



HAL
open science

Bilan hydrique de bassins versants modélisés par machines séquentielles

Anne-Lise Courbis, Bernard Vayssade

► **To cite this version:**

Anne-Lise Courbis, Bernard Vayssade. Bilan hydrique de bassins versants modélisés par machines séquentielles. STIC & Environnement, Jun 2003, Rouen, France. pp.131-138. hal-00354299

HAL Id: hal-00354299

<https://hal.science/hal-00354299v1>

Submitted on 22 Jan 2009

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

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

Bilan hydrique de bassins versants modélisés par machines séquentielles

Anne-Lise Courbis¹ Bernard Vayssade²

¹ENSTIMA/LGI2P

²ENSTIMA/CMGD

¹LGI2P site EERIE - Parc scientifique G. Besse - 30035 Nîmes Cedex 1 France - Anne-Lise.Courbis@ema.fr

²CMGD - 6, Avenue de Clavières - 30319 Alès Cedex France - Bernard.Vayssade@ema.fr

Résumé :

Nous proposons dans cet article une nouvelle approche de modélisation et de simulation des phénomènes hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant. Elle est caractérisée par l'utilisation du formalisme de machines séquentielles à états finis pour représenter des phénomènes complexes continus et dynamiques tels que l'évapotranspiration, le ruissellement ou l'infiltration. L'interaction des phénomènes et le découpage spatial du bassin versant selon des critères géomorphologiques se traduisent par une interconnexion de machines séquentielles formant ainsi un modèle structurel hiérarchisé simulable à une échelle de temps choisie par l'utilisateur (mensuelle ou journalière). La simulation permet d'établir un bilan quantitatif du débit à l'exutoire et du niveau de la nappe. Elle repose sur une technique de simulation à événements discrets gérés par un échéancier. Deux types de scénarios sont pris en compte par le simulateur : des scénarios climatiques et des scénarios anthropiques ce qui permet d'évaluer sur un long terme l'évolution du bassin.

Mots clef :

Modélisation hydrologique, Bilan hydrique, Simulation hydrologique d'un bassin versant, Simulation de machines séquentielles.

Abstract:

This article presents a new approach for modeling hydrologic phenomena occurring at a catchment scale. It is characterized by the use of a finite state sequential automata formalism to model complex dynamical and continuous phenomena such as: evapotranspiration, run-off or infiltration. The interaction of phenomena and the spatial decomposition of the catchment according to geomorphologic criteria are represented by interconnecting sequential automata. This approach of modeling leads to the build up of a structured hierarchical model that can be simulated according to a time scale selected by the user (daily or monthly). Simulation results are the evaluation of the outflow of the river and the aquifer level variation. It is performed with a discrete event simulation strategy based on a scheduler. Two kinds of scenarios exist: climatic scenarios and anthropogenic scenarios allowing the evolution of catchment to be long term analyzed.

Keywords:

Hydrologic modelling, Water balance, Hydrologic simulation of catchments, Simulation of sequential automata.

1 Introduction

Les changements climatiques et les activités anthropiques façonnent et modifient à long terme, et malheureusement trop souvent de façon irréversible, les caractéristiques de nos paysages et cours d'eau. Cette modification s'opère aussi bien selon des critères quantitatifs que qualitatifs. S'il y a bien un facteur prépondérant que nous devrions maîtriser, c'est celui de l'impact des activités humaines (industrielles ou agricoles) sur notre environnement. Peut-être cela s'explique-t-il par le manque de communication entre décideurs et scientifiques ? L'explication serait-elle le manque d'outils simples à manipuler, fournissant des résultats facilement interprétables sur un long terme, permettant de prendre des décisions rationnelles ?

Nous nous sommes intéressés, dans le cadre du projet européen LOWRGREP (Land use Optimization With regards of the GRoundwater resources Protection in the mountain hardrock areas) au développement d'un outil d'évaluation de bilan hydrique de bassins versants par simulation afin d'étudier l'impact de changements climatiques ou anthropiques. De nombreux travaux de recherche ont été développés dans ce domaine mais ils ont la particularité d'être spécifiques à une zone géographique ou encore d'être trop complexes à manipuler par la présence d'un grand nombre de paramètres qui la plupart du temps ne sont pas mesurables, pour des questions de coût, de temps ou de difficultés dues à la géomorphologie de la zone d'étude. Nous souhaitons donc nous placer dans l'objectif de développer un outil d'aide à la décision permettant d'établir le bilan hydrique quantitatif de bassins versants en fonction de données climatiques et en tenant compte des activités anthropiques qui y sont développées ou qui le seront. L'originalité de cet outil est d'effectuer une spatialisation du bassin étudié ce qui est rarement pris en compte dans les modèles hydrologiques.

