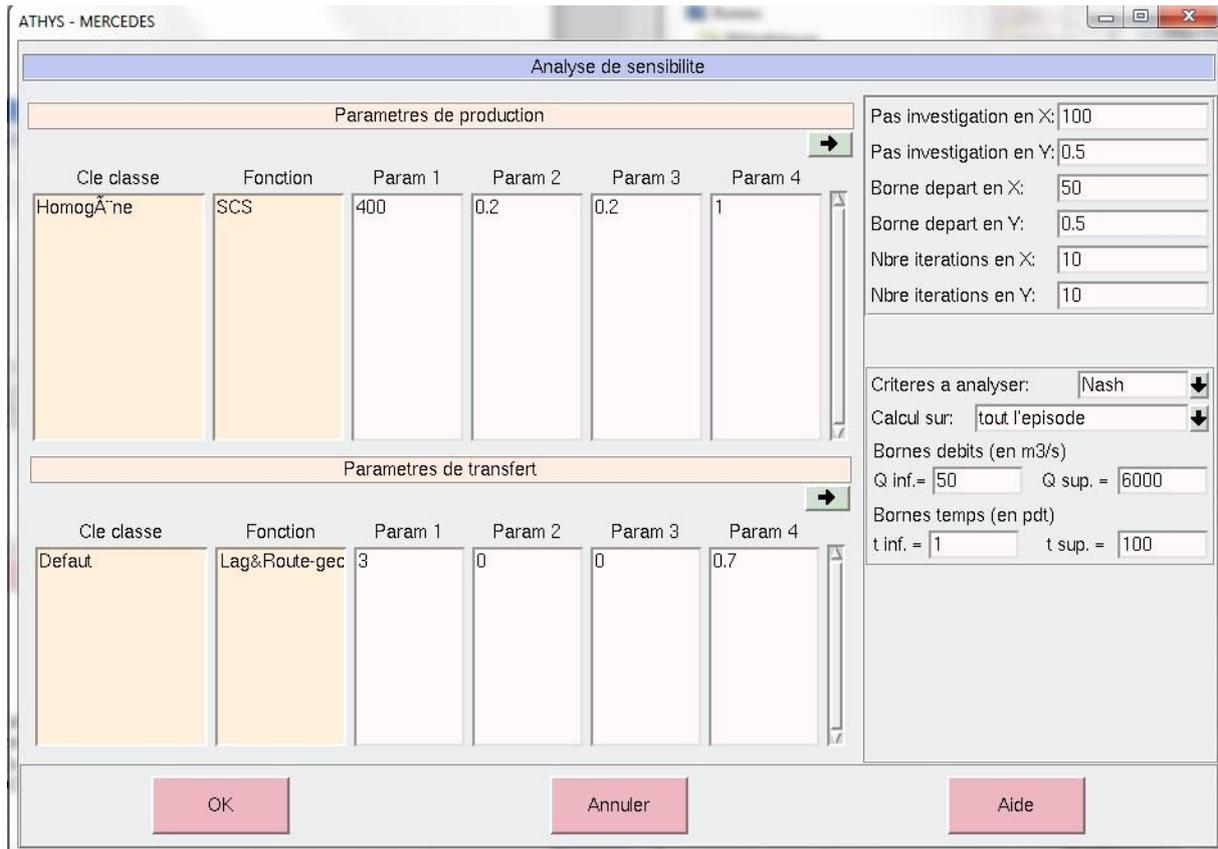


Figure 2-26

Sélection des paramètres à faire varier

Pour des raisons liées à la visualisation des résultats, le nombre de paramètres à faire varier est **limité à 2**. La sélection (ou désélection) d'un paramètre est réalisée par double-clic gauche sur le champ correspondant à la valeur du paramètre. Dans la fenêtre ci-dessus, 2 paramètres ont été sélectionnés : paramètre S de la fonction de production SCS, paramètre Vo de la fonction de transfert Lag and Route.

NB

- Les variations des paramètres ne sont autorisées que dans l'intervalle des **bornes inférieure et supérieure** déclarées pour chaque paramètre dans le menu 4 (Optimisation)
- Le critère calculé pour l'analyse de sensibilité est systématiquement un critère d'erreur sur les débits
- L'analyse de sensibilité peut être pratiqué pour chaque épisode considéré individuellement, ou pour un groupe d'épisodes (et dans ce cas, le critère d'erreur est calculé sur l'ensemble des débits du groupe d'épisodes). Ce choix est fixé dans le menu 4 (Optimisation), par l'option Evénements groupés ou non.

Les variations des paramètres sélectionnées sont fixées par :

Pas d'investigation : incrément de la variation du paramètre sélectionné

Borne départ : valeur initiale du paramètre sélectionné

Nombre d'itérations : chaque itération ajoute un incrément à la valeur initiale du paramètre sélectionné

NB :

- Le paramètre X est toujours le 1^{er} paramètre sélectionné, dans l'ordre des lignes, puis des colonnes; le paramètre Y est le second paramètre sélectionné

Choix du critère : plusieurs [critères d'erreur](#) sont disponibles: EQM, EAM, Nash, CREC (voir section précédente)

Domaine de calage : le calcul de la fonction critère peut être effectué sur différentes parties des hydrogrammes de crue, hydrogramme complet, débit maximum de crue, débits compris entre deux valeurs Q1 et Q2 et/ou entre deux instants t1 et t2 (voir section précédente).

Lorsque la procédure d'analyse de sensibilité est activée, les résultats apparaissent dans le fichier listing :

```
Calcul des variations du critere en cours....
```

```
Param1 Param2 Critere
```

```
50. 0. -0.230813111
```

```
50. 0.2 -3.18387821
```

```
50. 0.4 -3.39101582
```

```
etc...
```

Les variations de la fonction critère peuvent également être représentées dans le fichier des variations du critère, obtenu en sortie de MERCEDES dans le menu 6 (Fichiers en sortie). Ce fichier peut être visualisé dans VICAIR

2.5.6. Menu 6 : Fichiers en sortie

Ce menu permet de déclarer les noms de fichiers des résultats des simulations.

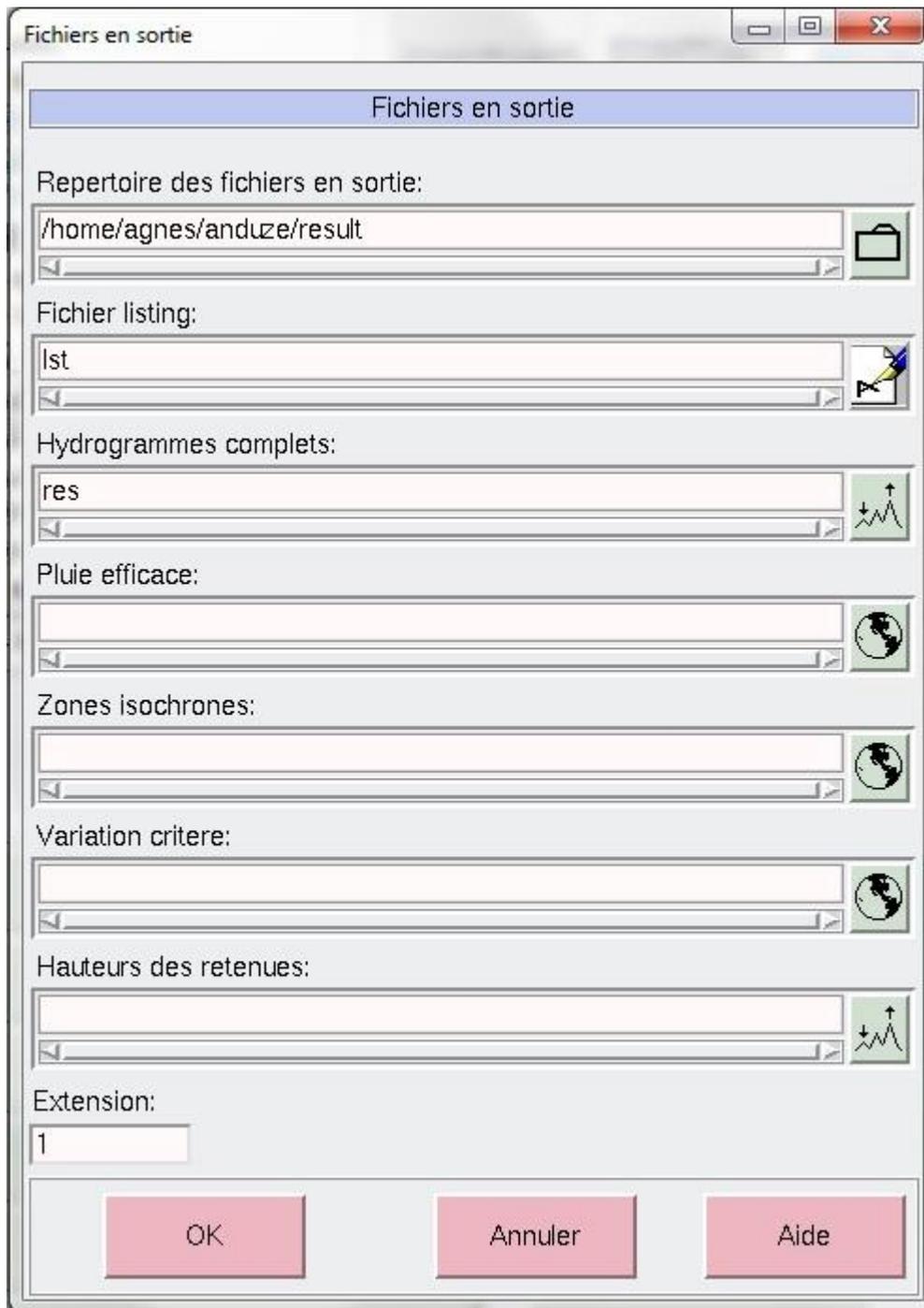


Figure 2-27

Répertoire des fichiers de sortie : Précise le répertoire de stockage des fichiers.

Fichier listing : Permet de nommer le fichier où seront stockés les résultats de la simulation. Ce fichier peut être édité directement en activant l'icône .

Hydrogrammes complets : Désigne le nom du fichier des hydrogrammes simulés. Ceux-ci peuvent être visualisés en activant l'icône .

Pluie efficace : Restitue le fichier des cumuls produits par chaque maille du bassin. Ceux-ci peuvent être visualisés en activant l'icône .

Zoes isochrones : Restitue le fichier des temps de parcours de chaque maille à l'exutoire. Ceux-ci peuvent être visualisés en activant l'icône . Ces fichiers ne sont disponibles que pour des fonctions de transfert de type mailles indépendantes, pour lesquelles les temps de parcours ne varient pas au cours de l'épisode.

Variation critère : Génère une matrice des variations de la fonction critère associée à une analyse de sensibilité, en fonction des variations de 2 paramètres. Cette matrice peut être visualisée en activant l'icône .

Hauteurs des retenues : Entrez le nom du fichier dans lequel vous suivrez l'évolution du niveau simulé des retenues. Il s'agit d'un fichier TXT dans lequel les colonnes retracent les niveaux d'eau des retenues déclarées dans le menu 1. Ce fichier peut être affiché en cliquant sur .

Extension : L'extension sera automatiquement accolée aux noms des fichiers déclarés. Ainsi, le nom res déclaré dans le champ Hydrogrammes complets sera stocké dans le répertoire /home/.../result sous le nom res.1. Cet aménagement permet de ne changer que l'extension lors de différentes simulations.

2.6. Exercices d'application

Remarque : Les numéros des épisodes qui figurent sur les exemples de sorties graphiques correspondent à une ancienne numérotation, mais représentent bien les épisodes demandés.

Simulation d'un événement (Exercice 1)

Ce premier exercice a pour but de se familiariser avec l'utilisation de MERCEDES. On réalisera une simulation des événements contenus dans le fichier base28.txt. On utilisera le premier événement du fichier.

En plus des informations déjà fournies, on donne également les coordonnées de l'exutoire du bassin, à Anduze :

$X = 732\ 087$; $Y = 1\ 896\ 930$.

On utilisera :

Menu 1 :

échantillonnage 50x50

Menu 2 :

on sélectionnera uniquement la pluie moyenne, que l'on peut positionner en n'importe quel point du MNT, on choisira par exemple $X=700000$ et $Y=1900000$

NB : Dans le cas d'une seule pluie, le mode d'interpolation est indifférent, Thiessen ou inverse distances

Menu 3 :

mode non continu

Fonction de production SCS avec $S=300\text{mm}$, $Ia/S=0.2$; $\omega=0.2$; $ds=1$

Fonction de transfert Lag&Route Simple avec $V_0=1\text{m/s}$, $\alpha=0$, $K_0=0.7$, $K_1=0$

Menu 6 :

fichier listing lst

fichier résultats res

extension 1

Pour visualiser les résultats, on activera les touches  et  du menu 6

Comparaison avec un hydrogramme observé (Exercice 2)

Sélectionner dans le menu 2 la station débits Anduze, coordonnées $X = 732087$, $Y = 1896930$

Lancer la simulation, et comparer les hydrogrammes observé et simulé.

On s'attachera à bien assimiler les différents critères de comparaison entre les hydrogrammes observé et calculé.

Modification des paramètres (ou du modèle) – (Exercice 3)

Simuler pour différentes valeurs de S (100, 200, 300 mm) et de V_0 (1, 2, 3 m/s). Comment évoluent les hydrogrammes dans un cas ou dans l'autre.

Comparaison de 2 simulations (Exercice 4)

On comparera les simulations précédentes, réalisées avec différents jeux de paramètres. Si res1 et res2 sont 2 simulations :

Ouvrir fichier res1 dans Vishyr

Ajout de station



Choisir fichier res2

Sélectionner la station à ajouter

Activer l'opération

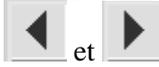
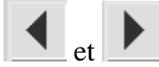


Eventuellement sauvegarder le fichier d'origine modifié

NB : on donnera des extensions 1, 2, 3 etc... aux différentes simulations

Simulation d'une série d'évènements (Exercice 5)

Dans le fichier d'évènements hydro-pluviométriques précédent, on simule les évènements n°1, 2 et 3 en série, et on les compare avec les hydrogrammes observés. Pour visualiser les

évènements, on activera les icônes  de la fenêtre graphique. Si le menu principal de VISHYR est ouvert, ces icônes sont désactivées et les icônes  et  seront utilisées.

Simulation à l'aide d'une pluie spatiale (Exercice 6)

On remplacera dans le menu 2 la pluie moyenne, par les pluies observées localement aux différents postes pluviométriques. On contrôlera la localisation des postes pluviométriques par rapport au bassin, par l'icône



On choisira une méthode d'interpolation de type Thiessen.

3. CALIBRATION DU MODELE SCS-LR

Les paramètres d'un modèle peuvent dans certains cas être fixés en 1^{ère} approximation d'après des abaques ou des formules tirées de la littérature. Exemples : paramètre S du modèle SCS, ou paramètre Vo du lag and route. Les paramètres peuvent également être déterminés à partir de synthèses régionales, quand elles existent.

Il est toutefois recommandé de procéder à la calibration du modèle à partir d'observations pluie-débit, quand c'est possible. On connaît mal actuellement les relations qui lient les paramètres d'un modèle aux caractéristiques du bassin, voire de l'épisode. Les objectifs de la calibration visent à définir le mode d'emploi du modèle, comment fixer les paramètres pour chaque épisode, comment garantir les meilleures extrapolations. Nous en donnons des exemples dans ce qui suit.

3.1. Sensibilité des crues aux incertitudes sur les paramètres

Pour le modèle SCS-LR, on admettra que les paramètres à calibrer sont S et Vo (les autres paramètres sont fixés, $Ia/S = 0.2$, $ds = 1 \text{ j}^{-1}$, $w = 0.2$, $Ko=0.7$, on admettra que ce sont des caractéristiques régionales – Sud de la France). Ces 2 paramètres ont des effets relativement bien différenciés : S joue sur le volume et ne modifie pas le calage dans le temps, Vo joue sur le temps de montée et la position du maximum, mais ne modifie pas les volumes.

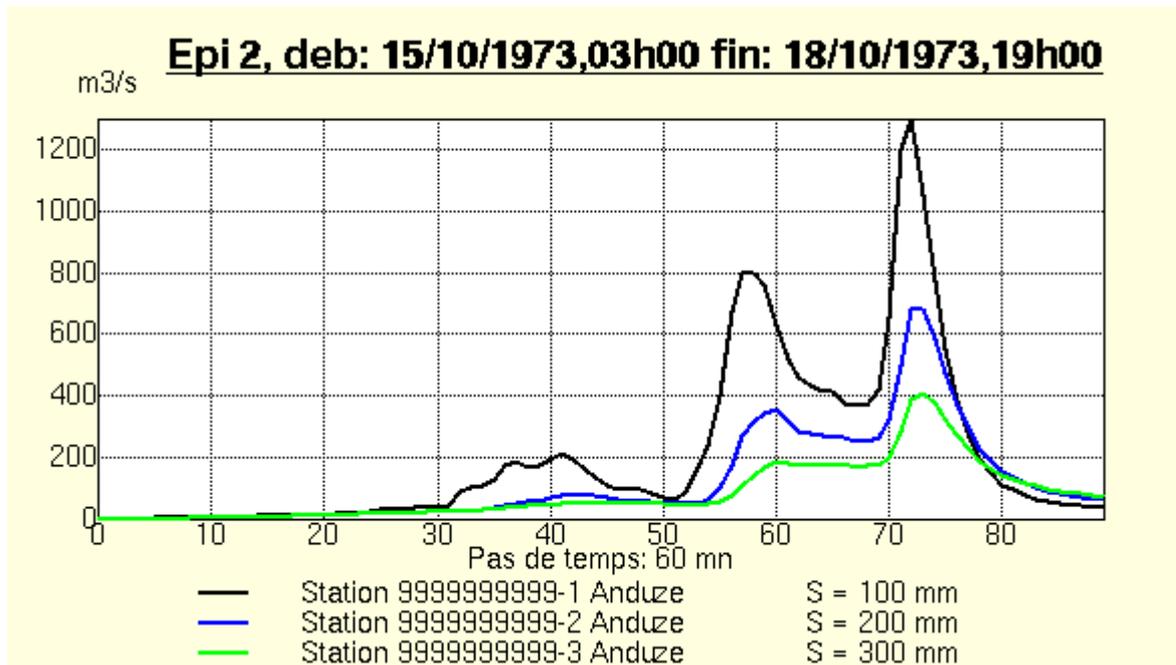


Figure 3-1

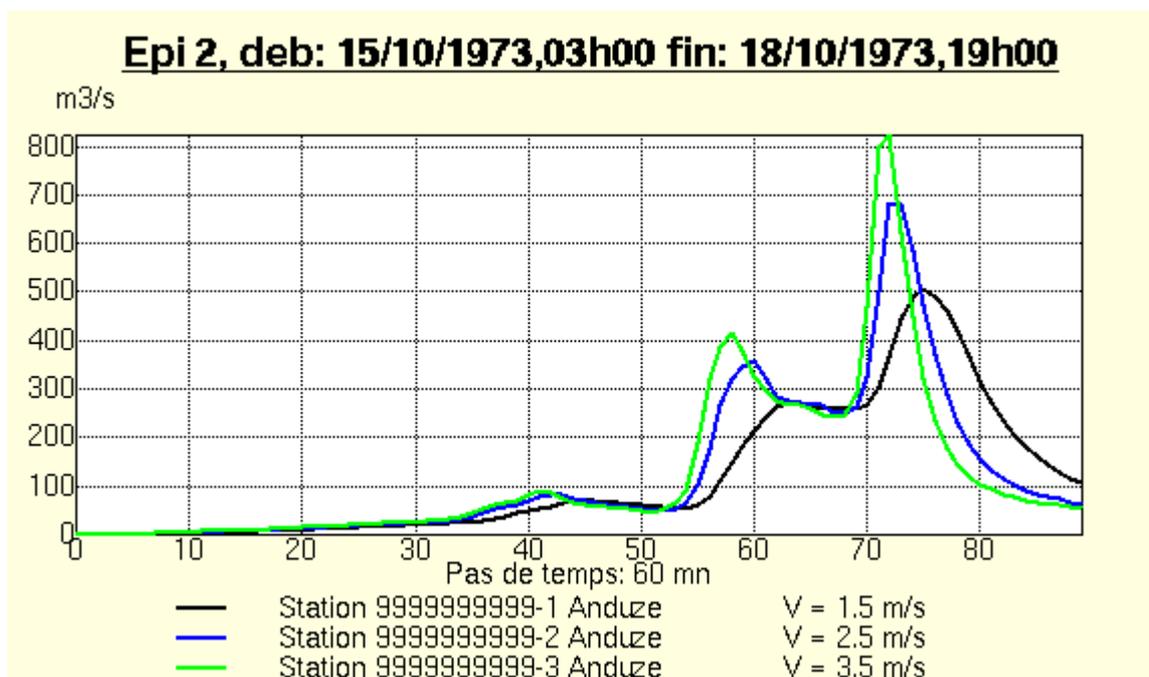


Figure 3-2

3.2. Calibration du modèle d'après les observations

Exercice : On reprendra l'épisode ci-dessus (fichier base28.txt, épisode du 15/10/1973 au 18/10/1973) et on procédera à une calibration manuelle des paramètres S et Vo. Par exemple, épisode n°2, valeurs initiales S = 300 mm, Vo = 1 m/s, quelles sont les valeurs finales ? On cherchera à optimiser une fonction d'erreur, par exemple le critère de Nash, et à contrôler graphiquement l'ajustement des débits calculés aux débits observés.