L'approche que nous avons choisie consiste à réaliser un découpage parcellaire du bassin. Tous les phénomènes mis en jeu dans le bilan hydrique d'une parcelle sont modélisés par des machines séquentielles. L'interaction des phénomènes ainsi que l'influence d'une parcelle sur

une ou plusieurs autres (par effet de dominance de gradient) sont représentées par l'interconnexion de machines séquentielles ce qui permet de simuler le bassin complet. L'intérêt de cette approche est de permettre une construction incrémentale du modèle (par parcelles, versants et nappes) en utilisant peu de paramètres.

La première partie de cet article résume les principaux phénomènes intervenant dans l'évaluation du bilan hydrique d'un bassin versant. Nous nous intéressons ensuite à la modélisation du bassin par une approche hiérarchisée fondée sur une interconnexion de machines séquentielles. Après avoir succinctement donné les caractéristiques du simulateur, nous montrerons les premiers résultats obtenus sur un bassin test situé dans les Cévennes. Enfin, nous ferons un bilan de cette étude et expliciterons les développements en cours et les perspectives à plus long terme.

2 Bilan hydrologique d'un bassin versant

2.1 Principaux phénomènes mis en jeu

Un bassin versant est délimité par une ligne de partage des eaux qui, en s'écoulant le long des pentes, convergent vers un exutoire. L'exutoire est donc le point vers l'aval où se rejoignent les eaux de surface. Aux phénomènes de ruissellement des eaux de surface s'ajoutent des phénomènes d'évapotranspiration, d'infiltration et des phénomènes spécifiques à la zone saturée : recharge de la nappe et écoulement vers l'exutoire. Etablir un bilan hydrologique consiste à quantifier dans le temps ces différents échanges ou transferts de flux [1].

La figure 1 donne une représentation synthétique de toutes les composantes du bilan hydrique, en mettant en évidence les phénomènes de surface (ruissellement, écoulement hypodermique, évapotranspiration et infiltration) et ceux de la zone saturée (arrivée de l'infiltration, variation de hauteurs piézométriques et écoulement de la nappe vers l'exutoire).

2.2 Les phénomènes de surface

Lorsqu'une pluie ou de la neige tombe à la surface d'un bassin versant, une partie est rapidement utilisée par la végétation ou regagne l'atmosphère. Cela constitue l'évapotranspiration potentielle. Elle dépend principalement des conditions climatiques : chaleur par rayonnement solaire sur la surface de la terre, température de l'air et de l'eau, humidité de l'air, vent, pression atmosphérique. D'autres facteurs interviennent tels que l'état de saturation en eau du sol et la couverture végétale. Ce phénomène est complexe, sa mesure est une opération difficile à mener si bien que plusieurs formules coexistent, empiriques (Turc [2]) ou

dérivant d'un bilan énergétique (Penman [3]), à des échelles de temps journalières, décennales, ou mensuelles.

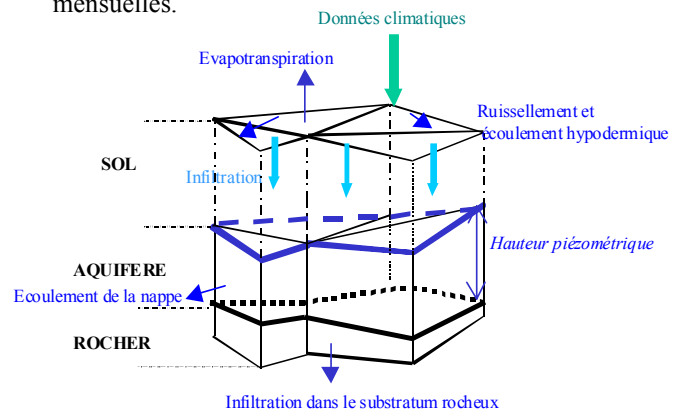
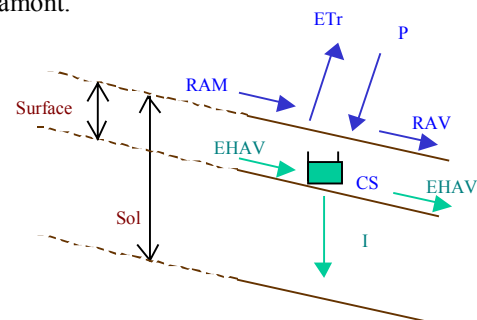


Figure 1. Phénomènes hydrologiques de surface et souterrains

Une partie de l'eau ruisselle en surface, au-dessus de la partie du sol saturée et sa quantification est fonction principalement de la couverture végétale.

L'eau qui s'infiltré dans la partie hypodermique du sol va permettre de recharger la réserve en eau. Le surplus va former un écoulement hypodermique et une infiltration vers la nappe (dans une proportion de 80/20% dans le cadre de notre étude).

Si l'on isole une parcelle du bassin de façon à avoir une homogénéité de pente et de couverture végétale (cf. figure 2), aux ruisselllements de surface et hypodermiques qui partent vers l'aval, s'ajoutent les mêmes phénomènes arrivant de parcelles situées en amont.



P : précipitation
 ETr : évapotranspiration réelle
 RAM : Ruissellement AMont
 RAV : Ruissellement Aval
 CS: Capacité de stockage en eau du sol
 I : Infiltration
 EHAM : Écoulement Hypodermique Amont
 EHAV : Écoulement Hypodermique AVal

Figure 2. Phénomènes hydrologiques de surface

2.3 Les phénomènes en zone saturée

L'eau qui s'infiltré contribue à la recharge de la nappe (cf. Figure 3) et donc à l'augmentation de ses hauteurs piézométriques. La pente naturelle de la zone saturée provoque un écoulement de la nappe vers la rivière et contribue donc à augmenter le débit à l'exutoire et faire baisser le niveau de la nappe. Nous considérons dans cette étude que le bassin se situe sur une roche homogène, non fracturée et imperméable (il n'y a donc pas de perte dans le substratum rocheux). Etant donné des hauteurs piézométriques initiales, l'infiltration et les paramètres caractéristiques de la nappe (longueur, largeur et perméabilité), la loi de Darcy [4] permet sur un pas de temps donné de calculer le flux sortant et les nouvelles hauteurs de nappe.

Une vision de découpage parcellaire de la surface selon des critères d'homogénéité de pente et de couverture végétale implique que la nappe est vue comme une unité hydrogéologique dont la recharge est assurée par les infiltrations de chaque parcelle de surface (cf. Figure 3).

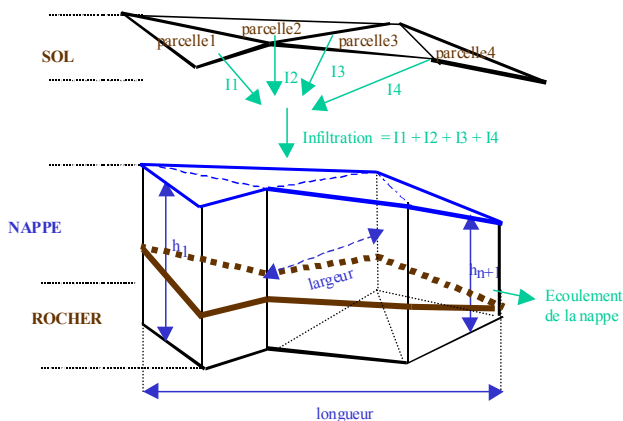


Figure 3. Phénomènes hydrologiques en zone saturée

3 Modélisation comportementale et structurale de systèmes : application au bilan hydrique

Chaque phénomène mentionné dans le paragraphe précédent va être représenté isolément par un modèle comportemental non décomposable suivant le formalisme de machine séquentielle. Leur interaction sera représentée par un modèle structural qui est un modèle d'interconnexions de modèles comportementaux ou structurels. L'intérêt de cette approche est double : il est aisé de remplacer un modèle comportemental par un autre sans remettre en cause la structure complète du modèle, ce qui permet de comparer les modèles empiriques des phénomènes mal connus. D'autre part, le

formalisme de modélisation étant uniforme (interconnexions de machines séquentielles), le moteur du simulateur est indépendant du phénomène à simuler. Il est donc possible d'interchanger des composants du modèle, de créer de nouveaux modèles comportementaux, sans modifier le fonctionnement du simulateur.

3.1 Modélisation comportementale par machine séquentielle

Une machine séquentielle décrit le comportement d'un système par rapport à son interface (ses entrées-sorties) et son état interne. Trois fonctions doivent être définies pour modéliser un comportement [5] :

- δ_{ext} : fonction de transition externe qui définit le changement d'état (valeur du nouvel état et durée de vie) lorsqu'un événement arrive sur les entrées ;
- δ_{int} : fonction de transition interne qui définit le nouvel état de la machine lorsque la durée de vie de son état courant est écoulée ;
- λ : fonction de sortie qui définit les événements à générer sur les sorties de la machine lorsque la durée de vie de l'état courant est écoulée.

Remarquons que la durée de vie d'un état peut être infinie, ce qui signifie que la machine est dans un état stable et n'évoluera pas, sauf si un nouvel événement arrive sur une de ses entrées. La durée de vie peut être nulle ce qui signifie que le système change d'état instantanément et peut générer un événement dès lors qu'une de ses entrées est activée.

Appliquons ce formalisme à la modélisation du phénomène de la fonte des neiges. Les entrées sont : T , la température et P les précipitations (sous forme liquide ou solide). Les variables caractérisant l'état interne sont : S_{snow} , la neige accumulée (si $T < 0$) et M_{melt} la neige fondue (si $T > 0$). La figure 4 donne une modélisation possible de ce phénomène (car là encore, plusieurs modélisations physiques existent) sous forme de machine séquentielle.