Cet exercice peut être complété par l'utilisation des procédures automatiques de calibration du modèle. La procédure d'optimisation consiste à déterminer les paramètres associés à la valeur optimale du critère (la plus proche de 1 pour le critère de Nash, la plus proche de 0 pour les autres critères), à l'aide de la méthode itérative du Simplex (Rao, 1978). L'analyse de sensibilité représente l'ensemble des valeurs du critère en fonction des variations des paramètres, et renseigne sur les différentes valeurs admissibles autour du jeu "optimal", sur la dépendance éventuelle des paramètres, sur la sensibilité du modèle à chaque paramètre.

Exercice : On procédera ensuite à une calibration automatique du modèle sur cet événement. Parmi les différentes options de calibration, on choisira : critère de Nash, calibration simultanée production et transfert, calibration sur l'hydrogramme complet ... On pourra jouer sur ces différentes options de calibration, et apprécier les résultats. Quelles sont les valeurs finales des paramètres ? Ces valeurs conviennent-elles à l'ensemble des épisodes ? Comment interpréter la variabilité des paramètres ?

NB : on choisira un échantillonnage élevé (10x10 ou plus), pour diminuer les temps de calcul dans le cadre de cet exercice

Correction de l'exercice (obtenu ici avec un échantillonnage 10x10, et pluies spatiales)

Analyse et interprétation de la variabilité événementielle des paramètres

N°	date	S (mm)	Vo (m/s)	Qp m3/s	Qb m3/s	Nash
2	15/10/1973	168.7	2.6	477.1	1.8	0.95
6	11/09/1976	244.2	3.1	1009.1	15.6	0.92
7	08/11/1976	161.7	2.5	914.3	18.6	0.93
9	19/10/1977	258.2	2.6	1058.2	0.4	0.9
12	07/12/1977	145.0	3.1	418.5	27.0	0.88
21	22/09/1994	349.9	2.8	665.7	9.7	0.92
22	19/10/1994	336.5	2.5	814.0	16.3	0.91
23	02/11/1994	207.0	2.5	791.7	34.0	0.85
27	18/09/1995	215.2	3.6	672.9	41.0	0.84
28	03/10/1995	197.3	2.5	1096.2	38.0	0.7
29	13/10/1995	232.8	2.1	1247.9	27.0	0.92
34	11/01/1996	60.2	1.1	526.7	155.0	0.7
37	20/01/1996	123.7	1.2	689.3	91.0	0.1
54	03/11/1997	200.2	2.0	762.2	4.5	0.92
56	16/12/1997	183.4	5.6	1504.2	10.6	0.85
58	15/04/1998	163.4	2.0	368.5	3.9	0.86
59	29/04/1998	105.7	1.6	377.2	19.2	0.85
60	27/05/1998	98.2	2.2	472.9	13.0	0.85
65	17/05/1999	133.3	2.0	603.4	13.5	0.78
66	19/10/1999	233.5	2.8	685.8	37.0	0.98
70	28/09/2000	323.2	3.6	1224.6	3.4	0.99
79	09/10/2002	183.5	1.4	339.9	35.0	0.85
80	23/11/2002	67.4	2.0	567.8	103.0	0.94
81	09/12/2002	79.5	1.2	604.9	45.0	0.81
86	30/09/2003	300.2	2.4	452.3	9.3	0.94
87	15/11/2003	132.7	1.8	626.2	21.2	0.91
88	21/11/2003	84.7	1.9	940.1	40.0	0.89
89	29/11/2003	71.3	1.8	1071.7	46.0	0.85
Moy.		180.7	2.4	749.4	31.4	0.8
Ec.-type		83.2	0.9	301.9	34.3	0.2

Tableau 3-1

On constate une variation importante de S et de V_0 qui fait qu'on peut difficilement adopter une valeur moyenne pour tous les épisodes.

S représente la hauteur d'eau stockable en début d'événement, et la variabilité de S s'explique par les conditions initiales de saturation des sols. Si on analyse les variations saisonnières de S en calculant une valeur moyenne (en bleu) et un écart-type (en rouge) pour chaque mois, on constate une variation caractéristique, avec un maximum à la fin de l'été sur le graphique suivant. Mais les conditions particulières d'une année (sécheresse prolongée jusqu'en octobre ou novembre, comme c'était le cas en 2007) ne sont pas prises en compte.

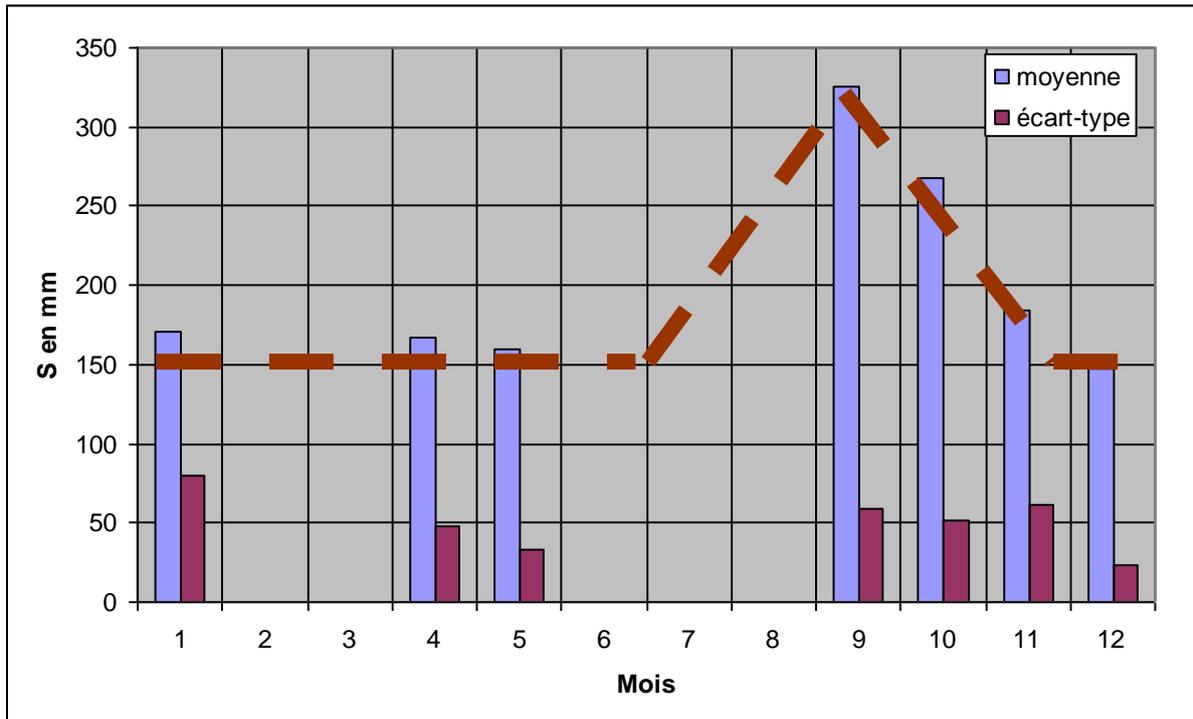


Figure 3-3

Pour mieux prendre en compte les anomalies saisonnières, on peut essayer de relier cette hauteur à un indicateur de l'état de saturation du bassin versant : le débit de base.

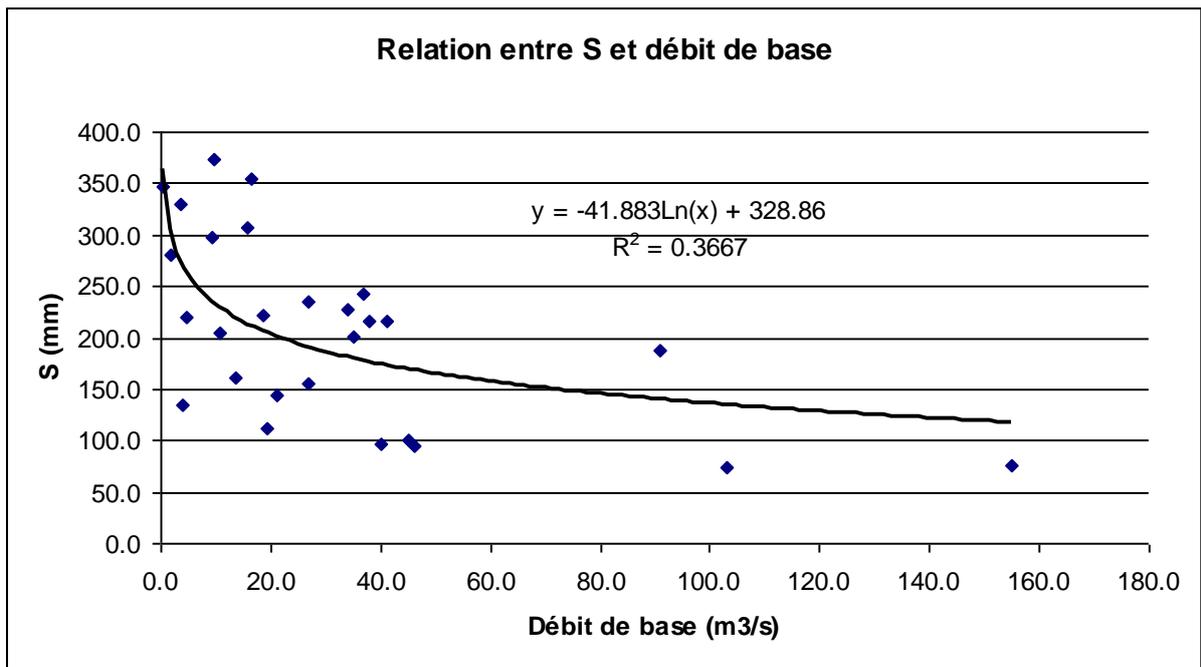


Figure 3-4

Le paramètre S de la fonction de production SCS peut donc être initialisé selon la relation :

$$S_{mm} = -41.8 \cdot \ln(Qb_{m3/s}) + 328.8$$

Autre possibilité : indice Hu2 produit par le modèle SIM (Météo-France)

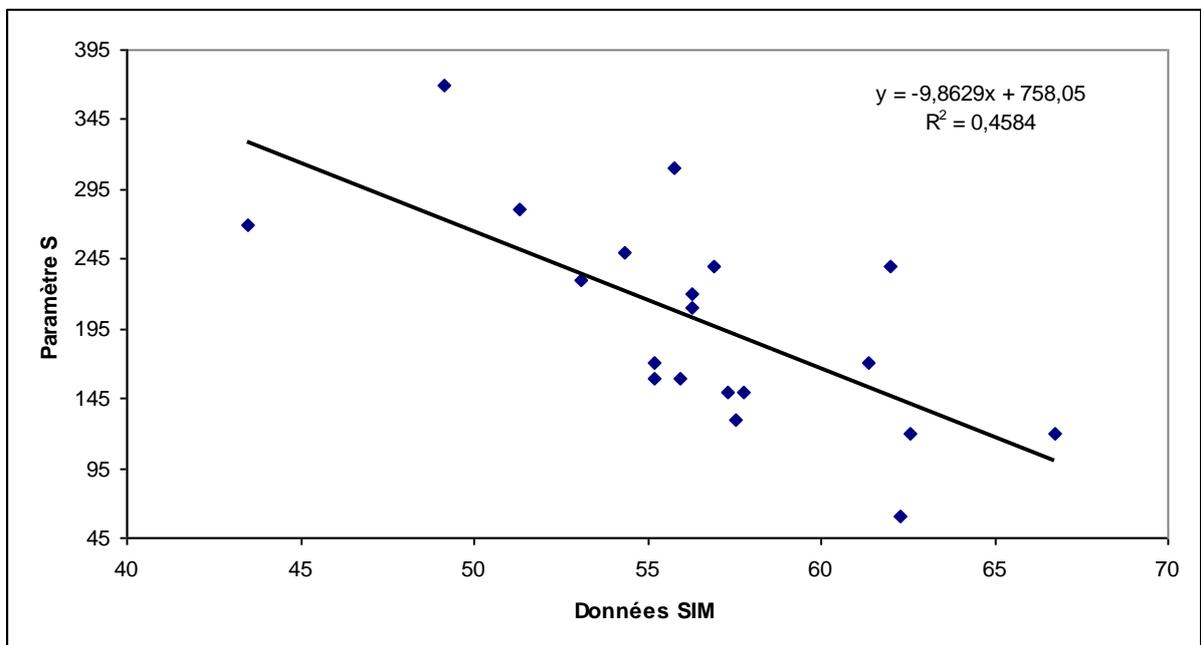


Figure 3-5

$$S_{mm} = -9.9 \cdot Hu2 + 758.1$$

En ce qui concerne le paramètre V_0 , il n'y a pas de corrélation nette avec par exemple le débit maximum. Par ailleurs, les simulations montrent que V_0 est moins discriminant que S sur les résultats. Aussi, adopter une valeur moyenne pour V_0 est moins pénalisant que pour S .

3.3. Evaluation finale du modèle

La performance du modèle est traduite par les valeurs de fonctions d'erreur ou d'écart entre valeurs observées et valeurs calculées :

$$\text{Le critère de Nash} = 1 - \frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}$$

exprime par exemple le complémentaire à 1 du % moyen de l'écart entre valeurs observées et calculées, rapporté au % moyen de l'écart entre les valeurs observées et la moyenne des valeurs observées

$$\text{L'écart quadratique moyen} = \frac{\sqrt{\sum (X_i - Y_i)^2}}{\sum Y_i}$$

exprime le % moyen de l'écart entre valeurs observées et calculés par rapport à la moyenne des observations.

Outre la nature de la fonction d'erreur, la performance du modèle peut également être jugée de différentes manières :

- Par son rendement optimal : c'est-à-dire sa capacité d'ajustement à des observations après calibration du modèle. Ici, le critère de Nash moyen, calculé sur l'ensemble des 28 épisodes, est de l'ordre de 0.8, et varie entre 0.7 et 0.99. En ajustement, l'erreur sur les débits est donc en moyenne de 20% de l'écart moyen à la valeur moyenne de débit.
- Par son rendement en mode projet, c'est-à-dire sa capacité prédictive sur d'autres événements que ceux déjà observés. C'est souvent ce rendement qui est intéressant, dans la mesure où il renseigne sur la performance réelle du modèle, une fois son mode d'emploi défini pour des applications futures.

Dans notre cas, la performance du modèle en mode projet peut être évaluée en simulant les crues à l'aide du paramètre S estimé par la régression S -Hu2 ($R^2 = 0.48$). Ci-après un exemple de comparaison entre les critères calculés en calibration, et les critères calculés en mode projet.

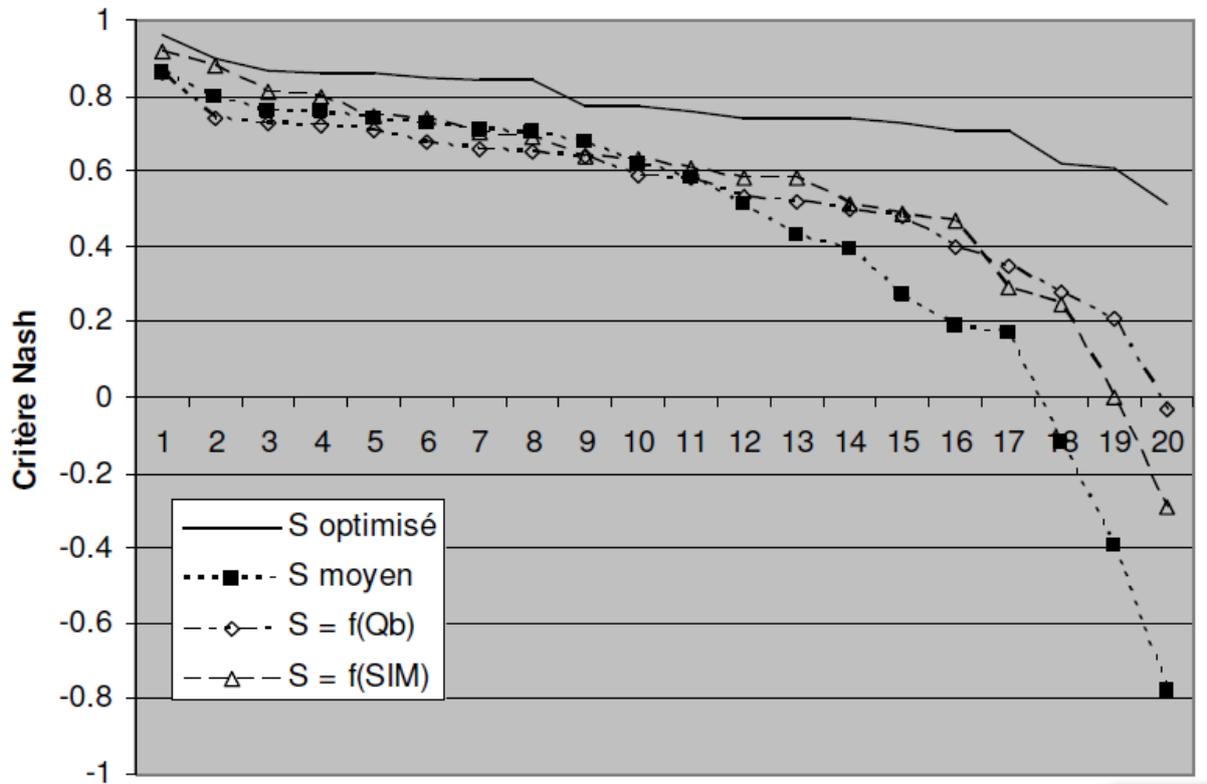


Figure 3-6

3.4. Prise en compte de la variabilité événementielle d'un paramètre dans MERCEDES

Il est possible d'affecter à un paramètre donné une valeur différente pour chaque événement. Le paramètre doit alors être déclaré comme var1 (ou var2, var3, ..., var6; respecter exactement cette syntaxe), les valeurs de var1 étant lues dans une fenêtre activée par l'icône  dans le menu 3.

Cle classe	Fonction	Param 1	Param 2	Param 3	Param 4	
Homogène	SCS	var1	0	0.2	1	Appliquer

Below the table, there is a vertical scrollbar and a button with three dots (⋮) to the right.

Figure 3-3

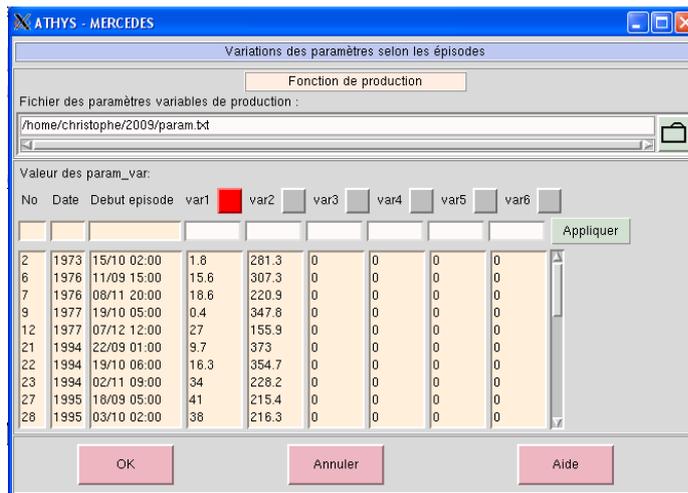


Figure 3-4

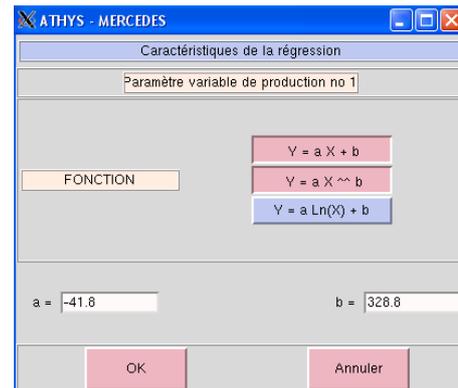


Figure 3-5

Ici, var1 représente les débits de base, var2 les valeurs optimales de S et var3 les valeurs optimales de Vo. Si on choisit d'associer S à var2, les valeurs de S seront respectivement 281.3, 307.3 etc.. pour les différents épisodes à simuler. Si on choisit d'associer S à var1, le carré rouge indique que les valeurs var1 sont utilisées dans une régression de type $Y = f(X)$, où Y représente le paramètre et X la valeur var1. On accède à ces régressions en cliquant directement sur le bouton rouge/gris.