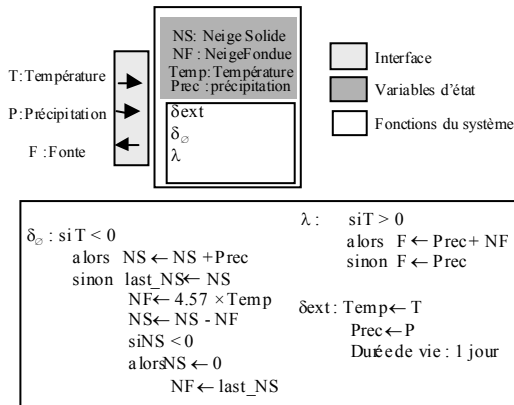


Figure 4. Machine séquentielle du modèle Fonte_Neige

3.2 Modélisation structurelle d'un bassin versant

Etant donné un ensemble de composants représentant sous forme de machines séquentielles tous les phénomènes isolés, la méthodologie de modélisation du bassin versant consiste à élaborer un modèle structurel par interconnexions de composants. Afin de faciliter la démarche de l'utilisateur, trois modèles structurels ont été définis, correspondant à trois niveaux d'abstraction que l'on peut associer à un bassin versant :

- la parcelle qui est une partie du sol de pente et de couverture végétale uniformes,
- le versant qui est une interconnexion de parcelles et d'une nappe définie selon des règles de dominance de gradient,
- le bassin qui est une interconnexion de versants dont les flux sont dirigés vers la rivière et donc l'exutoire.

Appliquons ce principe d'interconnexions de modèles à la représentation d'une parcelle (cf. figure 5) où tous les modèles interconnectés sont des machines séquentielles représentant les phénomènes mis en jeu au niveau de la surface. Ce même principe permet de représenter un versant par interconnexions de parcelles (cf. figure 6 où le versant est constitué de deux parcelles).

3.3 La classification des modèles

L'implémentation du modèle selon le formalisme de la programmation orientée objet [6] nous a amené à définir des classes de modèles et une taxinomie d'héritage (cf. Figure 7). Par exemple, les modèles comportementaux ont la propriété commune d'avoir une interface, une liste de variables d'état et les trois fonctions fondamentales définissant une machine séquentielle.

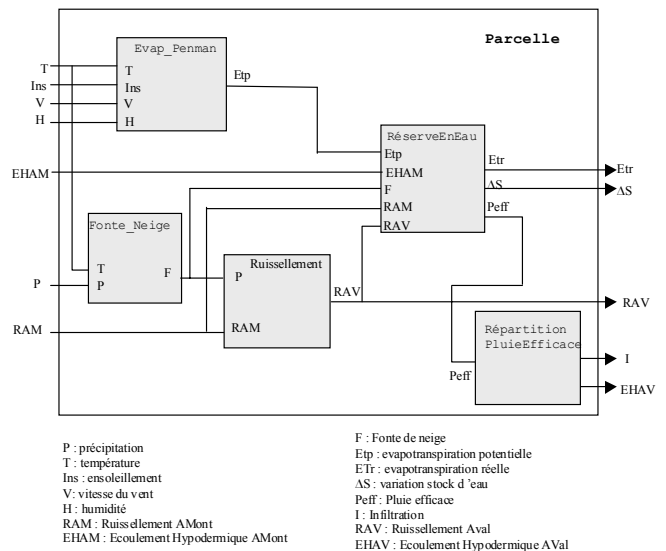


Figure 5. Modèle structurel d'une parcelle

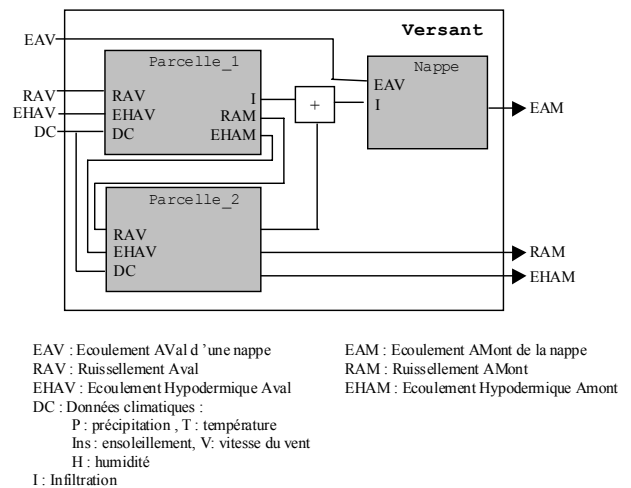


Figure 6. Modèle structurel d'un versant composé de deux parcelles, (Parcelle_1 dominante Parcelle_2)

Le comportement de ces modèles est identique quelle que soit leur sous-classe ; il est par conséquent défini dans la classe générique COMPORTEMENT. Les sous-classes de la classe STRUCTURE ont la caractéristique commune d'avoir une liste de composants et d'interconnexions mais évidemment les règles d'interconnexions sont spécifiques aux sous-modèles structurels (PARCELLE, VERSANT) et également aux modèles comportementaux choisis. Par exemple, les règles d'interconnexions de PARCELLE diffèrent selon que le modèle d'évapotranspiration est Penman ou Turc.