Les valeurs de la Fig.3-8 peuvent être introduites manuellement. Elles peuvent aussi être lues dans un fichier externe, qui doit avoir la structure suivante :

2	1973	10150200	1.8	166.7	2.6	0	0	0
6	1976	9111500	15.6	242.1	3.1	0	0	0
7	1976	11082000	18.6	162.5	2.6	0	0	0
9	1977	10190500	0.4	251.4	2.5	0	0	0
12	1977	12071200	27	141.7	3.2	0	0	0
21	1994	9220100	9.7	345.2	3.0	0	0	0
22	1994	10190600	16.3	336.2	2.9	0	0	0
23	1994	11020900	34	191.2	2.3	0	0	0
27	1995	9180500	41	301.4	4.4	0	0	0
28	1995	10030200	38	189.3	2.5	0	0	0
29	1995	10130200	27	229.9	2.2	0	0	0
34	1996	1112100	155	67.5	1.3	0	0	0
37	1996	1200800	91	116.3	1.1	0	0	0
54	1997	11030400	4.5	190.4	1.9	0	0	0
56	1997	12161100	10.6	170.8	4.6	0	0	0
58	1998	4142300	3.9	149.9	1.8	0	0	0
59	1998	4291300	19.2	106.4	1.7	0	0	0
60	1998	5271200	13	100.2	2.3	0	0	0
65	1999	5170500	13.5	300.9	3.4	0	0	0
66	1999	10192100	37	235.5	2.8	0	0	0
70	2000	9281000	3.4	301.2	3.5	0	0	0
79	2002	10090200	35	177.4	1.3	0	0	0
80	2002	11231300	103	66.9	2.0	0	0	0
81	2002	12090700	45	78.1	1.2	0	0	0
86	2003	9301200	9.3	293.5	2.5	0	0	0
87	2003	11151100	21.2	129.6	1.9	0	0	0
88	2003	11210800	40	72.8	1.8	0	0	0
89	2003	11291800	46	65.5	1.7	0	0	0

Tableau 3-2

Les 3 premières colonnes reprennent les caractéristiques de l'épisode : n°, année, date début. Les 6 suivantes contiennent les valeurs susceptibles d'être associées à un paramètre : var1 à var6. Lors de la lecture du fichier externe, un test sur les 3 premières colonnes conditionne la mise à jour des valeurs var1 à var6.

NB : ce type de fichier est généré après sauvegarde d'une première modification des valeurs var1 à var6

Exercice : On utilisera le fichier param.txt pour simuler les crues avec des valeurs variables du paramètre S : valeurs optimales (var2) ou régression entre le logarithme du débit de base (var1) et la valeur de S.

4. IMPACT DU SPATIAL

On étudie ici la sensibilité du modèle à la spatialisé des données d'entrée du modèle (pluies, sols ...). On supposera que le modèle a été préalablement calibré, et on compare donc des hydrogrammes simulés obtenus avec les mêmes paramètres, mais des entrées plus ou moins spatialisées.

4.1. Impact de l'organisation spatiale de la pluie

Exercice

On veut analyser l'effet de la variabilité spatiale de la pluie sur les hydrogrammes. On va simuler les hydrogrammes en utilisant en entrée du modèle : a) la pluie moyenne, b) la pluie spatiale. On utilisera le fichier base28.txt, en sélectionnant comme entrées pluviométriques la pluie moyenne pour a, les pluies locales et l'interpolation Thiessen pour (b). On comparera les hydrogrammes des épisodes n°10 et 28 (voir exercice 4). On retiendra des paramètres constants ($S=300$ mm, $V_0=2.5$ m/s),

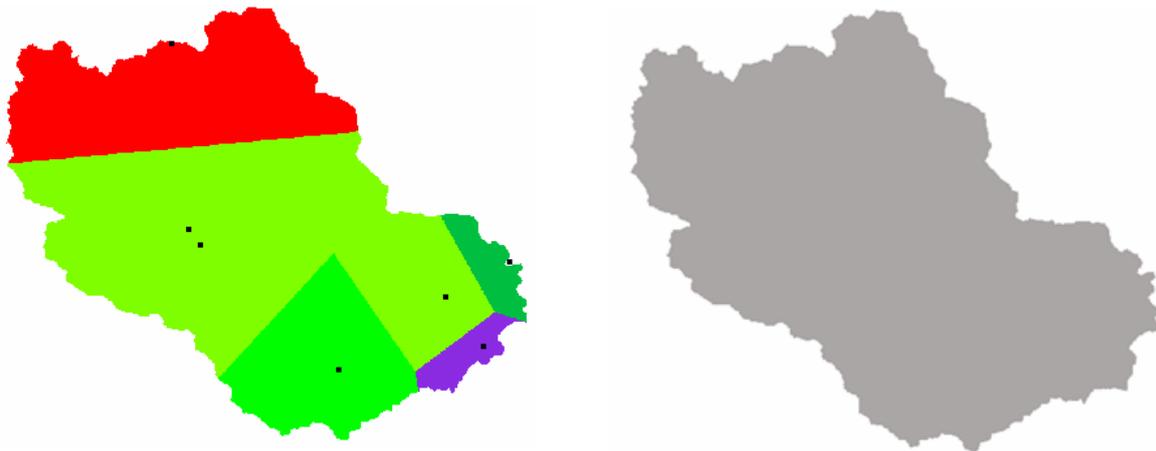


Figure 4-1

Correction de l'exercice

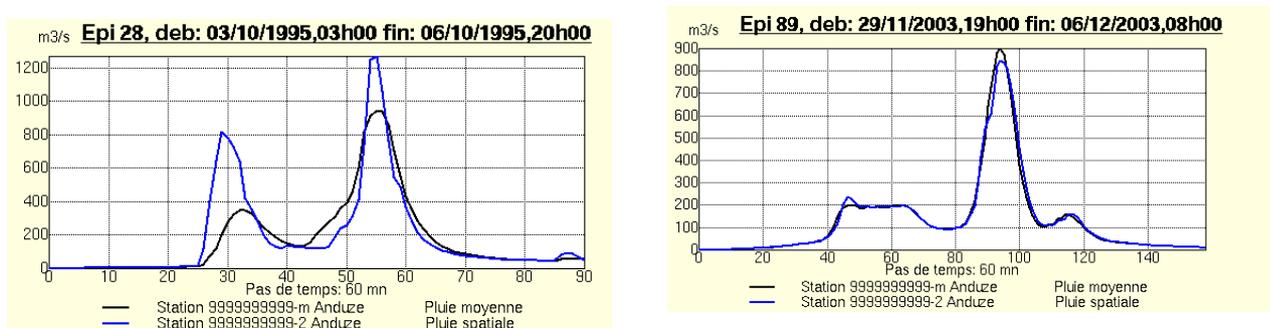


Figure 4-2

Les hydrogrammes sont différents dans le cas de l'épisode 28 (alias 10), où le coefficient de variation spatiale ($CV = \sigma/m$) du champ pluvieux est de l'ordre de 0.4 ($CV = 0.1$ dans le cas de l'épisode 89 alias 28). Le modèle global aura tendance à sous-estimer les volumes et les débits

de pointes de crue. Ces différences sont essentiellement dues à la localisation de la pluie et à la non-linéarité spatiale du schéma de production (on n'obtient pas le même volume en appliquant une pluie moyenne et une pluie variable dans l'espace). La figure ci-dessous représente la comparaison des simulations avec pluies moyennes ou spatialisées pour les 12 premiers épisodes.

A paramètres égaux, les volumes et les débits de pointe de crue sont sous-estimés quand on utilise en entrée du modèle la pluie moyenne. Le modèle distribué assure une meilleure précision de calcul de la crue, sans complexification du modèle (aucun nouveau paramètre n'a été introduit).

Plus généralement, les différences peuvent être reliées au coefficient de variation du champ de pluie (Arnaud et al., 2002). Pour un coefficient de variation de 1 (sensiblement celui de la pluie de septembre 2002 sur le Gardon d'Anduze), la réduction des volumes et des débits de pointe par le modèle global est d'environ 30-40 %.

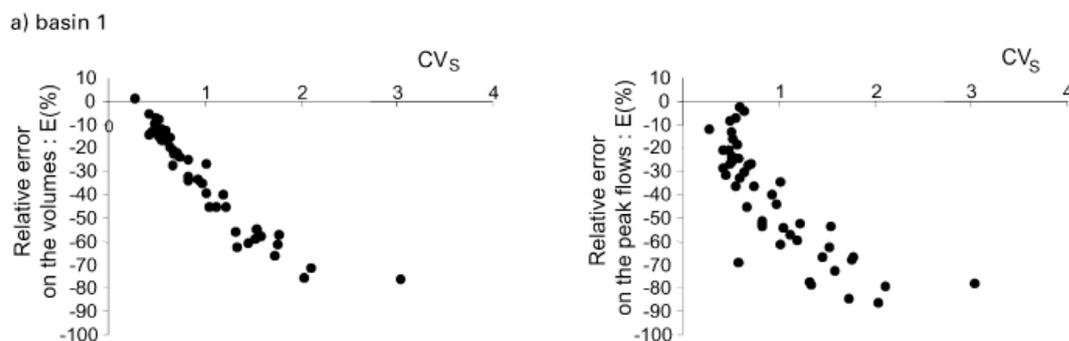


Figure 4-3 (Arnaud et al., 2002)

4.2. Impact de la variabilité spatiale des sols

Le modèle distribué permet de différencier les conditions de production (et de transfert). Est-il équivalent de considérer une valeur de perméabilité (ou une condition initiale) moyenne sur le bassin, ou de prendre en compte la variabilité spatiale de ces valeurs ?

Exercice : On veut analyser l'effet de la variabilité spatiale des sols (et des perméabilités sous-jacentes) sur le calcul des crues. On va simuler les hydrogrammes en utilisant : a) une partition du bassin en 3 unités de sols dont les valeurs du paramètre S sont respectivement $S = 100$ mm, $S = 200$ mm, $S = 300$ mm (la valeur moyenne de S est de 200 sur le bassin), b) une seule unité avec un $S = 200$ mm pour l'ensemble du bassin. On utilisera le fichier anduze.alt pour différencier les fonctions de production :

alt < 400 m	→ S = 100 mm
400 < alt < 600 m	→ S = 200 mm
600 < alt	→ S = 300 mm

On comparera les hydrogrammes des épisodes n°10 et 28 (28 et 89).

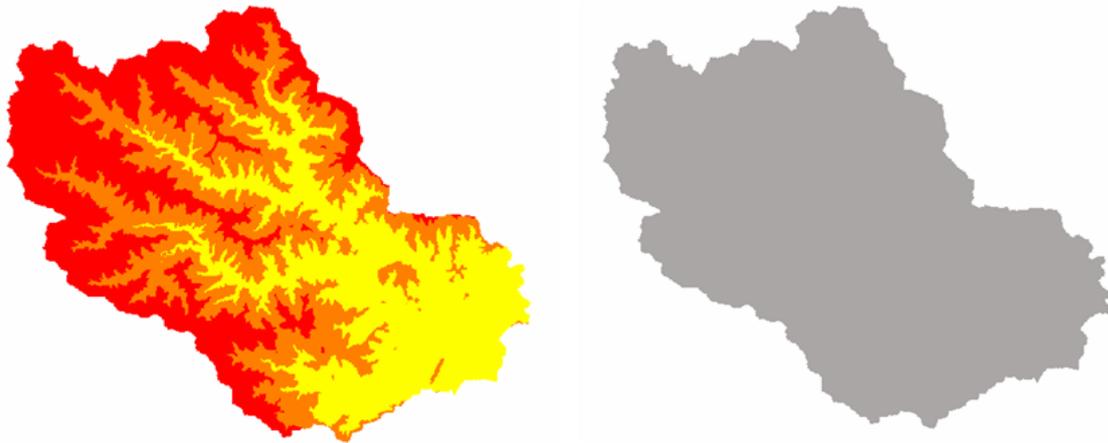


Figure 4-4

Correction de l'exercice

Pour différencier les classes de production à l'aide de la carte des altitudes, on déclarera le fichier anduze.alt comme fichier des classes de production dans le menu 1, et on définira 3 classes de production : < 400 m, entre 400 et 600 m, > 600m dans la fenêtre ouverte quand on clique dans le menu 1.

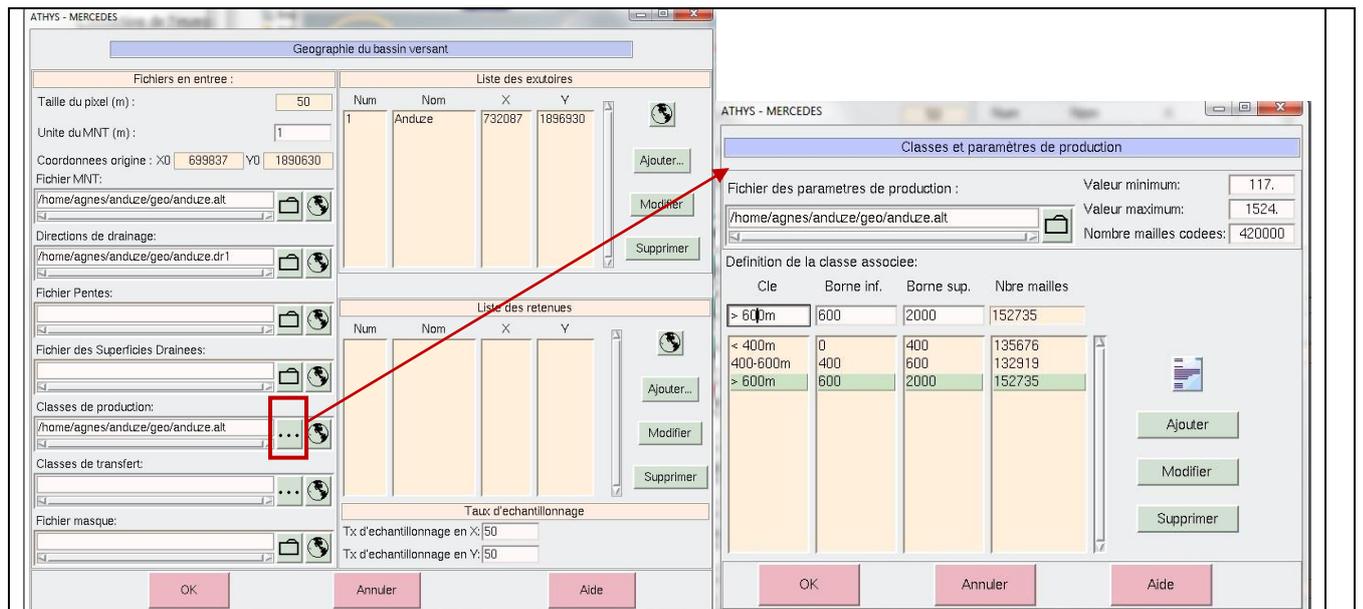


Figure 4-5

Figure 4-6

Une fois validées (OK), ces classes apparaissent dans le menu 3, dans lequel les fonctions de production doivent ensuite être définies. Par défaut, la fonction sélectionnée est Réservoir 1, et les paramètres sont fixés à 0. Il faut donc modifier la fonction (remplacer par SCS) et fixer les valeurs des paramètres pour chacune des classes (S = 100, 200, 300 mm).

Cle classe	Fonction	Param 1	Param 2	Param 3	Param 4	
< 400 m	Reservoir-1	0	0	0	0	Appliquer
400 - 600 m	Reservoir-1	0	0	0	0	
> 600 m	Reservoir-1	0	0	0	0	

Figure 4-7

La figure ci-dessous montre la comparaison des simulations réalisées avec S moyen (200 mm) ou S spatialisé (100, 20, 300 mm) pour les 12 premiers épisodes.

■ S moyen ■ S spatialisé

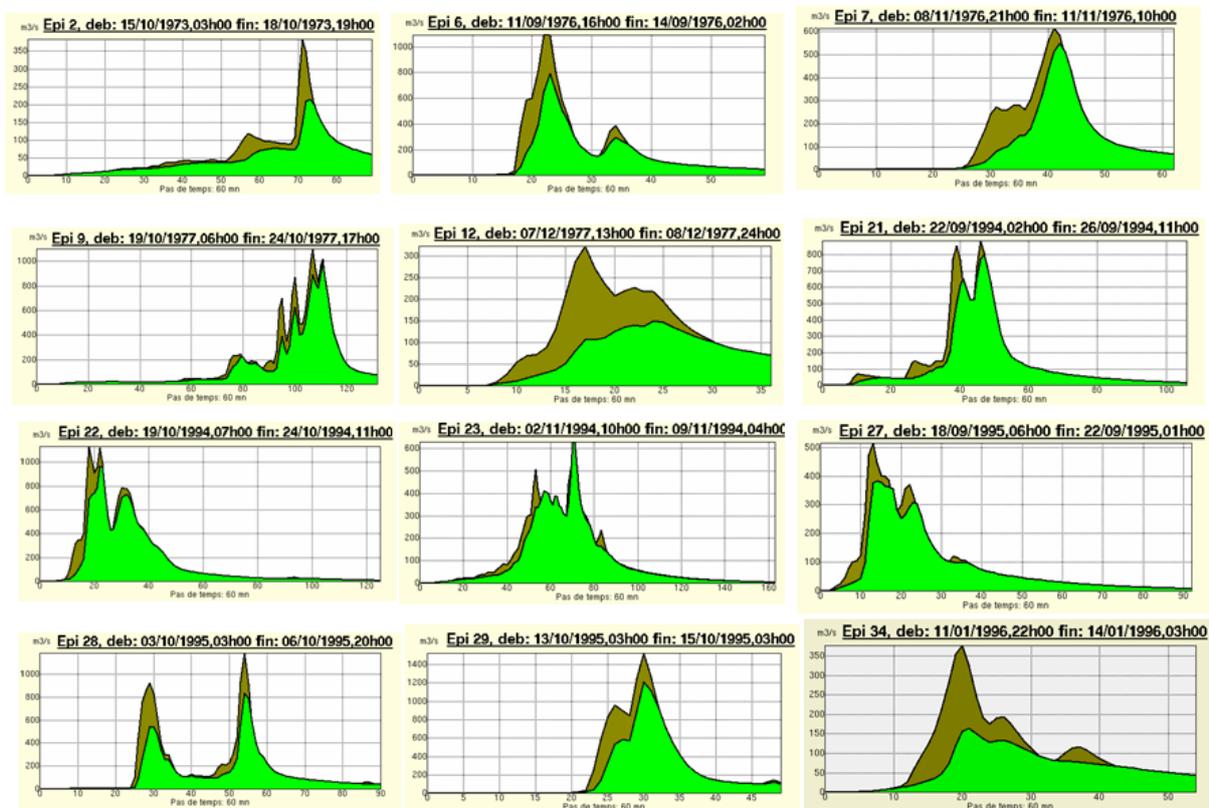


Figure 4-8

A pluies égales, une perméabilité moyenne tend à sous-estimer les volumes et les débits de pointe de crue. Le modèle distribué est donc susceptible d'assurer une meilleure précision de calcul de la crue, mais au prix d'une complexification du modèle (introduction de nouveaux paramètres).

4.3. Impact de modifications climatiques ou géographiques

Le modèle distribué permet de différencier les conditions de production (et de transfert). On peut simuler par exemple les effets de l'urbanisation ou la mise en culture d'une partie du bassin. Ou encore l'occurrence de précipitations neigeuses à partir d'une certaine altitude.

Exercice : on veut caractériser l'impact de l'urbanisation sur le bassin (en gris). On admettra que $S = 20$ mm pour la zone urbanisée. On comparera les simulations effectuées avec $S = 300$ mm sur tout le bassin, et avec une partition du bassin constituée de $S = 20$ mm pour la zone urbanisée et $S = 300$ mm pour le reste du bassin. On utilisera le fichier anduze.sol, constitué de 9 classes de perméabilité des sols, codées de 1 à 9.

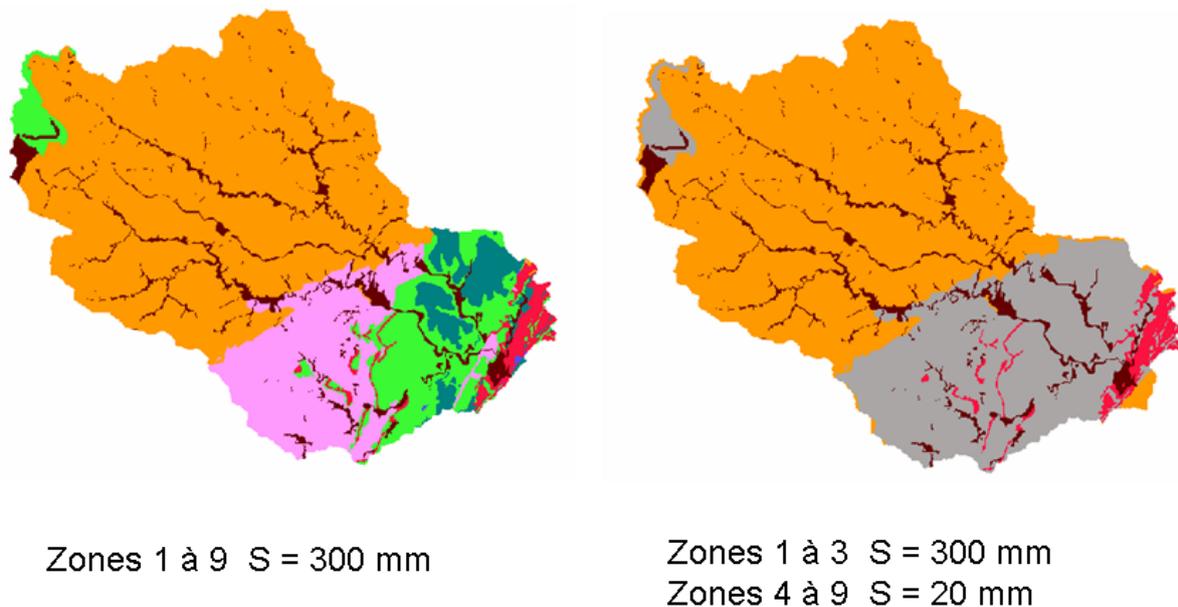


Figure 4-9

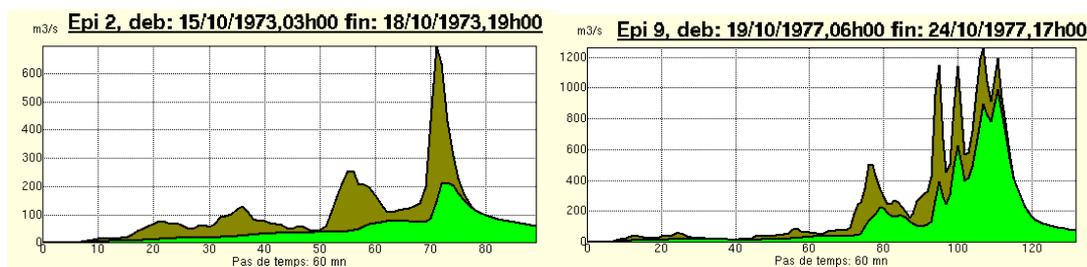


Figure 4-10

Exercice On veut traiter l'influence de la neige sur un épisode de crue. On suppose que plusieurs situations peuvent être observées, faisant intervenir un seuil d'altitude. Comparer les situations suivantes

- conditions normales sur le bassin
- précipitations neigeuse au-dessus de 600 m (traduit par $S = 100000$ mm et $ds = 0$, stockage total de la précipitation)
- précipitations liquides sur manteau neigeux ou sols gelés au-dessus de 600 m (traduit par $S=0$, ruissellement total de la précipitation)

On utilisera le fichier des altitudes anduze.alt, pour définir les différentes classes de production.

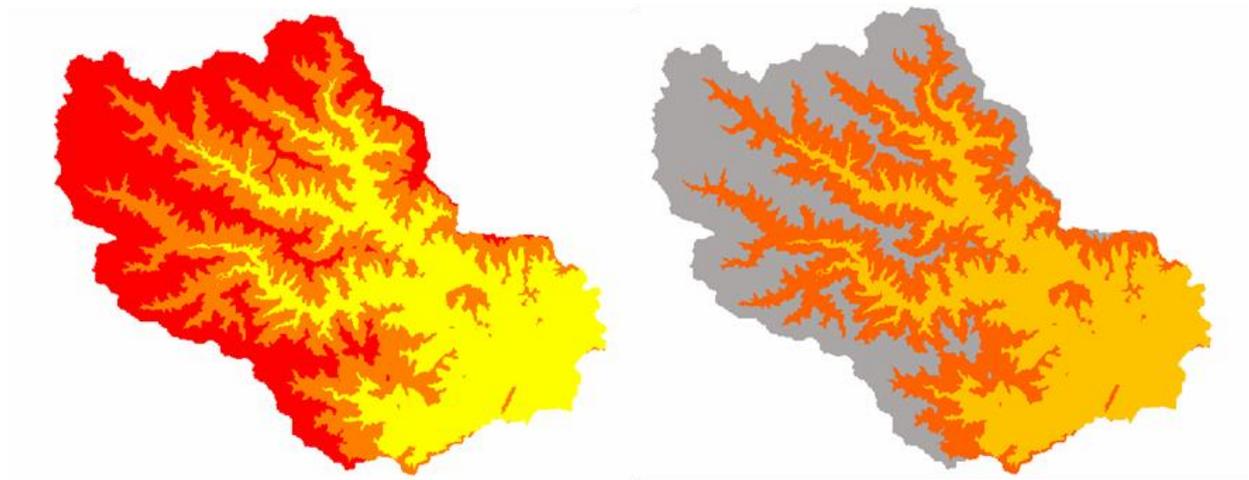


Figure 4-3

Correction de l'exercice

Il faut différencier les classes de production à l'aide des altitudes, on utilisera le fichier anduze.alt, et on définira 2 classes de production : < 600 m et > 600 m dans le menu 1.

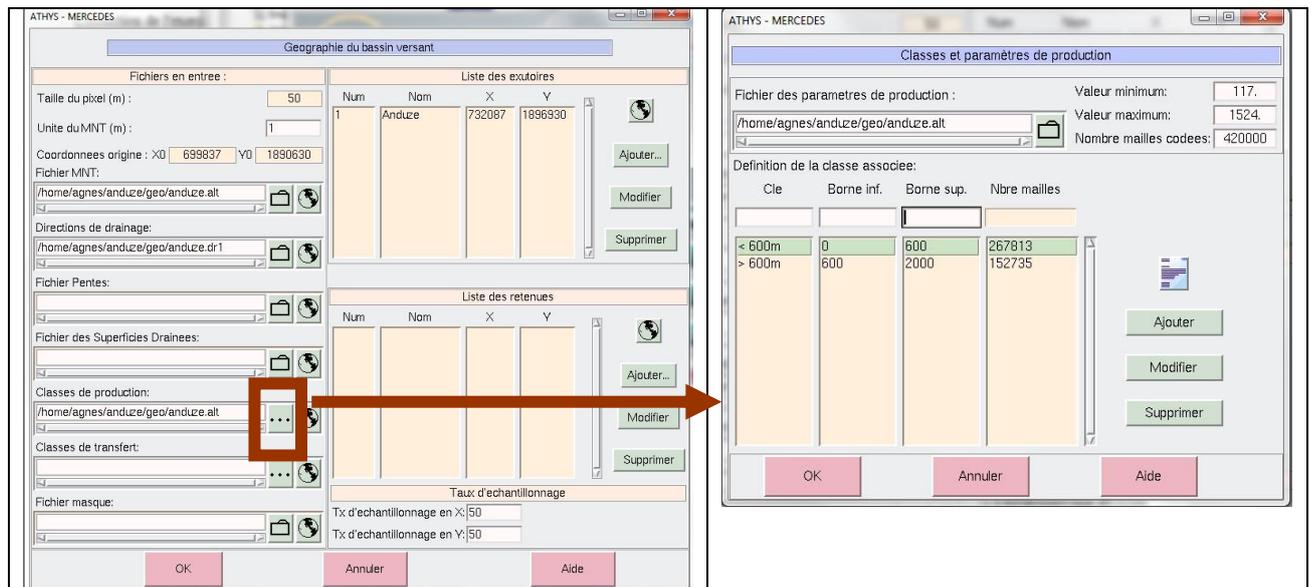


Figure 4-4

Figure 4-5

On appliquera ensuite la fonction SCS, avec un $S \gg$, traduisant un stockage quasi-total de la précipitation sous forme de neige dans le cas (b), et avec un $S = 0$, traduisant le ruissellement quasi-total sur neige pu sol gelé dans le cas (c).

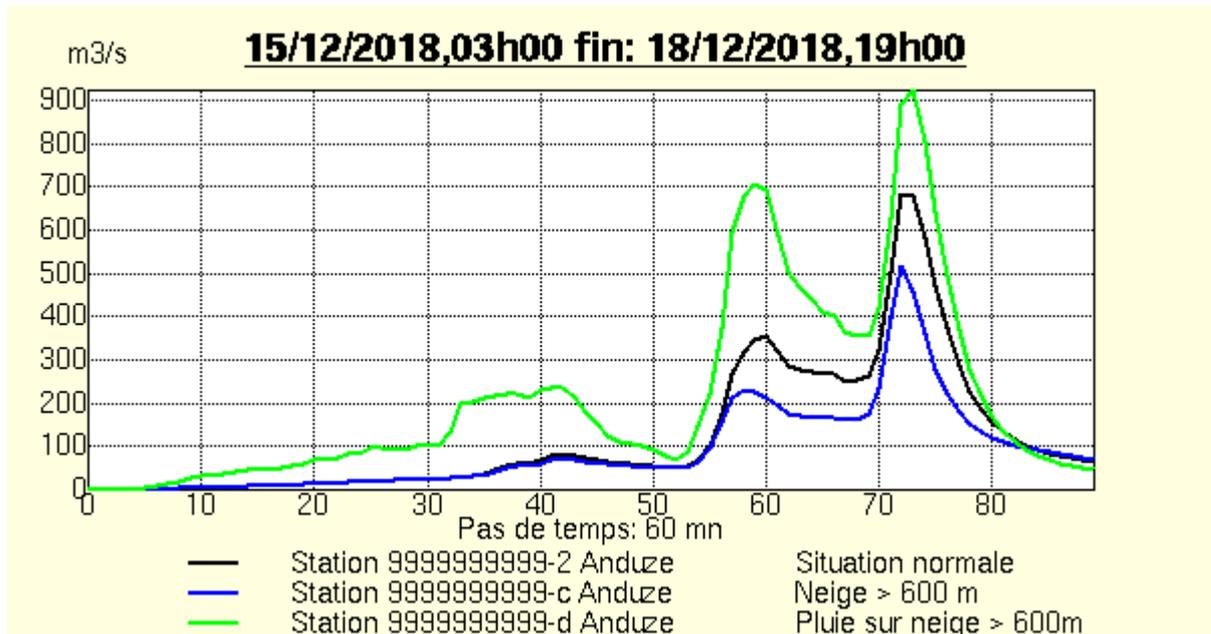


Figure 4-6

4.4. Réflexions sur l'échantillonnage des données

Questions :

- quelle est la taille optimale de la maille de discrétisation du bassin ?
- quelle est la résolution optimale de la maille pluie radar ?

4.4.1. Sensibilité à la discrétisation spatiale du bassin

La discrétisation spatiale du bassin est basée sur l'utilisation d'un Modèle Numérique de Terrain, dont la maille peut varier en fonction du produit fourni, ou de diverses opérations d'échantillonnage disponibles dans Vicair ou dans Mercedes. On étudiera ici la sensibilité des simulations de crue en fonction de l'échantillonnage pratiqué dans Mercedes, pour un MNT dont la maille est de 50 m :

Echantillonnage 1 : toutes les mailles, soit une résolution de 50m

Echantillonnage 2 : 1 maille sur 10, soit une résolution de 500m

Echantillonnage 3 : 1 maille sur 100, soit une résolution de 5000m

Echantillonnage 4 : 1 maille sur 200, soit une résolution de 10000m

L'échantillonnage pratiqué dans Mercedes consiste à sélectionner une maille sur N en X et une maille sur N en Y, puis à "dilater" la superficie de cette maille d'un facteur NxN. Le modèle opère donc sur un nombre de mailles réduit d'un facteur NxN sur le bassin.

Mode opératoire

On utilisera comme données de base :

anduze.mnt *modèle numérique de terrain*

anduze.dr1 *modèle de drainage*

base28.txt *fichiers des épisodes pluie-débit*

SCS ($S=400$, $w = 0.2$, $ds = 1$), Lag-route ($Vo = 3$, $Ko = 0.7$)

Les échantillonnages seront réglés dans le menu 1 : bassin versant. Les simulations seront faites pour plusieurs épisodes.

Les simulations seront superposées à l'aide de la fonction ajout station de Vishyr

Exemple de résultat

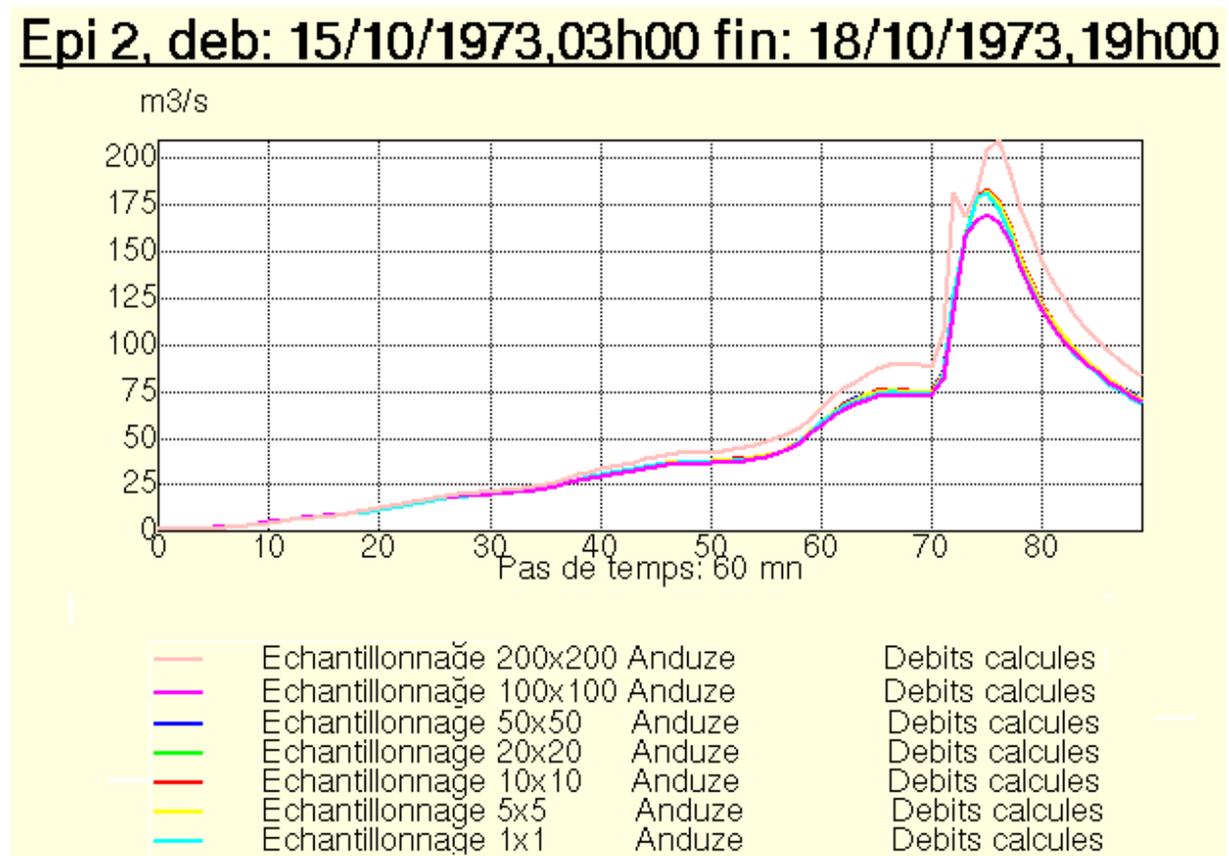


Figure 4-7

Les simulations sont quasiment équivalentes jusqu'à l'échantillonnage 50x50, avant de se dégrader. Le nombre de mailles correspondant à un échantillon 50x50 est d'environ 87 !

Obtient-on les mêmes résultats pour les autres épisodes ? pour d'autres modèles ?

4.4.2. Sensibilité à la résolution spatiale des pluies radar

Les radars météorologiques du réseau ARAMIS permettent de mesurer la pluie au pas de temps de 5 mn, et pour des pixels de 1 km². Les mesures sont basées sur la réflectivité d'une onde électromagnétique par les gouttes d'eau, fonction du diamètre des gouttes. La réflectivité R est ensuite reliée à l'intensité de la pluie Z par une relation type Marshall-Palmer $Z = aR^b$

La mesure radar de la pluie n'est donc pas une mesure directe, et elle est sujette à diverses incertitudes, liées à la fois au dispositif de mesure comme au système de précipitations. Sans

entrer dans les détails, cela signifie qu'une correction de la donnée radar en fonction de la pluie observée au sol est généralement nécessaire. Divers produits sont actuellement disponibles : images Antilope et Panthere de Meteo-France, images Calamar de Rhea...

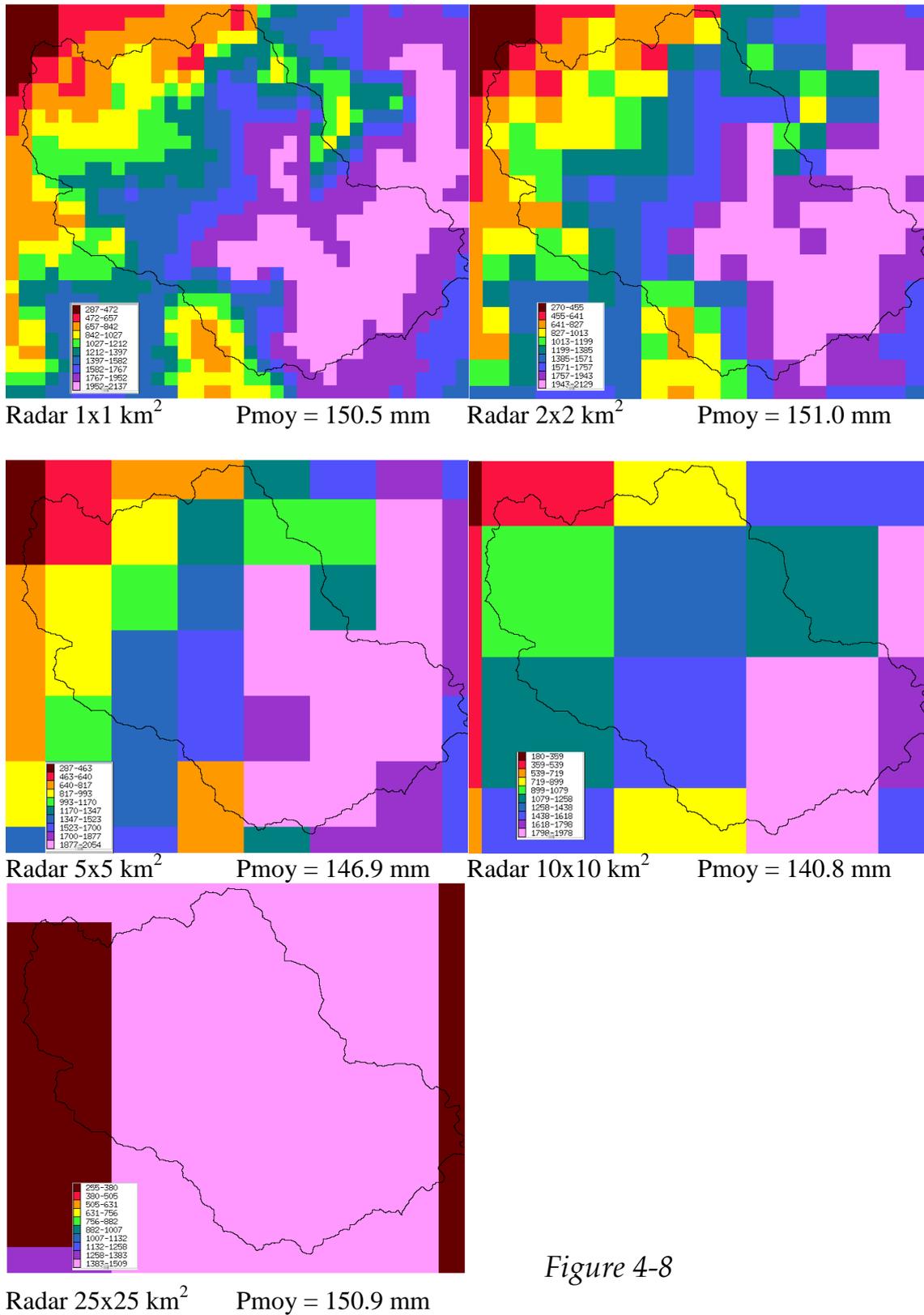


Figure 4-8

La question posée ici est de savoir quelle est la sensibilité des simulations des modèles à la résolution de la pluie radar. Est-il indispensable de conserver une résolution du km^2 ? Quelle est la perte de précision si on ne retient que 1 pixel radar sur 2, sur 3 etc... ?

On étudiera ici la sensibilité des simulations de crue en fonction de l'échantillonnage pratiqué sur les images radar, dont la résolution initiale est de 1 km^2 :

Echantillonnage 1 : 1 pixel sur 2, soit une résolution de 4 km^2

Echantillonnage 2 : 1 maille sur 3, soit une résolution de 9 km^2

Echantillonnage 3 : 1 maille sur 5, soit une résolution de 25 km^2

Echantillonnage 4 : 1 maille sur 10, soit une résolution de 100 km^2

Echantillonnage 5 : 1 maille sur 25, soit une résolution de 625 km^2

NB : L'échantillonnage pratiqué sur l'image radar consiste à calculer la valeur moyenne sur chaque bloc échantillonné, soit 4 km^2 pour un échantillonnage de 1 pixel sur 2.

Mode opératoire

On utilisera comme données de base :

anduze.mnt *modèle numérique de terrain*

anduze.dr1 *modèle de drainage*

200901021200.grd, 200901021205.grd... *fichiers radar Panthere*

SCS ($S=200$, $w = 0.2$, $ds = 1$), Lag-route ($Vo = 3$, $Ko = 0.7$)

Les fichiers des épisodes pluie-débit seront constitués à partir des données radar, en utilisant différents échantillonnages : 1, 2, 3, 5, 10, 25. Les fichiers se trouvent dans le répertoire *radar_panthere*. On utilisera la fonction de Vishyr Fichier/Import-Export/Calamar-Panthere → txt pour constituer les fichiers en entrée de Mercedes (cf paragraphe 6.4.2). Les dates de l'épisode à constituer sont fixées entre le 01/02/2009 à 12h00 et le 03/02/2010 à 14h.