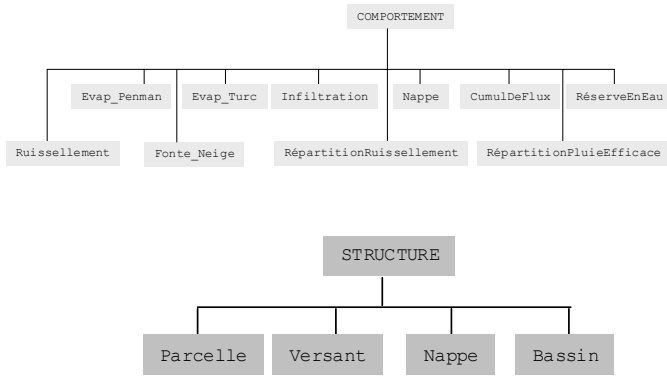


Figure 7. Taxinomie des modèles

L'outil de modélisation de bassins versants a été développé en Visual C++. La création du modèle spécifique à un bassin est effectuée par instantiation des classes génériques et par paramétrisation des modèles (via une interface utilisateur). Le nombre de paramètres est restreint (surface, couverture végétale et coefficient de répartition des pluies efficaces des parcelles ; hauteurs piézométriques, surface des nappes et perméabilité des sols). Les interconnexions sont générées automatiquement en demandant à l'utilisateur de spécifier les dominances de gradient entre parcelles. Notons que selon le choix de l'utilisateur (modèle pour simulation journalière ou mensuelle), ce n'est pas la même classe de modèle comportemental qui sera instantiée (par exemple, classe `Turc` pour l'évapotranspiration mensuelle ou classe `Penman` pour l'évapotranspiration journalière).

4 Hydrosimul: bilan hydrique de bassins versants par simulation

4.1 Principe de simulation

Une fois le modèle construit, il s'agit de le simuler. Une étape préliminaire intervient permettant une « mise à plat » du modèle de façon à ce qu'il ne soit plus constitué que de modèles comportementaux. Les modèles structurels construits selon la méthodologie de modélisation incrémentale du bassin disparaissent donc. Le moteur du simulateur n'aura plus qu'à gérer via un échéancier des événements générés par les modèles comportementaux. Le rôle du simulateur est donc double : (i) activer les fonctions caractéristiques des machines séquentielles en fonction d'événements climatiques ou de fin de durée de vie d'états internes et (ii) propager via les interconnexions les événements générés en sortie des machines séquentielles.

Le simulateur a été implémenté selon le formalisme de programmation orientée objet en Visual C++. C'est donc une classe dont la fonction principale est de

communiquer par envoi de messages [6] avec les modèles constituant le bassin versant. Ses variables caractéristiques sont : la date courante (c'est le seul modèle à connaître la date simulée) et l'échéancier dans lequel les événements sont classés par ordre chronologique. Le principe de simulation est celui de la simulation à événements discrets [5,6]. Notons que son fonctionnement est totalement indépendant du modèle simulé dans la mesure où celui-ci n'est composé que de machines séquentielles. La figure 8 représente les classes principales utilisées pour la simulation : la classe `Simulateur` dont les méthodes permettent l'activation des fonctions caractéristiques des machines séquentielles ; la classe `Echéancier` qui est un ensemble d'événements datés et classés par ordre chronologique ; la classe `Evénement` qui associe une valeur à un élément de l'interface d'entrée-sortie de la machine séquentielle ; la classe `Interface` qui spécifie les noms des entrées et des sorties d'une machine séquentielle générique.

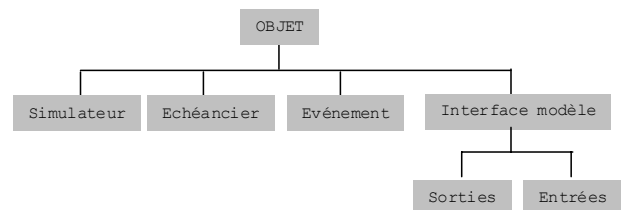


Figure 8. Classes utilisées pour la simulation

Avant de donner les premiers résultats obtenus sur un bassin test, nous allons expliciter les paramètres de simulation et les différents types de scénarios que l'utilisateur peut établir.