Les simulations seront superposées à l'aide de la fonction ajout station de Vishyr

Résultat

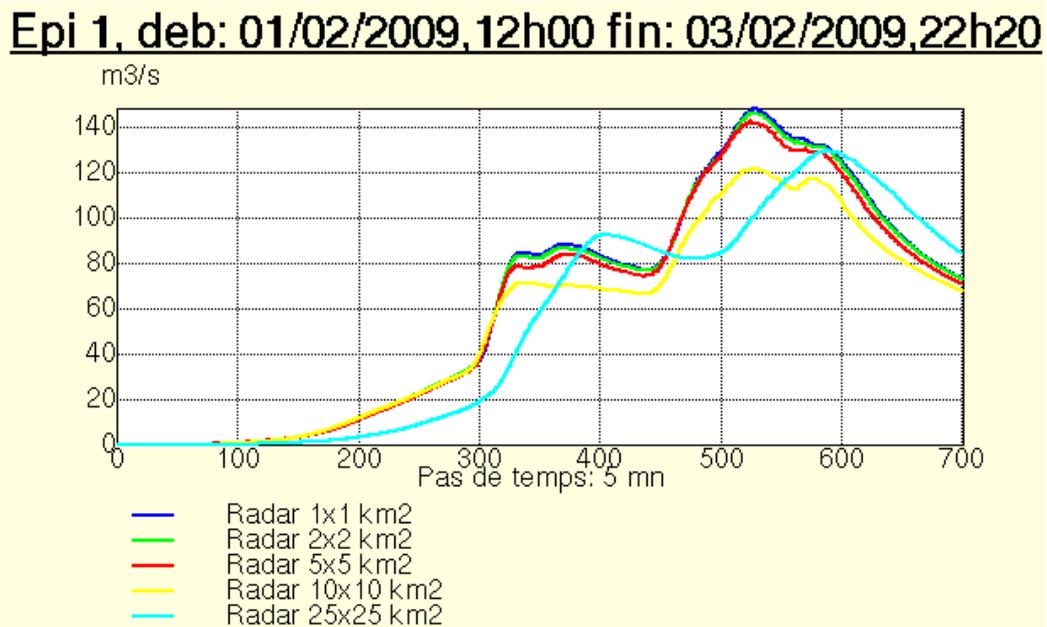


Figure 4-9

Les simulations sont pratiquement équivalentes pour des résolutions allant jusqu'à 5 km, ce qui correspond à 22 pixels radar sur le bassin. Au-delà, on note une dégradation sensible. Pour cet épisode, on en conclut que 22 points de mesure moyenne sont suffisant pour prendre en compte l'organisation spatiale des pluies.

Ces conclusions s'appliquent-elles à n'importe quel épisode radar ?

5. APPLICATION DU MODELE DE L'ONDE CINEMATIQUE (TRANSFERT)

5.1. Présentation du modèle

La fonction de transfert Onde Cinématique réalise un transfert des écoulements de l'amont vers l'aval, sur chacune des mailles du bassin. A chaque temps de calcul et sur chaque maille, on effectue un bilan des volumes stockés, tenant compte des apports amont, du stock initial au début du pas de temps, du volume écoulé vers l'aval. **Cette fonction offre ainsi plusieurs avantages par rapport à une fonction de transfert de type lag and route :**

- i) **une interprétation plus physique des vitesses d'écoulement, qui peuvent notamment varier en fonction de la charge hydraulique, être estimées d'après les profils des sections transversales....**
- ii) **la possibilité de traiter les cas les plus complexes, nécessitant une connaissance des volumes réels transitant sur chaque maille à chaque pas de temps : stockage dans des retenues ou des zones de débordement, infiltration dans le lit de la rivière au cours du transfert...**

En revanche, les temps de calcul sont plus longs, et les résultats peuvent être influencés par la résolution spatiale choisie pour la discrétisation en mailles carrées.

Les équations du modèle sont :

L'équation de continuité :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

L'équation dynamique, dans laquelle on néglige les pertes d'énergie par frottement :

$$S_0 = S_f$$

où Q désigne le débit (en m^3/s), A la surface de la section mouillée (en m^2), S_0 et S_f respectivement la pente du fond et la pente de la ligne d'énergie (en m/m), x l'abscisse (en m) et t le temps (en s).

Le débit est donné par la formule de Manning-Strickler, en assimilant la pente du fond à la pente de la ligne d'énergie :

$$Q = K \sqrt{S_0} R_h^{0.66} . A$$

où K représente le coefficient de Manning-Strickler, en $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et R_h le rayon hydraulique (rapport de la section mouillée au périmètre mouillé), en m .

Dans MERCEDES, ce schéma est appliqué selon les principes suivants :

- on considère que chaque maille est traversée sur toute sa longueur par un canal rectangulaire de largeur λ , et de profondeur h (ou P_c). La direction du canal est déterminée par la direction de drainage déduite du MNT (donc 8 directions possibles, de 45 en 45°)
- on néglige les temps de transferts de l'eau s'écoulant sur la maille vers le canal. Le temps de transfert sur la maille est donc le temps de transfert de l'écoulement en canal
- lorsque la hauteur de l'eau dans le canal dépasse la profondeur du canal, l'écoulement se fait alors dans une section lit mineur/lit majeur composée de 2 rectangles superposés

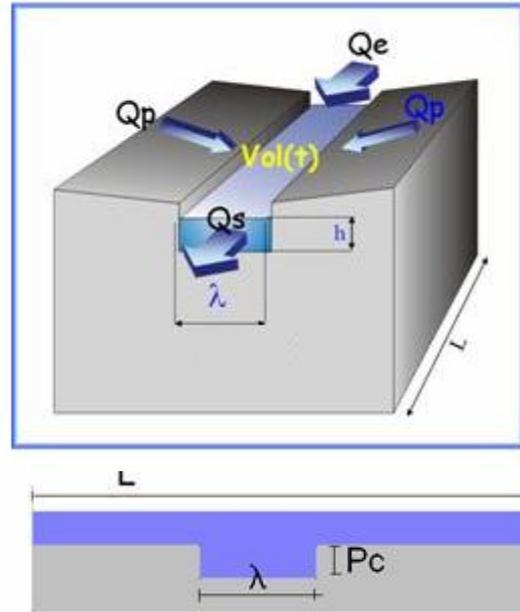


Figure 5-1

La stabilité numérique du schéma est assurée par la condition de Courant.

Paramètres du modèle

Le schéma fait intervenir 4 paramètres :

K_1 : coefficient de Strickler, en $m^{1/3}.s^{-1}$

λ ou l : largeur du canal, en m

h (ou P_c) : profondeur du canal, en m

γ : coefficient de prise en compte des apports amont pour le calcul des pertes à l'écoulement, adimensionnel

Les pentes sont calculées par le modèle à partir du MNT, et correspondent pour chaque maille à la différence d'altitude amont et aval dans la direction d'écoulement, rapportée à la longueur de la maille.

Pour calibrer le modèle, on utilisera une largeur d'écoulement $\lambda = 50$ m sur l'ensemble du bassin. La profondeur sera infinie, signifiant qu'il n'y a pas de débordement dans le lit majeur.

NB : après la version 5.6, un nouveau module de calcul des pentes a été adopté et est susceptible d'influencer la calibration du paramètre K_1

Résultats

On reprend les 28 événements de l'échantillon pour calibrer le modèle. La fonction de production est la fonction SCS. Les 2 paramètres à calibrer sont le paramètre S du SCS et le paramètre K_1 de l'Onde Cinématique.

Commentaires

On obtient de bons résultats avec $K_1 = 5$ à $10 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Cette valeur est néanmoins assez éloignée des valeurs usuellement employées pour décrire la rugosité des lits naturels ($\sim 20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$). Comment l'expliquer ?

- i) on notera que cette valeur dépend en partie des valeurs choisies pour la largeur, voire pour la forme, des sections d'écoulement. On vérifiera l'impact des largeurs d'écoulements sur les hydrogrammes, en choisissant une largeur de 10 ou 100 m.
- ii) le calcul de la pente peut également influencer sur la calibration du paramètre K_1 . Procéder à un lissage des pentes dans Vicair (Opérations sur images) et reprendre la calibration.
- iii) l'échantillonnage choisi, 50x50, est peut-être excessif. Tester avec d'autres échantillonnages, 5x5, 10x10 pour 1 ou 2 épisodes.
- iv) les conditions de transfert en versant sont probablement bien différentes de celles en réseau. En tête de bassin, le ruissellement présente une très faible charge hydraulique. Les coefficients de rugosité correspondant sont très probablement de l'ordre de 1, voire moins. On peut le vérifier en effectuant une partition des classes de transfert :
réseau ($S > 25 \text{ ha}$) $\rightarrow K_1 = 20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$
versant ($S < 25 \text{ ha}$) $\rightarrow K_1 = 1 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$

(utiliser le fichier des superficies drainées, voir fonction Traitement des MNT – Fichiers dérivés du modèle de drainage – Fichier des Superficies Drainées de VICAIR)

5.2. Application à la simulation de l'impact de retenues



Figure 5-2

La structure distribuée se prête à la prise en compte de retenues sur le bassin.

NB : Pour la simulation de retenues, il est indispensable d'utiliser des fonctions de transfert en mode mailles interactives, comme par exemple le modèle de l'Onde Cinématique. Ces fonctions sont en effet les seules qui permettent de connaître les volumes stockés en chaque maille à chaque pas de temps.

L'introduction d'une retenue comporte deux étapes :

- 1) La retenue doit être déclarée par ses coordonnées dans le menu 1 "Bassin Versant"

- 2) Les caractéristiques de fonctionnement de la retenue doivent être déclarées en cliquant sur le bouton qui apparaît à droite de la ligne correspondant à la retenue.

La première étape consiste à introduire les coordonnées des retenues en utilisant l'option *Ajouter* de la rubrique *Liste des retenues* du menu *Bassin Versant*.

On donne les coordonnées suivantes :

Retenue R X= 726212 Y=1901101
Retenue J X= 712037 Y=1910680
Retenue O X= 723287 Y=1905730
Retenue V X =708737 Y=1906330

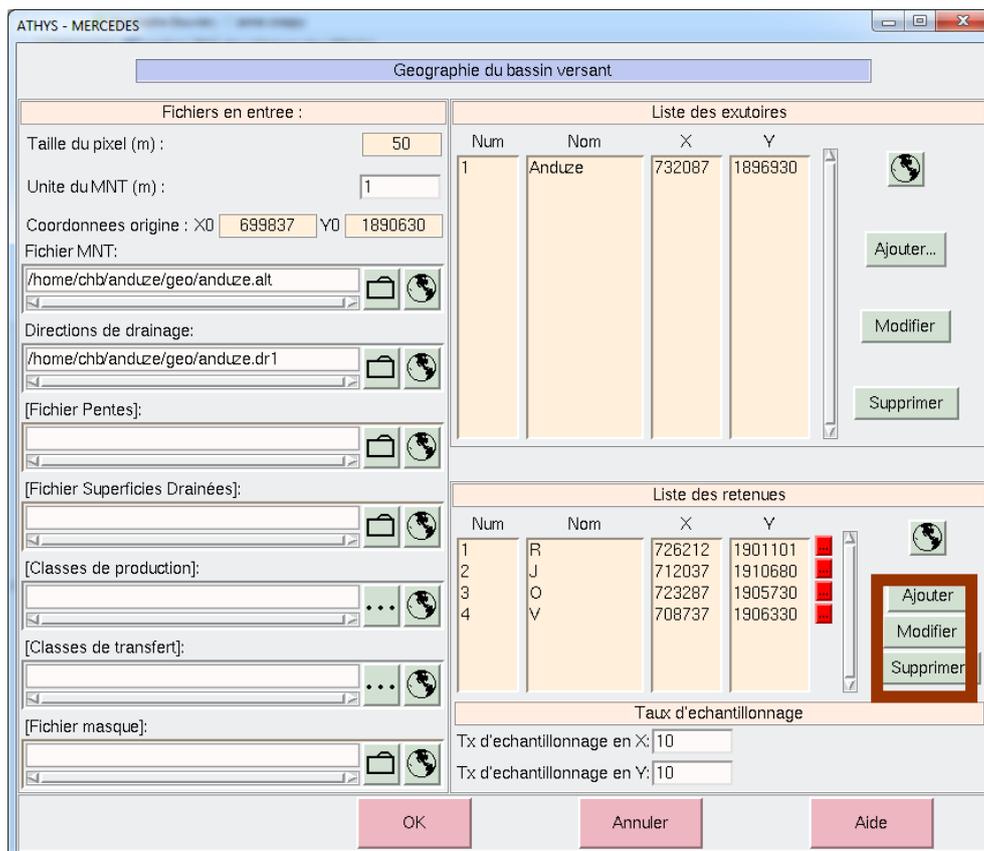


Figure 5-3

On vérifiera que ces coordonnées correspondent bien aux bassins versants contrôlés par les retenues, à l'aide de la fonction de contrôle  associée à la rubrique *Liste des retenues*

Les retenues ayant été préalablement déclarées, on documente pour chaque retenue déclarée, les caractéristiques de fonctionnement de la retenue. Ces caractéristiques sont accessibles en cliquant sur le bouton qui apparaît à droite de la ligne correspondant à la retenue.

Liste des retenues				
Num	Nom	X	Y	
1	R	726185	1901101	<input type="checkbox"/>
2	J	712037	1910680	<input type="checkbox"/>
3	O	723287	1905730	<input type="checkbox"/>
4	V	708737	1906330	<input type="checkbox"/>

Figure 5-4

Le tableau des caractéristiques apparaît ensuite. Ce tableau comporte une table de correspondance entre hauteurs, volumes stockés et débits de vidange ou de sortie, qui doit être documentée.

ATHYS - MERCEDES			
Caractéristiques de la retenue no 1			
Fichier des Caractéristiques :			
Hauteur (m)	Volume (Mm3)	Débit de vidange (m3/s)	Vol. Init. <input type="button" value="..."/>
251.63	0	0	<input type="button" value="Ajouter"/> <input type="button" value="Modifier"/> <input type="button" value="Supprimer"/>
255	0.8	0	
260	5	20	
270	10	50	
280	25	100	

Figure 5-5

Le débit de vidange peut simuler le fonctionnement d'une vanne de fond, ou des pertes par infiltration/évaporation, etc Les hauteurs ne sont pas directement utilisées dans le calcul des débits, mais permettent de mémoriser la chronique des hauteurs d'eau dans la retenue. La

dernière ligne correspond à la capacité maximale de la retenue, ici 25 Mm³. Au-delà de cette capacité, on considère que les écoulements entrants sont transférés intégralement à l'aval de la retenue.

Les variations des hauteurs d'eau dans les retenues sont stockées dans un fichier qui doit être déclaré dans le menu 6 de MERCEDES, fichiers en sortie. Les hauteurs d'eau sont exprimées en m.

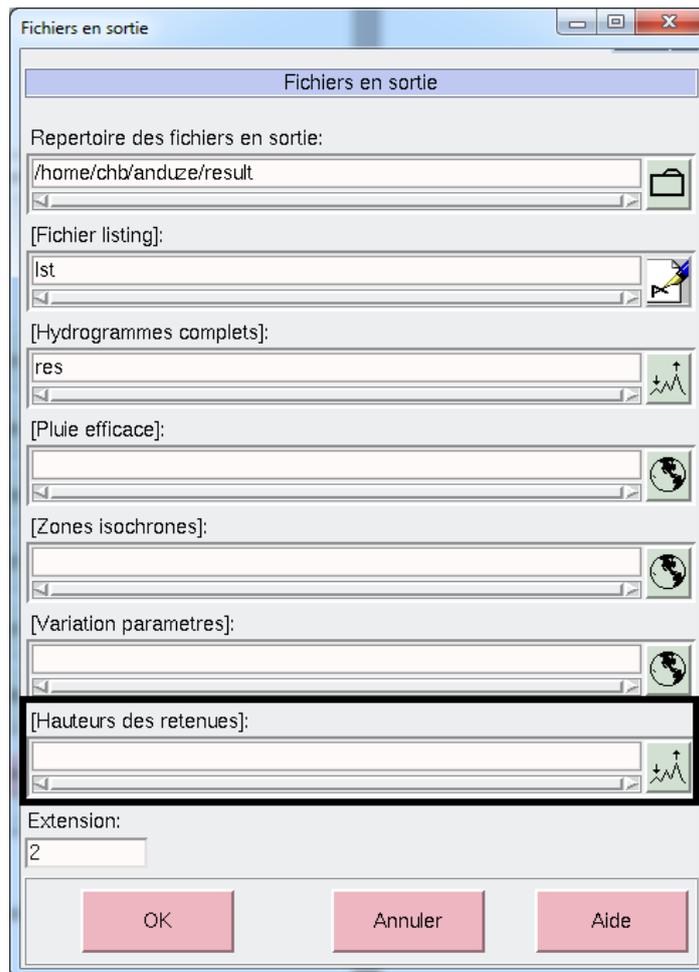


Figure 5-6

Exercice : simuler l'impact des retenues sur la crue de l'épisode n°2 du 11/09/1976, à l'exutoire du bassin et à la sortie de chaque retenue. On choisira les paramètres suivants :

Production : SCS $S=230.7$ mm, $Ia/S = 0.2$, $w=0.2$, $ds=1$ j⁻¹ pour toutes les mailles du bassin

Transfert : $K_1 = 6.99$ m^{1/3}.s⁻¹, $\lambda = 50$ m, $Pc=10000$ m pour toutes les mailles du bassin

Echantillonnage 10x10

Solution

On compare les crues simulées à Anduze, avec ou sans retenues.

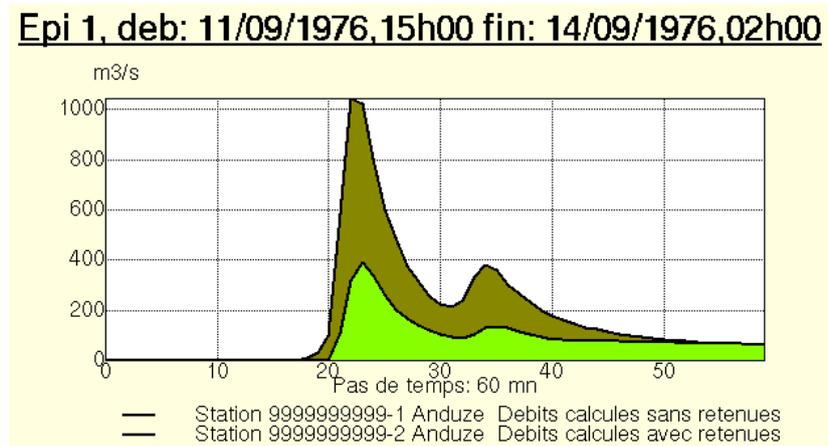


Figure 5-7 Débits à Anduze avec ou sans retenues

On représente également les niveaux atteints dans les retenues. Les retenues n'ont pas débordé, puisque le niveau est resté inférieur à la cote max, soit 280 m.

Epi 2, deb: 11/09/1976,15h00 fin: 14/09/1976,02h00

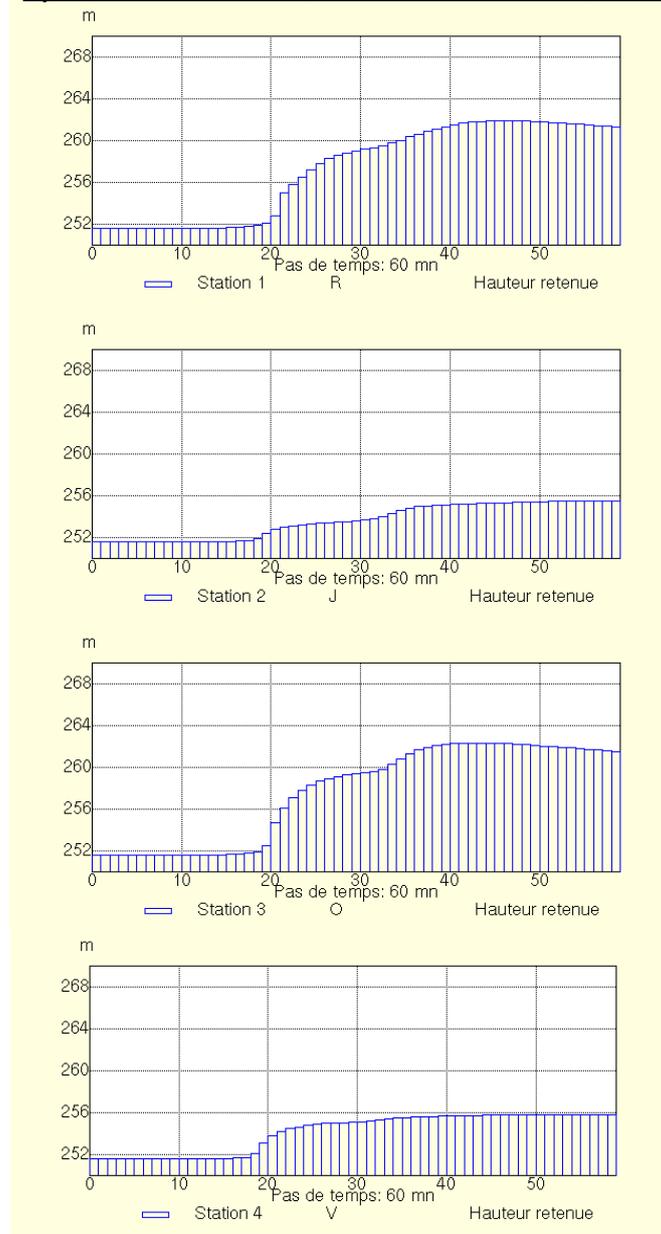


Figure 5-8

6. APPLICATION DU MODELE DE GREEN & AMPT (PRODUCTION)

Le modèle de Green & Ampt est un modèle à base physique, qui décrit les processus d'infiltration de l'eau dans le sol à l'aide d'hypothèses très simplifiées, caractérisées par un front d'humectation très marqué, une zone de transmission dont la teneur en eau est constante dans le temps et dans l'espace, et par un potentiel de pression matricielle à l'aval du front également constant dans le temps et dans l'espace. Ces approximations s'appliquent de manière assez satisfaisante dans certains cas d'infiltration dans des sols initialement secs, à texture grossière. L'expression de l'infiltration est :

$$f(t) = K_s \left(\frac{\psi \cdot \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right)$$

$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$ = capacité d'infiltration [L/T]

$F(t)$ = infiltration cumulée [L]

$\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$ = différence entre humidité à saturation et humidité initiale [ad.]

K_s = conductivité hydraulique à saturation [L/T]

Ψ = potentiel matriciel au niveau du front d'humectation [L]

L'avantage de ce modèle est lié à sa base physique, et à la possibilité théorique d'estimer les paramètres a priori, à partir de données de sols ou de mesures "in situ".

Ce schéma a été repris dans MERCEDES, et complété par un réservoir sol, dont le niveau décrit l'évolution du stock hydrique au cours des épisodes. Le réservoir est alimenté par l'eau qui s'infiltré, et il est vidangé par la reprise évaporatoire, la percolation vers la nappe profonde et l'eau exfiltrée, remise en écoulement gravitaire. La vidange est calculée à l'aide du modèle du réservoir linéaire. Un paramètre représente la profondeur de sol, permettant de limiter la capacité du réservoir sol, et de simuler du ruissellement par excès de saturation du sol.

Le modèle comporte 5 paramètres de base : θ_i , θ_s , K_s , Ψ , H_o , et 2 paramètres associés à la vidange du réservoir sol : ω et ds .

θ_i , en cm^3/cm^3 = humidité volumique initiale du sol. Les valeurs varient théoriquement entre 0 et θ_s .

θ_s , en cm^3/cm^3 = humidité volumique du sol à saturation. Les valeurs varient théoriquement de 0 à 1 (pratiquement de 0.3 à 0.7) selon les sols et selon l'humidité initiale. Par exemple, la teneur en eau volumique à saturation est de l'ordre de 0.3-0.4 pour les sols sableux, 0.4-0.5 pour les sols à texture moyenne, 0.5-0.6 pour les sols argileux.

K_s , en mm/h = conductivité hydraulique à saturation. Ces conductivités peuvent varier de façon considérable, de 10^5 à 10^{-6} mm/h. On retient généralement des valeurs de 10^3 à 10^2 mm/h pour les sols sableux, de 10^2 à 10^{-1} mm/h pour les sols argileux. On peut également utiliser des formules comme celles de Kozeny-Karman ou AllenHazen, qui relient les conductivités aux dimensions des particules du sol, même si leur efficacité semble très limitée (Musy et Soutter, 1993).

Ψ , en mm = potentiel matriciel au niveau du front d'humidification. Les valeurs de ce paramètre se situent globalement entre 100 et 1500 mm, et sont assez difficiles à déterminer précisément. On trouve dans Handbook of Hydrology (5-15, 5-37) une méthode d'estimation de ce paramètre à partir de la formulation de Brooks-Corey.

H_o , en mm = capacité maximale de stockage du sol, exprimée en équivalent eau. Cette quantité correspond théoriquement au produit de la profondeur du sol par sa porosité moyenne.

ω , ad. = fraction de la vidange qui participe au ruissellement, sous forme d'exfiltration. Ce paramètre traduit l'écoulement retardé qui provient de la vidange des profils supérieurs des sols, et doit être calé sur des décrues observées.

ds , en jour^{-1} = coefficient de la vidange exponentielle de la lame infiltrée, simulant la vidange du réservoir sol (évaporation, percolation, ruissellement hypodermique). Une valeur 1 conduit à un taux journalier de vidange de 63% ($=1-\exp(-1)$), et à un taux horaire de vidange de 4% ($=1-\exp(-1/24)$). Les valeurs de ds sont théoriquement comprises entre 0 (pas de vidange) et ∞ (vidange complète du réservoir à chaque pas de temps de calcul, même pour des pas de temps inférieurs à 24h). En pratique, ds peut être assimilé à la pente de la décrue, représentée en coordonnées logarithmiques.

L'exemple présenté ci-après utilise l'option de variabilité spatiale des paramètres maille par maille, basée sur des cartes décrivant la variabilité spatiale des paramètres du modèle : porosité θ_s (fichier anduze.qsat), conductivité hydraulique K_s (fichier anduze.Ksat), succion matricielle Ψ (anduze.psi), établis à partir de formules de pédotransfert :

Substrat	θ_s cm ³ /cm ³	K_s mm/h	Ψ mm	H_o mm
Granites	0.45	250	60	500
Schistes	0.45	150	110	500
Calcaires	0.45	50	210	500
Divers	0.45	100	150	500

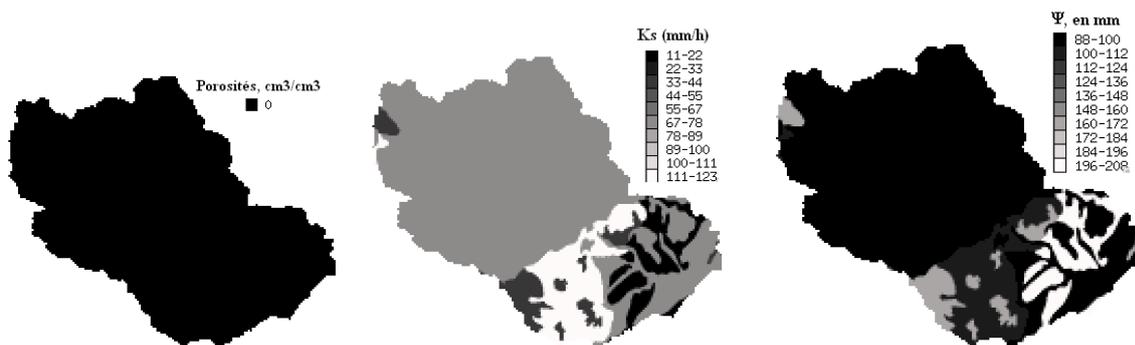


Figure 6-1

NB : les porosités sont égales à 0.45, mais les décimales ne sont pas représentées dans Vicair pour l'instant, et apparaissent égales à 0 sur la Figure 6-1.

Le fichier associé à chacun des paramètres doit être activé par l'icône  située au-dessus de ce paramètre. Cette icône ouvre une fenêtre qui permet de choisir le fichier image-carte de référence.

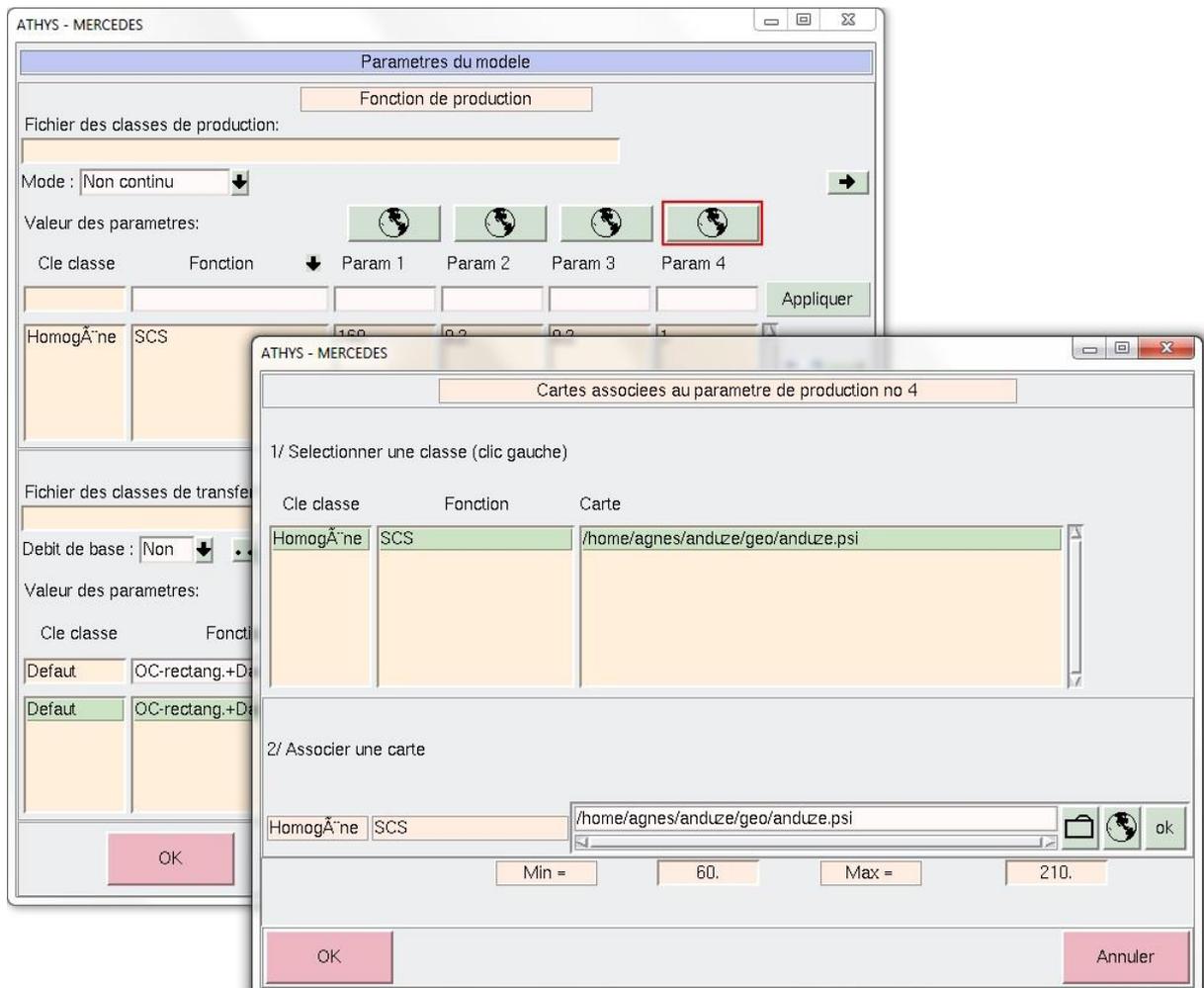


Figure 6-2

L'icône  signale qu'un paramètre est effectivement associé à un fichier, et que les valeurs du paramètre seront lues dans ce fichier.

NB : Ces valeurs seront automatiquement multipliées par la valeur figurant dans la colonne du paramètre (ici 1), cette valeur faisant office de coefficient multiplicatif. Attention donc à fixer un coefficient égal à 1, si on veut que le paramètre soit exactement identique à la valeur lue sur la carte. Ce coefficient multiplicatif peut être optimisé, comme tout autre paramètre (double-clic gauche sur la case correspondante).

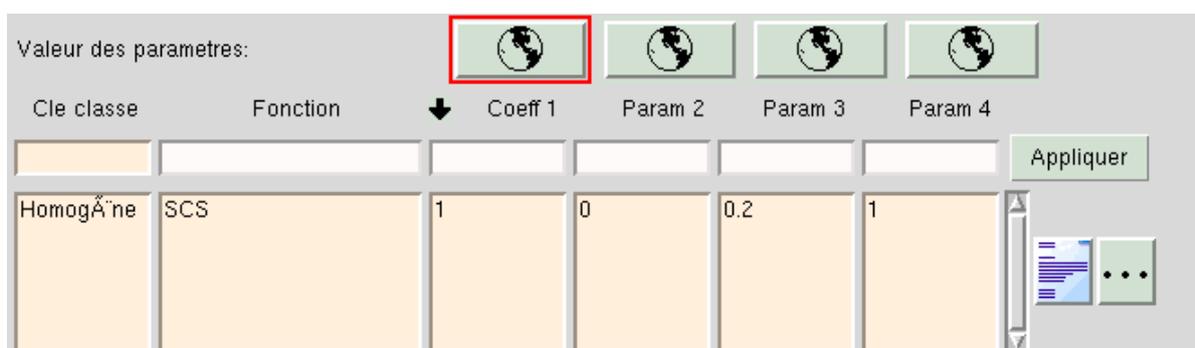


Figure 6-3

Il est possible de combiner une spatialisation d'un paramètre par classes de mailles (classes de production ou classes de transfert) et une spatialisation par lecture dans un fichier image-carte. Dans ce cas, les paramètres de chaque classe (ici, altitudes) seront lus directement dans le fichier, et multipliés par les coefficients (éventuellement différents) associés à chaque classe.

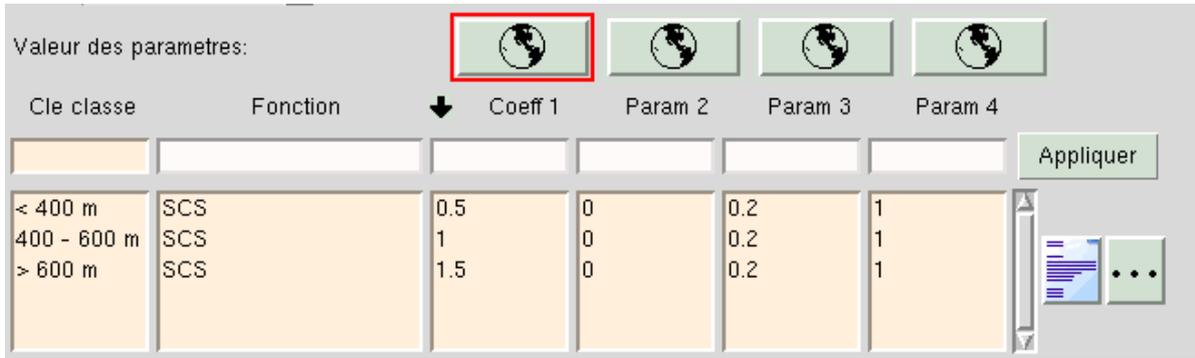


Figure 6-4

Pour désactiver, effacer le nom du fichier associé dans la fenêtre ci-dessous (issue de la figure 6-2), et valider par le bouton ok.

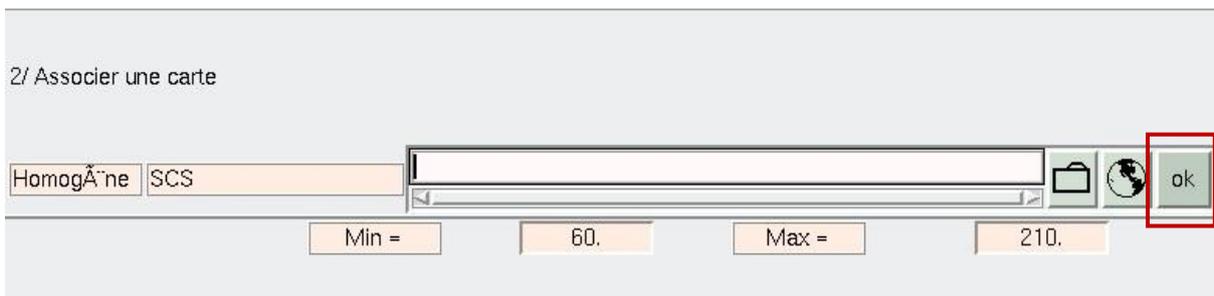


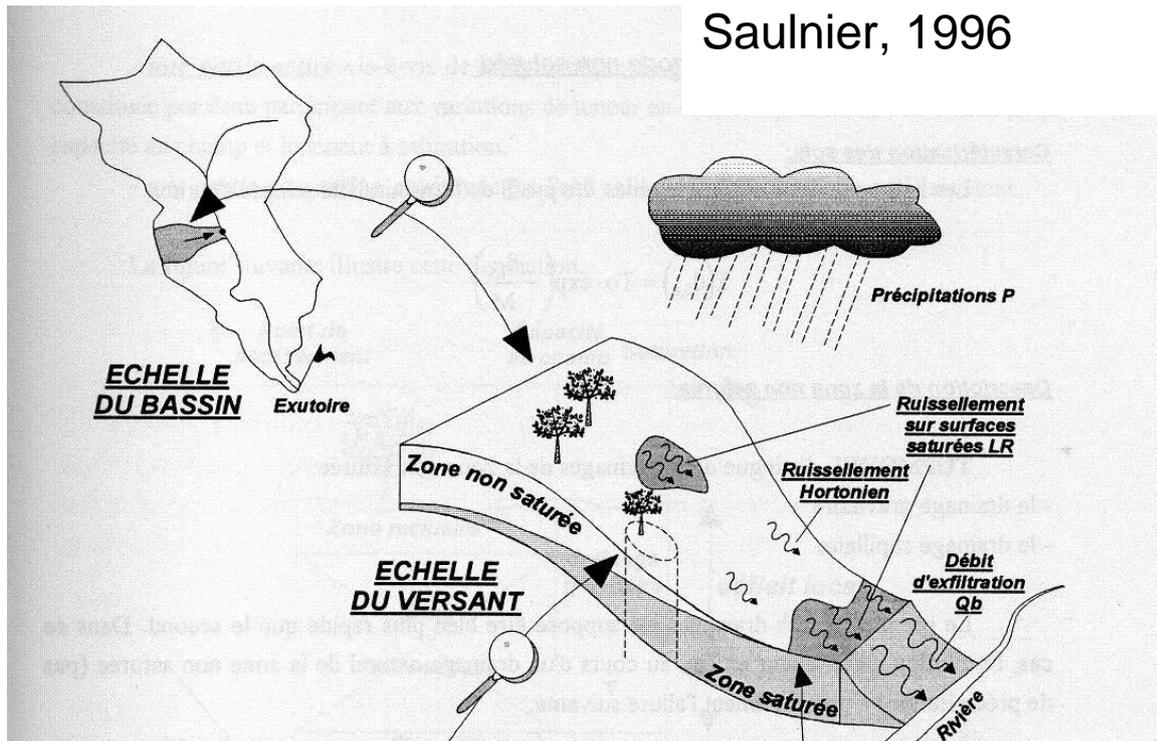
Figure 6-5

Dans le menu des paramètres, l'icône correspondante n'est plus cerclée de rouge. Le paramètre sera alors lu directement dans la colonne (attention à rétablir la valeur correcte, probablement différente du coefficient multiplicatif utilisé précédemment).

Exercice : caler le modèle sur quelques crues du fichier base28.txt. On obtient des bons résultats en modifiant le coefficient multiplicatif des conductivités hydrauliques, et en fixant ce coefficient à 0.1. Comment interpréter ce résultat ? Quelle est la sensibilité du modèle aux autres paramètres ?

7. APPLICATION DE TOPMODEL (PRODUCTION)

TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979; Franchini et al., 1996) est un ensemble de concepts correspondant à la production de ruissellement induit par le développement de nappes de versant et la saturation du profil vertical du sol (Fig.8-1). Dans TOPMODEL, le ruissellement produit par une maille i au temps t dépend principalement du déficit à saturation $\delta_i(t)$, exprimant l'équivalent en eau nécessaire à la saturation du profil vertical du sol à l'instant t . : Ce type de fonctionnement est relativement répandu en zone tempérée, mais correspond également à certains cas de bassins méditerranéens ou tropicaux.



$$\delta_i(t)$$

Figure 7-1 : Représentation du déficit à saturation sur un versant (d'après Saulnier, 1996). Le développement des zones saturées est lié à l'infiltration locale et à l'existence de flux de sub-surface.

Topmodel repose sur 3 hypothèses principales :

- ❖ le profil vertical des conductivités hydrauliques à saturation des sols est donné par : $K(z) = K_0 \cdot \exp(-f \cdot z)$ où K_0 désigne la conductivité hydraulique à saturation en surface
- ❖ le toit de la nappe est parallèle à la surface
- ❖ le régime d'écoulement de sub-surface est permanent

Dans ces conditions, on montre que le déficit de saturation de chaque maille du bassin s'écrit :

$$\delta_i(t) = \bar{\delta}(t) - \frac{\tau_i - \bar{\tau}}{f}$$

où $\delta_i(t)$ désigne le déficit en eau sur la maille i , $\bar{\delta}(t)$ le déficit moyen en eau sur l'ensemble du bassin, et f un paramètre du modèle. L'indice topographique τ_i est défini comme étant, dans le cas d'un profil vertical exponentiel des conductivités hydrauliques :

$$\tau_i = Ln\left(\frac{a_i}{tg\beta}\right)$$

où a_i est la superficie drainée en amont de la maille, par unité de contour; et $tg\beta_i$ la tangente de la pente de la maille.

La maille est saturée si $\delta_i(t) < 0$, dans ce cas, le coefficient de ruissellement de la maille est égal à 1. Dans le cas contraire, $\delta_i(t) > 0$, le coefficient de ruissellement de la maille est égal à 0.

L'un des avantages de TopModel est de pouvoir être initialisé "physiquement". Le déficit moyen du bassin est initialisé en fonction du débit de base observé en début d'épisode $Q_b(t_0)$:

$$\bar{\delta}(t_0) = -\frac{1}{f} \times Ln\left(\frac{Q_b(t_0)}{A \times T_0 \times \exp(-\bar{\tau})}\right)$$

A superficie du bassin, $T_0 = K_0/f$

Paramètres du modèle

Dans la version avec laquelle nous travaillerons ici, nous ne considérerons que 2 paramètres :

K_0 ($m \cdot h^{-1}$) : conductivité hydraulique à saturation en surface. Les valeurs utilisées dans TopModel sont généralement de l'ordre de plusieurs (dizaines de) m/h.

f (m^{-1}) : coefficient de décroissance exponentielle des conductivités hydrauliques à saturation en fonction de la profondeur.