4.2 Les paramètres de simulation

L'utilisateur fixe et peut modifier certains paramètres afin d'effectuer différents jeux de test. On distingue les paramètres spécifiques au modèle et ceux qui sont liés à la simulation.

Les paramètres de modélisation modifiables par l'utilisateur sont relatifs à la description des parcelles et des nappes. En ce qui concerne les parcelles, il s'agit de la couverture végétale et du coefficient de répartition des pluies efficaces entre ruissellement hypodermique et infiltration. En ce qui concerne les nappes, il s'agit des hauteurs piézométriques et de la perméabilité des terrains. L'utilisateur ne peut modifier la structure du modèle.

Les paramètres de simulation sont de deux types : le pas de temps de la simulation (journalier ou mensuel) et l'activation de scénarios anthropiques permettant de modifier le bassin décrit dans sa forme initiale. Un modèle construit avec des composants représentant les

phénomènes à une échelle mensuelle pourra être simulé avec des données climatiques journalières (en effectuant une moyenne des données) ou mensuelles.

4.3 Les scénarios

Le simulateur gère deux types de scénarios : les scénarios climatiques et les scénarios anthropiques.

Les scénarios climatiques sont définis par année, l'utilisateur pouvant sélectionner une ou plusieurs années de simulation. Pour un pas de temps mensuel, les scénarios climatiques sont constitués des valeurs : température, précipitation et ensoleillement. Pour un pas de temps journalier, à ces valeurs doivent être ajoutées : vitesse du vent, humidité de l'air et pression de vapeur saturante. Ces données sont généralement données par des stations de Météo France mais le simulateur propose à l'utilisateur de créer des scénarios climatiques "fictifs" représentant des années de sécheresse ou de grande pluie. Le simulateur initialise automatiquement l'échéancier à partir des données climatiques.

Les scénarios anthropiques consistent à définir au niveau parcellaire des modifications de couverture végétale ou d'activités (industrielles ou agricoles) sur une durée de temps quelconque (un an pour faire des comparaisons précises d'évapotranspiration, ruissellement ou variation de nappes ; des dizaines d'années pour étudier à long terme l'évolution du bassin). Ces scénarios sont établis via une interface graphique permettant de sélectionner par année : une parcelle et une nouvelle activité anthropique. On peut ainsi représenter la coupe d'une forêt et le développement de pâturage sur 5 ans et l'installation d'une activité ovicole sur 10 ans. Cette modification d'utilisation des terres jouera sur la réserve en eau du sol, sur le coefficient de partage entre infiltration et écoulement hypodermique et sur le coefficient de ruissellement, et donc sur les différents termes du bilan hydrique.

5 Résultats

5.1 Description du bassin versant test

Les outils de modélisation et de simulation ont été testés dans un premier temps sur le bassin versant de La Sapine situé dans le Mont Lozère. C'est un massif granitique, homogène à l'échelle du bassin versant. Ce granite est recouvert d'une couche de sol d'environ 0.5m d'épaisseur. Le bassin se situe entre les altitudes 1165m et 1395m. Sa superficie est de 54 hectares. Il est constitué d'une forêt de feuillus sur 57% de sa superficie, le reste étant des pâturages.

Le modèle du bassin de La Sapine est composé de trois versants et six parcelles. La nappe est modélisée par trois sous-nappes alimentées par les infiltrations provenant des parcelles des trois versants. Son

implémentation repose sur 44 instances de modèles comportementaux et sur 130 connexions.

Ce bassin a été instrumenté par le CNRS [9] et les débits à l'exutoire ont été mesurés sur les vingt dernières années. Certaines données climatiques sont manquantes pour cette période, aussi nous présentons les premiers résultats obtenus sur une année de référence : 1994 pour laquelle toutes les données et mesures de débit à l'exutoire sont complètes. En revanche, les hauteurs piézométriques n'ont pas été mesurées car elles nécessitent un dispositif de forage coûteux : la simulation est donc basée sur une évaluation donnée par des experts de la zone étudiée.

5.2 Simulation sur une année

Les précipitations de l'année 1994 sur laquelle nous effectuons le bilan hydrique par simulation sont représentés sur la Figure 8. Cela représente 2427 mm de précipitation.

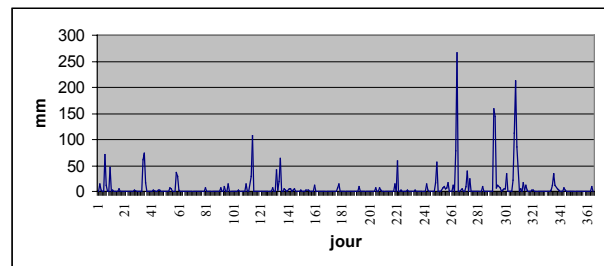


Figure 8. Précipitation (mm) de l'année 1994 sur le bassin versant de La Sapine

Notons les forts épisodes pluvieux des mois de septembre (265mm) et de novembre (211mm).

Le bilan a été calculé en faisant varier trois paramètres : k , coefficient de répartition des pluies efficaces entre écoulement hypodermique et infiltration ; k_{perm} , perméabilité de la zone saturée et p , hauteur piézométrique de la nappe au niveau de la rivière.

L'évapotranspiration calculée est (quelles que soient les valeurs des paramètres) de 469mm ce qui représente 19% des précipitations. L'ordre de grandeur est jugé satisfaisant par les experts du terrain mais on ne dispose malheureusement pas de valeurs mesurées pour valider ce résultat.

Le tableau 1 donne la valeur cumulée en mm des débits journaliers pour les différentes valeurs des paramètres estimées par des experts de la zone étudiée. Le cumul des débits journaliers mesurés étant de 1959mm ce sont les valeurs $k = 0.20$, $k_{perm} = 10^{-4}$ m/s et $p = 0.3$ m qui donnent les résultats les plus réalistes.

		$k_{perm}=10^{-3}m/s$	$k_{perm}=10^{-4}m/s$	$k_{perm}=10^{-5}m/s$
$k = 0.15$	$p=0.3$	2255	1992.6	1754.5
	$p=0.5$	2485.4	2126.8	1775.1
$k = 0.20$	$p=0.3$	2255.3	1941.1	1682.9
	$p=0.5$	2483.2	2075.8	1703.7
$k = 0.30$	$p=0.3$	2233	1843.5	1550
	$p=0.5$	2458	1979.5	1573.1

Tableau 1. Cumul annuel (mm) des débits journaliers calculés de La Sapine

La figure 9 détaille au niveau journalier les débits calculés (mm) pour la valeur des paramètres donnant un débit proche du débit réel, i.e. : $k = 0.20 m$, $k_{perm} = 10^{-4} m/s$ et $p=0.3 m$

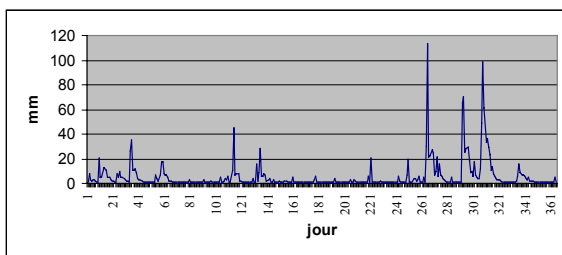


Figure 9. Débit calculé de la Sapine (mm)
 $k = 0.20 m$, $k_{perm} = 10^{-4} m/s$ et $p=0.3 m$

Nous observons que les valeurs des débits sont très variables (0 mm à l'étiage au mois d'août et plus de 140 mm pour la crue de novembre 1994) et que le modèle est très réactif aux épisodes pluvieux.

Comparons les valeurs obtenues par calcul avec les valeurs mesurées par le CNRS (cf. Figure 10).

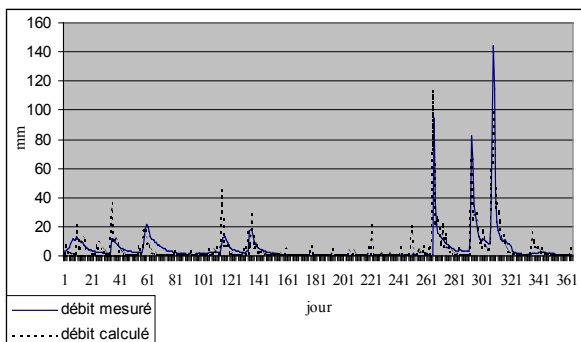


Figure 10. Comparaison des débits mesurés (mm) et des débits calculés avec pour paramètres :
 $k = 0.20 m$, $k_{perm} = 10^{-4} m/s$ et $p=0.3 m$

Le modèle rend bien compte de la réactivité du bassin versant mais il a tendance à surestimer les crues. Il reste donc un travail d'affinement des paramètres qui pour l'instant sont fixés par expertise à des valeurs constantes, indépendamment des saisons.

Intéressons nous maintenant à une des applications possibles de la simulation : supposons qu'une coupe de forêt soit effectuée au profit du développement de pâturages. Cette coupe se traduit par une modification de l'évapotranspiration et du coefficient de ruissellement. Dans ce cas (cf. figure 11), le cumul des débits journaliers de la Sapine est de 2071 mm (soit une augmentation de 7 % par rapport à la configuration initiale) et l'évapotranspiration est de 440 mm (soit 18% des précipitations).