Ces 2 paramètres sont généralement fortement dépendants. Pour le Gardon d'Anduze, on fixera $K_0 = 3 m \cdot h^{-1}$ et on procédera à la calibration du paramètre f .

Résultats

On reprend les 28 événements de l'échantillon. La fonction de transfert est la fonction lag and route, avec $K_0 = 0.7$.

N°	Date	f(m ⁻¹)	Vo(m/s)	Qmax (m3/s)	Qb (m3/s)
2	15/10/1973	15.5	1.95	468.2	1.8
6	11/09/1976	9.2	2.06	1047.6	15.6
7	08/11/1976	10.2	2.18	986.7	18.6
9	19/10/1977	14.4	3.15	1159.6	0.4
12	07/12/1977	9.4	1.93	516.9	27
21	22/09/1994	7.8	2.1	663.5	9.7
22	19/10/1994	7.8	1.84	843.7	16.3
23	02/11/1994	6.6	2.06	666	34
27	18/09/1995	6.3	2.52	909	41
28	03/10/1995	7.7	1.62	1572	38
29	13/10/1995	9.6	1.76	1383	27
34	11/01/1996	3.3	1.27	553.5	155
37	20/01/1996	3.8	1.18	632	91
54	03/11/1997	12.1	1.97	805.5	4.5
56	16/12/1997	9.3	6.99	1139.4	10.6
58	15/04/1998	24	1.45	466.1	3.9
59	29/04/1998	14.9	1.17	480.8	19.2
65	17/05/1999	12.1	1.71	606.5	13.5
66	19/10/1999	5.5	2	622.6	37
70	28/09/2000	14.8	2.92	1186.6	3.4
79	09/10/2002	6.8	0.84	445	35
80	23/11/2002	6.9	1.67	605.4	103
81	09/12/2002	9.9	1.05	605	45
86	30/09/2003	9.1	1.43	510.7	9.3
87	15/11/2003	12.4	1.45	668.8	21.2
88	21/11/2003	10.3	1.75	1028.8	40
89	29/11/2003	8.2	1.82	1112.6	46
Moy		9.92	1.99		
σ		4.28	1.13		
CV		0.43	0.56		

Tableau 7-1

8. PREPARATION DES DONNEES

8.1. Préparation des données géographiques

Cette étape comprend la constitution de 2 fichiers indispensables :

- le fichier MNT (Modèle numérique de terrain)
- le fichier des directions de drainage

et de différents fichiers optionnels destinés à la classification des unités de production et de transfert, ou à masquer une partie de la zone d'étude :

- le fichier des classes de production
- le fichier des classes de transfert
- le fichier masque

Pour le fichier MNT (comme pour tous les fichiers géographiques utilisés par ATHYS), différents formats sont actuellement reconnus : Grass Ascii et Grass binaire (export SIG Grass), AsciiGrid (export Arcview ou Mapinfo), Surfer Ascii. Il existe dans Vicair un utilitaire permettant de passer d'un format raster à un autre.

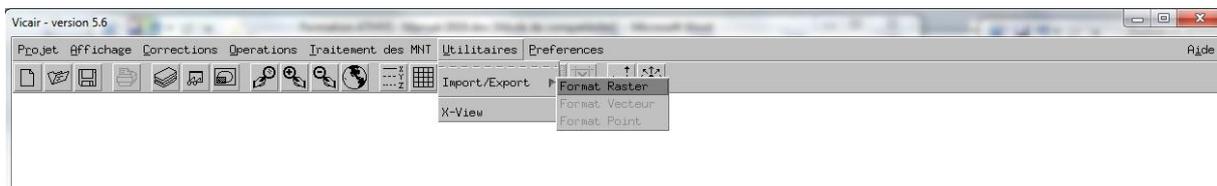


Figure 8-1

Le fichier des directions de drainage est formé à partir du fichier MNT, à l'aide de la fonction *Traitement MNT / Fichiers dérivés du MNT*.

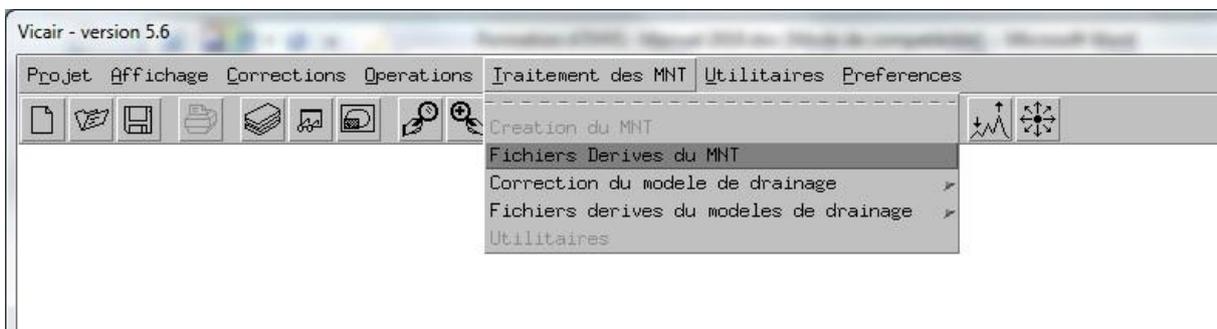


Figure 8-2

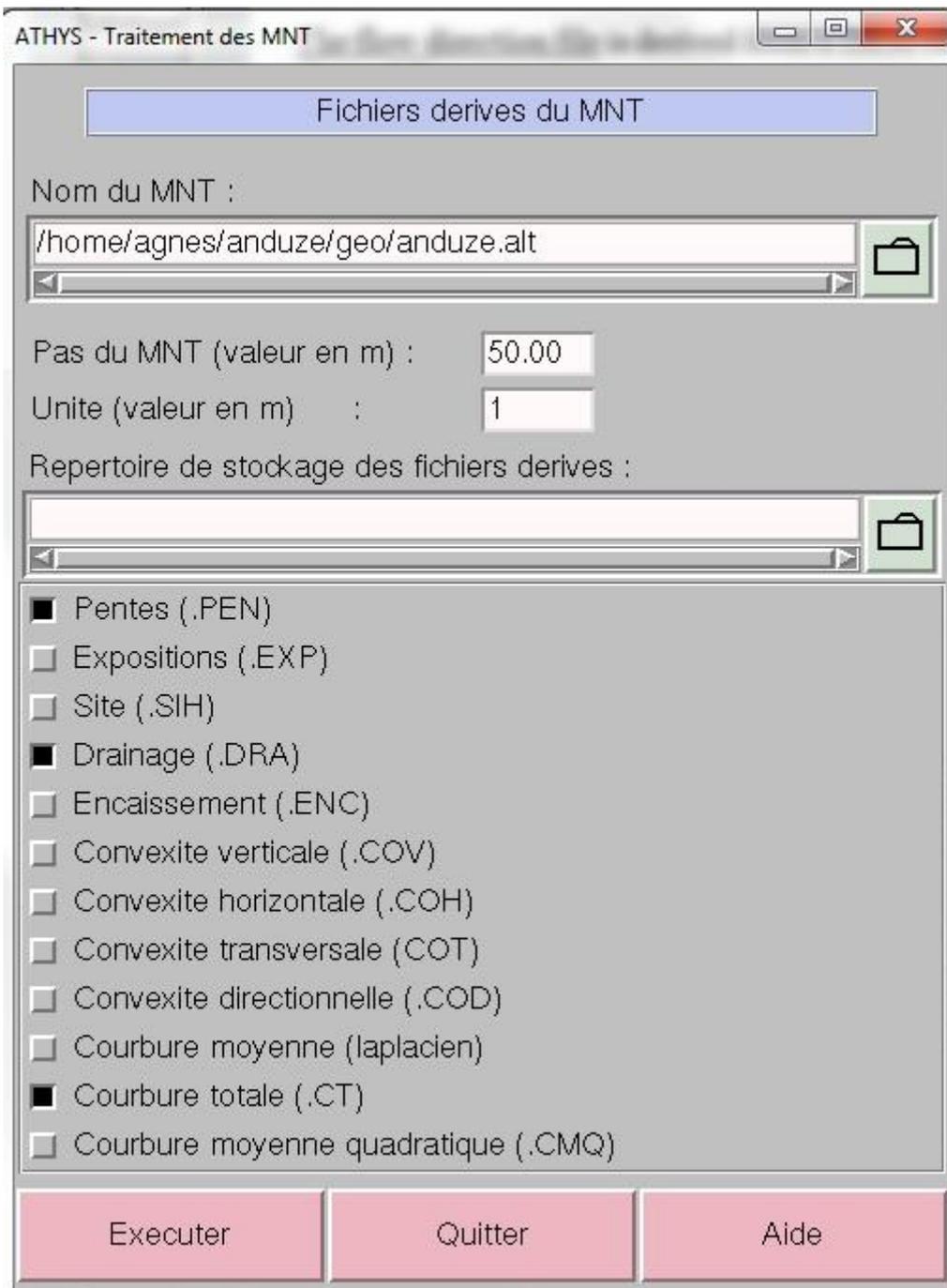


Figure 8-3

Le fichier drainage doit ensuite faire l'objet de différents contrôles, notamment élimination des dépressions parasites. Cette opération est automatique, et réalisée par la commande fonction *Traitement MNT / Correction du modèle de drainage/ Détection Correction des dépressions*

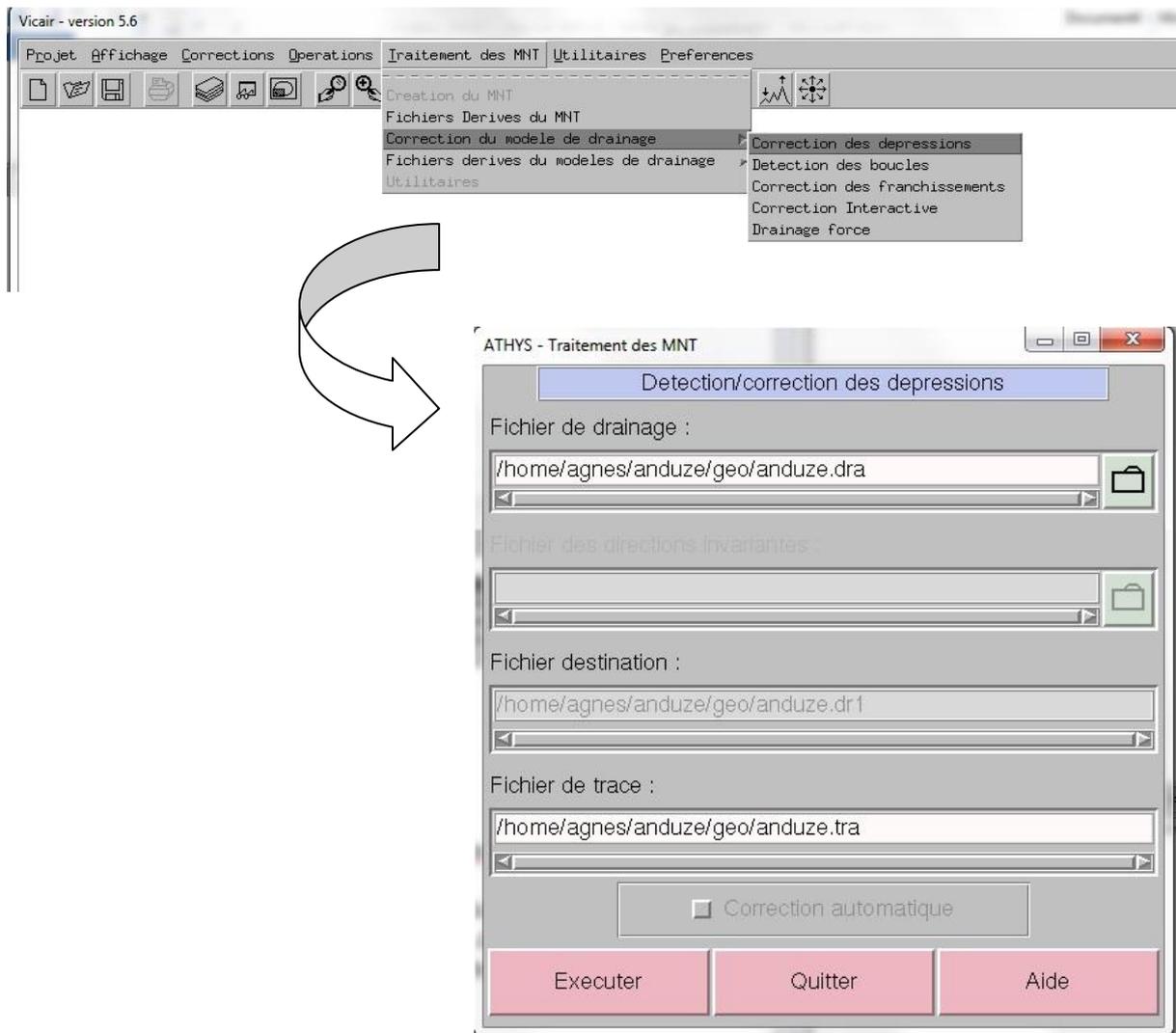


Figure 8-4

Le premier champ correspond au fichier de drainage à corriger, ici anduze.dra. Les autres champs sont automatiquement complétés :

Le fichier destination est un fichier de drainage pour lequel les dépressions ont été (en partie ou totalement) corrigées. Ce fichier a systématiquement une extension .dr1.

Le fichier de trace est une image où est indiquée la localisation de toutes les dépressions du modèle de drainage à traiter.

A l'issue de ce traitement apparaît :

```

CORRECTION AUTOMATIQUE DU MODELE DE DRAINAGE
FICHIER      : /home/christophe/gard2007/anduze.dra
              700 profils, 600 points

TRAITEMENTS : 1872 depressions initiales
              0 depressions creees par la methode de suppression des boucles
              1080 corrections de depressions locales

il reste 792 depressions

              METHODE DES ENSELLEMENTS
              74 corrections locales

il reste 718 depressions
marquage des zones exoreiques
Traitement en cours .....

il reste 3 depressions

Sauvegarde du resultat dans /home/christophe/gard2007/anduze.dr1
resultat du test =0
Fin du traitement

```

Figure 8-5

A l'issue du traitement, il reste 3 dépressions. Il faut donc refaire le traitement, appliqué au fichier .dr1 (on refera ce traitement autant de fois que nécessaire pour éliminer totalement les dépressions).

Après que le fichier de drainage ait été corrigé, deux fichiers importants peuvent être constitués pour contrôler la qualité du modèle de drainage :

- le fichier des superficies drainées, qui figure le réseau hydrographique
- le fichier des bassins, qui détermine à partir les bassins à partir de leur exutoire

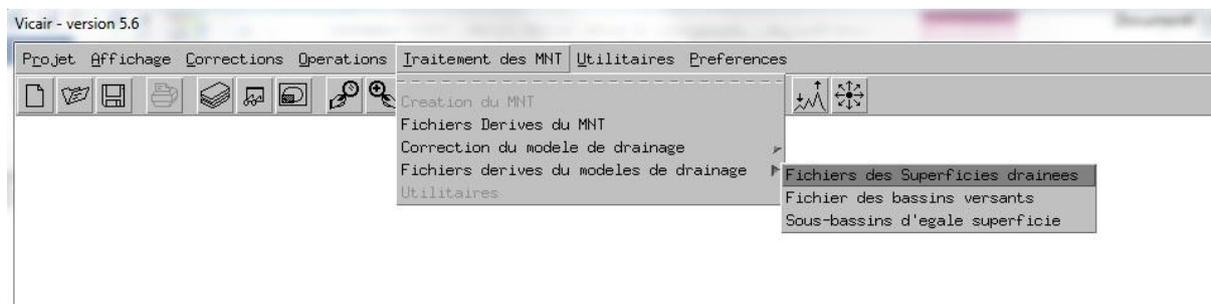


Figure 8-6

Le fichier des superficies drainées indique pour chaque maille la superficie du bassin drainée par cette maille (en nombre de mailles). Ce fichier permet de représenter le réseau hydrographique, par exemple si on ne visualise que les mailles qui drainent plus de 100 mailles

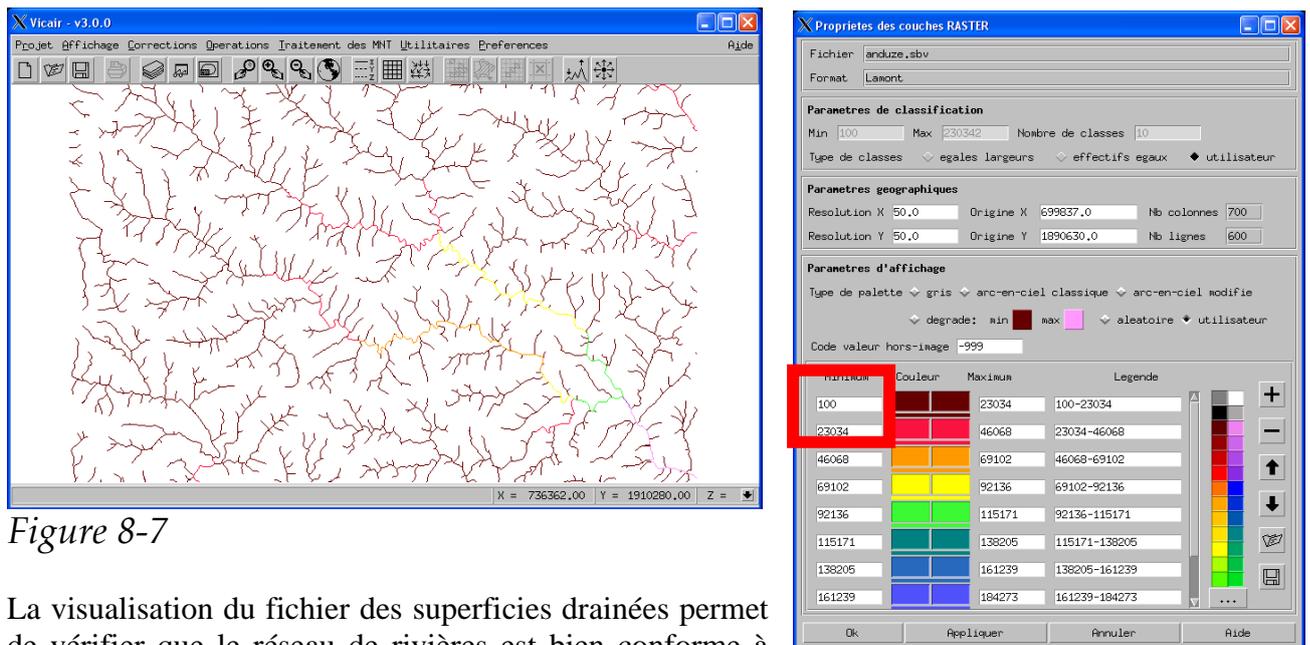


Figure 8-7

La visualisation du fichier des superficies drainées permet de vérifier que le réseau de rivières est bien conforme à celui établi d'après les cartes topographiques disponibles.

La visualisation du fichier des bassins versant permet de comparer le contour du bassin issu du modèle de drainage à celui établi d'après les cartes topographiques disponibles. En cas de différence sensible, les directions de drainage doivent être modifiées, à l'aide de la fonction *Traitement MNT / Correction du modèle de drainage/ Correction interactive* (on pourra utiliser comme fond de carte le fichier des superficies drainées ou le fichier des bassins versant).

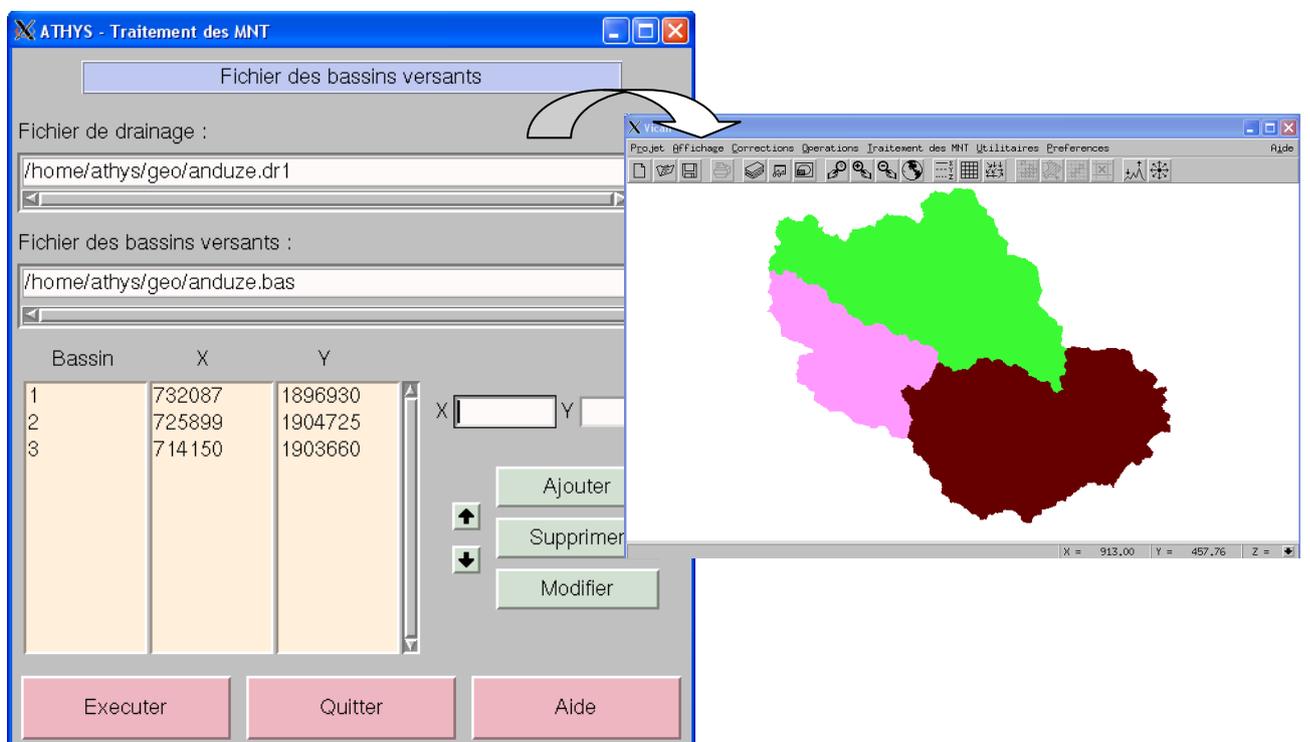


Figure 8-8

Les fichiers optionnels peuvent être constitués de différentes façons :

- importation de fichiers à des formats Grass Ascii et Grass binaire (export SIG Grass), AsciiGrid (export Arcview ou Mapinfo), Surfer Ascii
- traitement des MNT : les fichiers dérivés du MNT (pentes, expositions, altitudes...) peuvent en effet être utilisées pour différencier des classes de production ou de transfert, ou pour masquer une partie de la zone d'étude;
- combinaison numérique de fichiers : on combinera 2 caractères numériques pour en former un 3^e, par exemple, le produit de l'épaisseur du sol par la porosité pour déterminer la capacité de stockage hydrique des sols;
- combinaison logique de fichiers : on combinera deux caractères qualitatifs pour en former un 3^e; par exemple, une sous-classification obtenue à partir d'une classification des pentes et une classification des sols : sols épais pentus, sols peu épais pentus, sols peu épais peu pentus etc....