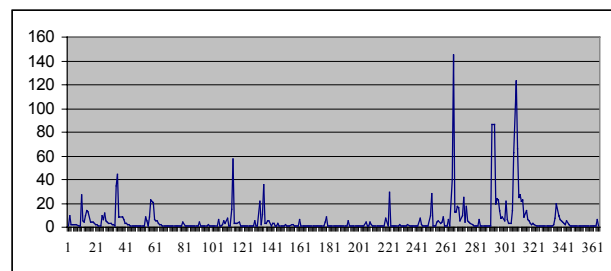


Figure 11. Débit calculé de la Sapine (mm) après une coupe de forêt

Nous voyons donc que la modification d'une partie du bassin a une influence non négligeable sur le bilan hydrique ne serait-ce que sur une année de simulation. Le même bilan peut être fait sur des dizaines d'années. Il est donc important de pouvoir disposer d'un outil permettant d'analyser sur un long terme l'impact des activités anthropiques.

6 Conclusion

Nous avons défini une nouvelle approche de modélisation de bassins versants en vue d'établir un bilan hydrique. Elle présente plusieurs avantages : peu de paramètres sont nécessaires pour obtenir des résultats satisfaisants à une échelle de temps journalière ou mensuelle ; la construction du modèle n'est pas figée par rapport à des modèles physiques puisqu'il est possible d'ajouter de nouvelles classes de composants comportementaux sans remettre en cause la construction du modèle et sa simulation.

Les résultats qui ont été présentés ont fait l'objet d'une première partie de notre travail. Il reste cependant de nombreuses tâches à réaliser pour valider et améliorer ce travail. En ce qui concerne la validation, nous n'avons pas jusqu'à présent mentionné le problème de calage du modèle car nous ne disposons pas de données

suffisantes. Lorsque ces données nous seront fournies, nous planifions de procéder à un calage du modèle en faisant une optimisation d'erreur quadratique sur les 5 dernières années et un test de validation sur les cinq années précédentes. L'idéal étant dans le futur que ce calage soit réalisé de façon automatique et transparente pour l'utilisateur. En ce qui concerne les améliorations du modèle, nous envisageons d'affiner le traitement des données climatiques en introduisant deux facteurs : l'altitude et l'exposition du versant. Nous souhaitons également enrichir la taxinomie des composants comportementaux de façon à intégrer de nouveaux modèles physiques des phénomènes présentés.

A moyen terme, nous souhaitons intégrer l'outil de modélisation et de simulation au sein d'un SIG : il n'y aurait donc plus d'interface utilisateur, toutes les caractéristiques du modèle étant stockées dans les bases de données du SIG.

Enfin, à plus long terme, pour que la prise de décision du devenir des bassins versants et plus général de notre patrimoine géographique soit faite de façon rationnelle avec des critères fondamentaux, nous envisageons d'associer à ce bilan quantitatif un bilan qualitatif tenant compte des phénomènes chimiques interagissant entre faunes, flores, rivière et nappe.

Remerciements :

Nous remercions C.Martin et J.F Didon-Lescot (UMR 6012 "Espace", Equipe GVE) pour nous avoir fourni les données nécessaires à l'étude du bassin versant de la Sapine et nous avoir fait partager leurs précieuses connaissances du site étudié.

Nos remerciements également à C. Ordenovic, post-doctorant, qui a développé l'outil de modélisation et simulation HydroSimul et à P.A. Ayrat, doctorant à l'Ecole des Mines d'Alès, qui a contribué à localiser les limites du bassin test de La Sapine par GPS.

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet européen LOWRGREP ref : EVK1-1999-00040 du programme FP5-A1-PT4-EESD (<http://lowrgrep.site-erie.ema.fr>).

Références

- [1] Cosandey C., Robinson M., *Hydrologie Continentale*, Paris, Armand Colin, 2000, 360 pages.
- [2] Turc L., *Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*, Ann. Agro., INRA, t.V, n° 4, p. 491-596, 1954.
- [3] Penman H.L., *Natural evaporation from open water, bare soil and grass*, Proc. Roy. Soc. London, A 193, p. 120-146, 1948
- [4] Darcy H. : « Les fontaines publiques de la ville de Dijon », Dalmont, Paris, 1856.
- [5] B.P. Ziegler, *Multifaceted Modeling and Discrete Event Simulation*, Academic Press, 1984.
- [6] B.P. Ziegler, *Object Oriented Simulation with hierarchical Agents and Endomorphic Systems*, Academic Press, 1990.
- [7] Projet LOWRGREP EVK1-1999-0040, *Specification of a generic model for simulation*, Deliverable 11, Septembre 2002, Ed. A.L. Courbis.
- [8] Projet LOWRGREP EVK1-1999-0040, *Modelling/simulation tool*, Deliverable 14, Novembre 2002, Ed. A.L Courbis
- [9] C.Martin, "Recherche sur le BVRE du Mont-Lozère", Travaux du BVRE du Mont-Lozère Etudes de géographie physique n° XXIX - 2002, ISSN 0769-1750, p.5-13.