Exercice

On veut simuler les débits aux exutoires de différents bassins. Les coordonnées fournies :

Mialet X = 725899 Y = 1904725 S ~ 230 km²

Saumane X = 714150 Y = 1903660 S ~ 100 km²

ne sont pas très précises, et ne permettent pas de déterminer les bassins correspondants, car les mailles définies par ces coordonnées se trouvent légèrement à côté des rivières reconstituées par le modèle de drainage.

- déclarer les coordonnées des exutoires de Mialet et Saumane dans la liste des points de calcul (menu 1 de Mercedes) et vérifier que les bassins versants ne sont pas correctement reconstitués
- former le fichier des superficies drainées, qui figure le réseau reconstitué par le modèle de drainage, et utiliser ce fichier pour déterminer les coordonnées correctes des exutoires (on géoréférencera au préalable le fichier .sbv)
- lancer les simulations et comparer les débits obtenus à Anduze, Mialet et Saumane

Indication

Les coordonnées correctes des stations sont par exemple

Mialet X = 725959 Y = 1904652

Saumane X = 714074 Y = 1903636

8.2. Préparation des données hydro-pluviométriques

Ces fichiers peuvent être constitués directement dans Excel, puis exportés au format txt (espace tabulation). Une fois formés, ces fichiers peuvent être visualisés et modifiés dans le module Vishyr, et traités dans Mercedes.

Cas des fichiers de pluie radar Calamar®/Panthere/Antilope

La passerelle est accessible dans le module Vishyr, par la commande :
Fichier/ Import-Export/ Calamar-Panther → txt

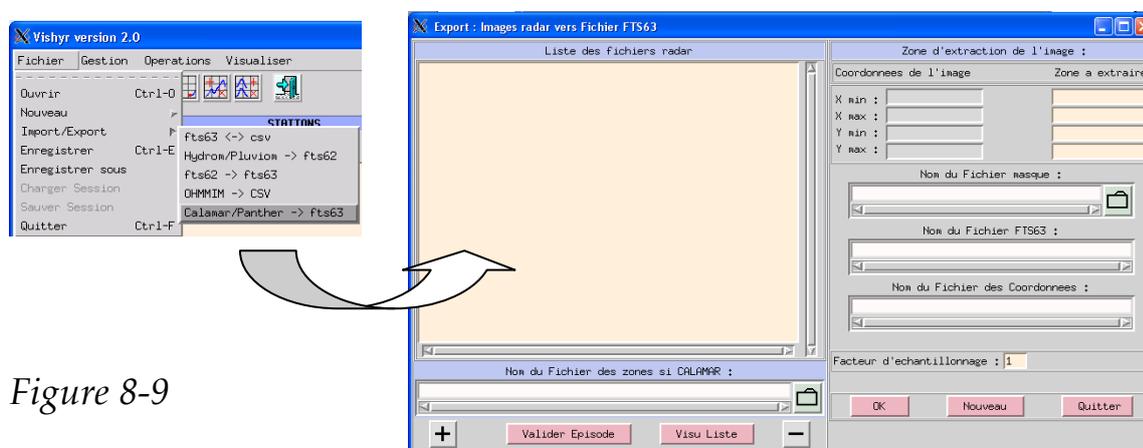


Figure 8-9

Le radar mesure la pluie au pas de temps de 5 mn, pour un pixel de 1 km². Actuellement, les fichiers radar sont convertis en fichier txt (1 pluviographe fictif par pixel).

Principes :

- les noms des fichiers radar doivent être de type AAAAMMJJHHmn.grd pour les formats Panthere/Antilope; xxZZ-aaaMMjjhhmm.dat ou autre extension (où ZZ, par exemple 05, indique le no de zone calamar, et xx représentent 2 caractères quelconques) pour les fichiers Calamar®
- les fichiers radar doivent être regroupés par épisodes : icône **+**. Un épisode correspond à une liste de fichiers radar, sélectionnés à partir du browser. Les touches de sélections multiples sont shift et ctrl. Le début de l'épisode correspond à la première date figurant dans les fichiers de la liste; la fin de l'épisode à la dernière date. Les fichiers doivent couvrir tous la même zone. En cas de fichier manquant dans la liste, les pluies seront codées en lacune sur les pas de temps correspondants.

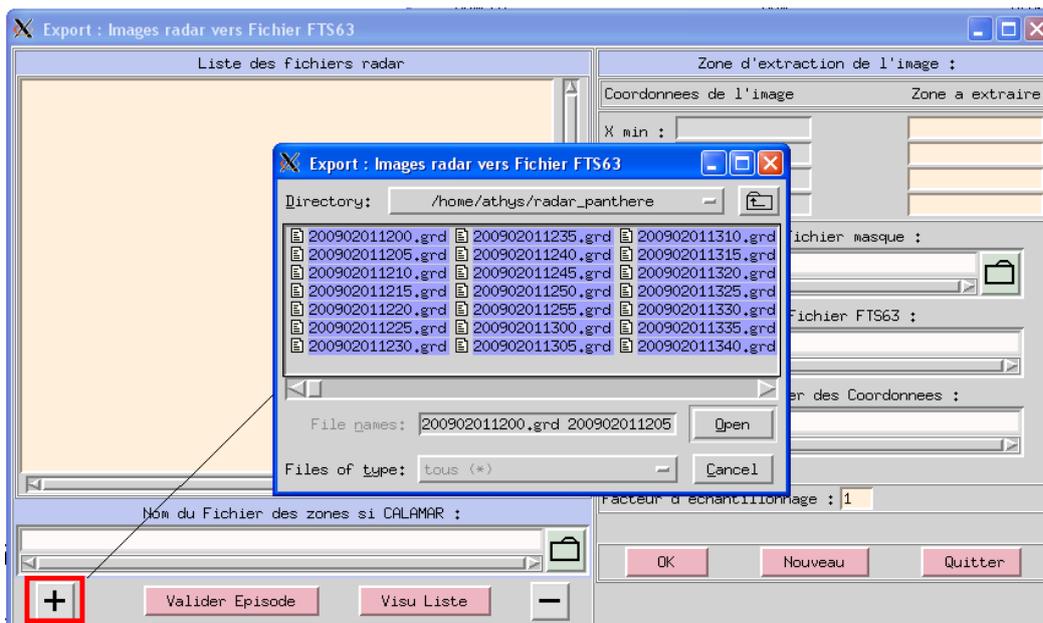


Figure 8-10

- dans le cas des fichiers Calamar®, non géoréférencés, le processus est identique, mais il faut préalablement déclarer le nom du fichier des zones Calamar®, définissant les coordonnées de chaque zone. Ces coordonnées doivent correspondre à la projection géographique qui sera ultérieurement utilisée (une conversion des coordonnées est éventuellement nécessaire)



Exemple fichier zone Calamar©

```
<?xml version="1.0" ?>
<defzones>
  <zone num="01" xlambert="738.7" ylambert="3185.1" nbcol="50" nblig="50" pas="1"/>
  <zone num="02" xlambert="705.7" ylambert="3195.1" nbcol="50" nblig="50" pas="1"/>
  <zone num="03" xlambert="697.7" ylambert="3241.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
  <zone num="04" xlambert="742.7" ylambert="3232.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
  <zone num="05" xlambert="768.7" ylambert="3268.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
  <zone num="06" xlambert="797.7" ylambert="3257.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
  <zone num="07" xlambert="806.7" ylambert="3214.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
  <zone num="08" xlambert="713.7" ylambert="3283.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
  <zone num="09" xlambert="744.9" ylambert="3326.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
</defzones>
```

- une fois la liste constituée, l'épisode doit être validé. On passe à la constitution de l'épisode suivant. Les coordonnées de la zone couverte par le radar s'affichent lors de la validation du premier épisode.

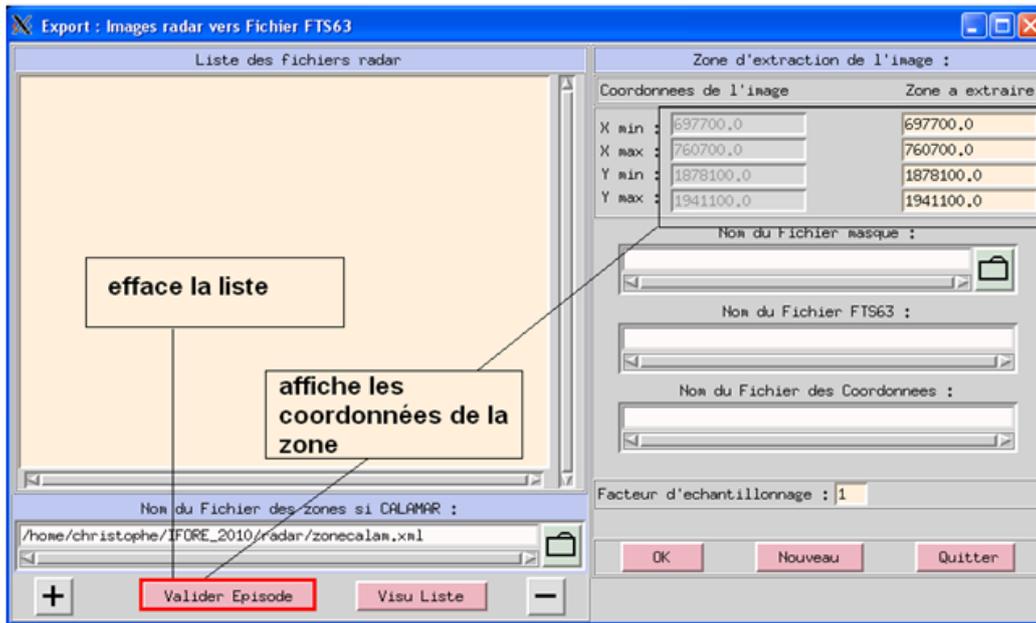


Figure 8-11

- on accède à la liste des épisodes constitués pour contrôler et éventuellement supprimer un épisode

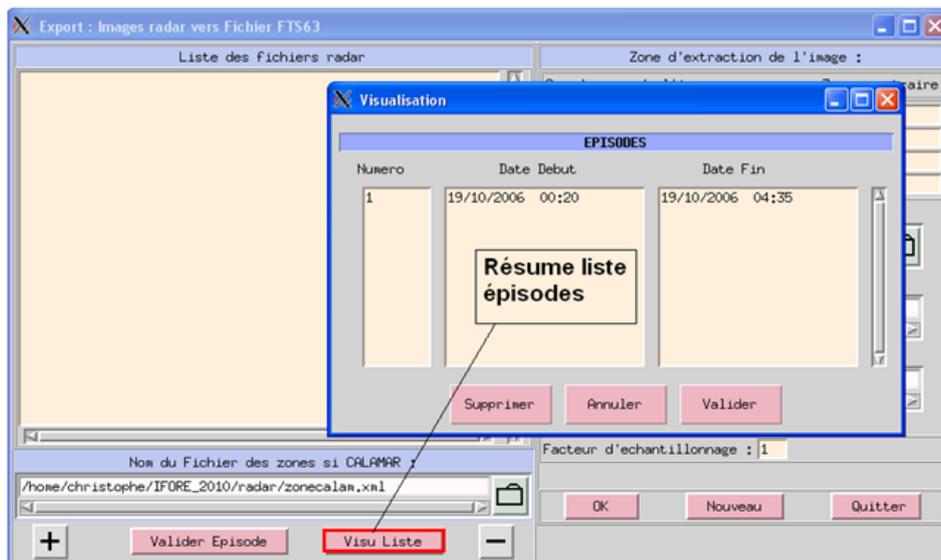


Figure 8-12

- on choisit les options d'importation :

- sélection des pixels radar correspondant à une sous-région
- utilisation d'un masque, qui permet de sélectionner les pixels radar correspondant à un ensemble de mailles, ex : bassin, classes d'altitudes ... Le fichier masque peut être au format GridAscii, Grass, Surfer ...

- nom du fichier contenant des débits : ces débits seront fusionnés au fichier txt des pluies radar , pour les dates auxquelles on dispose effectivement de mesures radar
- nom du fichier destination : fichier txt constitué à partir des pluies radar, pour utilisation dans Mercedes
- facteur d'échantillonnage des pixels radar : sélectionne 1 pixel sur N en X et en Y

- on lance la procédure d'importation : OK. La touche Nouveau permet de réinitialiser la procédure, et de remettre à blanc les listes et les champs.

NB : Les fichiers txt sont constitués au même pas de temps que celui utilisé par les fichiers radar, généralement 5 mn. Ce pas de temps peut être modifié en utilisant la fonction : *Vishyr/Gestion/Modifier Pas de temps*

9. ORGANISATION DU PROGRAMME ET RECOMPILATION

Vous pouvez être amené à re-compiler ATHYS ou l'un de ses composants, si vous avez fait une modification dans le code (Fortran ou C). La compilation s'effectue à l'aide de l'outil AcoTools, disponible dans l'onglet ATHYS fonctions ou fichiers se trouvant dans le répertoire

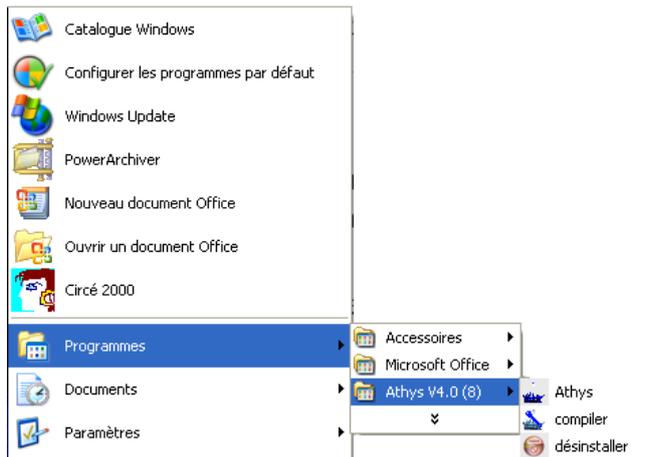


Figure 9-1

La commande *compiler* ouvre la fenêtre de compilation :

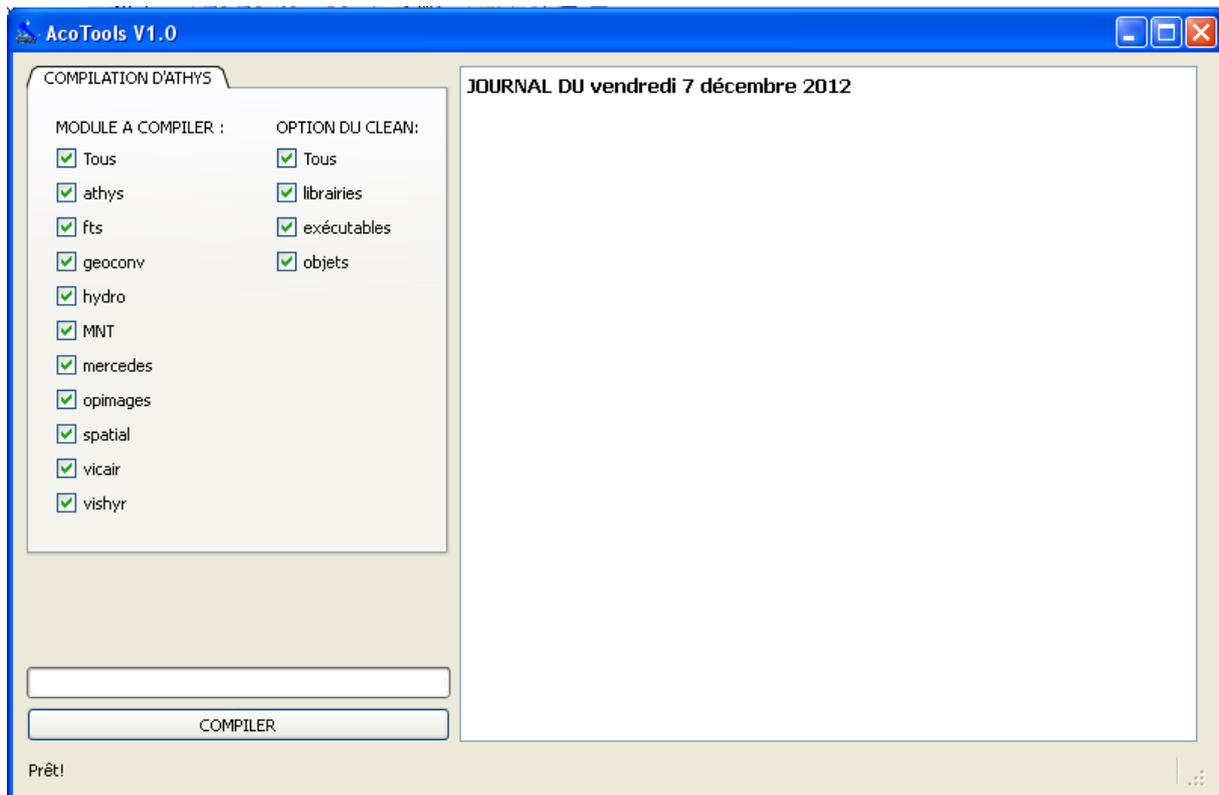


Figure 9-2

Il suffit ensuite de cocher les modules dans lesquels ont été faites les modifications, et qui doivent être recompilés. Il faut également préciser les options du "Clean", c'est-à-dire des types de modules qui doivent être préalablement supprimés pour activer la compilation. Dans la pratique, cette opération n'est pas nécessaire, sauf dans le cas de modifications concernant des fichiers intervenant dans des "include".

10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ayral, P.A. (2005) Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair ALTHAÏR – Approches spatiale et expérimentale – Application au bassin versant du Gardon d'Anduze. *Thèse de Doctorat*, Université de Provence, Aix- Marseille I, 310 p.

Arnaud P., Bouvier C., Cisneros L., Dominguez R., 2002. Influence of rainfall variability on flood prediction. *Journal of hydrology*, 260, 216-230

K. J. BEVEN & M. J. KIRKBY (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant, *Hydrological Sciences Journal*, 24:1, 43-69, DOI: 10.1080/02626667909491834

Bouvier, C., Delclaux, F. (1996): ATHYS: A Hydrological environment for spatial modelling and complig with a GIS. *Proceedings of the HydroGIS 96*, Vienna, Austria, pp. 19-28. AIHS publication no 235.

Christophe Bouvier, Anne Crespy, Agnes L'Aour-Dufour, François-Noel Crès, François Delclaux, Arthur Marchandise, 2010. Modélisation hydrologique distribuée – Plate-forme ATHYS. *In. Traité d'Hydraulique Environnementale, volume 9 : Logiciels d'Ingénierie du cycle de l'eau, chapitre 7, 115-134*

Christophe Bouvier, Anne Crespy et Agnès Cres, 2012. ANNEXE 10-3 : ATELIER HYDROLOGIQUE SPATIALISE ATHYS. *In. Hydrologie quantitative*, Pierre-Alain Roche, Jacques Miquel et Eric Gaume

Franchini M., Wendling J., Obled C., Todini E., 1996. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *J. Hydrol.*, 175, 293-338

Musy et Soutter (1993). *Physique du sol*. Coll. gérer l'environnement, Editions Lavoisier, 348 p.

Nash, J. E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10 (3), 282–290.

Rao, S.S. (1978): *Optimization – Theory and applications*. Wiley Eastern Limited, 747 p.

Saulnier G.M. (1996). *Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL*. Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble

Steenhuis T.S., Winchell M., Rossing J., Zollweg J.A., and Walter M.F., 1995. SCS Runoff Equation Revisited for Variable-Source Runoff Areas. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 121, 234(1995)