

RÔLE DE LA FORÊT SUR LES DÉBITS DANS DES BASSINS VERSANTS MONTAGNEUX SUB-MÉDITERRANÉENS : UNE APPROCHE PAR MODÉLISATION

par Anne-Laure COGNARD-PLANCQ⁽¹⁾, Marc VINCENT⁽¹⁾, Michel NORMAND⁽²⁾,
avec la collaboration de l'UMR 6012 "ESPACE"⁽³⁾

(1) : Laboratoire d'hydrologie, Université d'Avignon, 33 Rue Louis Pasteur, 84000 AVIGNON.

Mél : anne-laure.cognard-plancq@univ-avignon.fr.

(2) : Cemagref, Division Hydrologie, Parc de Tourvoie, BP 44, 92 163 ANTONY cedex.

(3) : Claude MARTIN et Jean-François DIDON-LESCOT, UMR 6012 "ESPACE" du CNRS, Département de Géographie de l'Université de Nice - Sophia-Antipolis, 98 Boulevard Édouard Herriot, BP 3 209, 06204 NICE Cedex 3.

RÉSUMÉ : L'impact d'un couvert forestier a été étudié sur des bassins versants sub-méditerranéens montagneux en utilisant le modèle pluie-débit conceptuel GRHum. Ce modèle simule le fonctionnement du *continuum* sol-végétation-atmosphère vis-à-vis des phénomènes d'évapotranspiration à partir des caractéristiques du sol et de la couverture végétale. Le modèle permet ainsi la simulation des débits et du contenu hydrique du sol. Une fonction neige a été ajoutée à la version initiale du modèle, pour simuler le comportement hydrologique durant les périodes de fonte de neige. Le modèle a été appliqué aux bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère où une base de données hydro-météorologiques est disponible depuis 1981. Un site sur lequel une coupe forestière graduelle a été prescrite entre 1987 et 1989 (bassin versant de la Latte) est comparé à un site non exploité (bassin versant de la Sapine), utilisé comme site de référence. En accord avec les changements d'occupation du sol sur le bassin versant de la Latte, la période d'étude a été scindée en trois parties. Pour chaque bassin versant, le modèle produit de bonnes simulations pour les trois périodes. Un essai d'identification du rôle de la forêt sur le comportement hydrologique a été mené en simulant, pour le bassin versant de la Latte, les débits pendant la période de la coupe en utilisant les paramètres du modèle obtenus avant et après la coupe. Cet exercice a montré que la coupe a induit une augmentation significative des forts débits journaliers. Une approche similaire menée pour le bassin de référence, a permis de contrôler les incertitudes sur les prédictions du modèle (limite de prédiction de 90 %), le biais du modèle étant principalement dû aux différences climatiques entre les trois périodes de simulation. En prenant en compte le biais du modèle, les résultats suggèrent que la coupe forestière aurait induit une augmentation des débits de 10 %.

MOTS-CLÉS : hydrologie, forêt, modélisation, méditerranéen, crue, état hydrique du sol.

ABSTRACT : The impact of forest cover on streamflow has been studied in sub-Mediterranean mountain watersheds using the daily time step-conceptual rainfall/runoff model GRHum. Certain characteristics (pertaining to the soil, vegetation or atmosphere) are used to compute model parameters that describe the behaviour of the various interfaces with respect to water exchange by evapotranspiration. This model enables the simulation of runoff and soil water content evolution. A snow function has been added to the initial version of the model to simulate the hydrological behaviour during the snow melt periods. This model has been applied to the Mont-Lozère experimental watersheds, for which hydro-meteorological data have been available since 1981. A site where a gradual felling of the forest was prescribed between 1987 and 1989 (the Latte watershed), used as reference. The period covered by the study of the Latte site has been divided into three parts, on the basis of changes in land cover. For both watersheds, the model produced good results over all three periods. It is also possible to identify the role of forest on hydrological behaviour by simulating discharge from the Latte watershed during the felling period using adjusted pre- and post-felling model parameters. This exercise has shown that felling induces a significant increase in high flow rates. A similar approach conducted for the Sapine reference watershed made it possible to evaluate the validity of our model predictions (accurate to within 10 % of true values); the model bias being mostly due to climatic differences between the three simulation periods. Taking into account this model bias, results suggest that felling may increase runoff by 10 %.

KEY- WORDS : hydrology, forest, modelling, mediterranean, flood, soil water content.

I - INTRODUCTION

La plupart des spécialistes s'accordent sur le fait que les forêts réduisent significativement les pics de crues (J.D. HEWLET et J.D. HELVEY, 1970 ; H. LIEBSCHER, 1972 ; Z.M. CHEN et M. HE, 1991 ; A. DUBICKI, 1994). Cela est expliqué par la plus grande capacité de stockage des sols en milieu forestier. Toutefois ces effets sont surtout discernables sur de faibles événements de crues, et leur rôle lors de fortes crues reste à démontrer. Durant les périodes de basses eaux, une baisse des réserves en eau du sol est attendue, en relation avec des taux d'évapotranspiration plus élevés pour les arbres (I.R. CALDER et M.D. NEWSON, 1979 ; J.S.G. McCULLOCH et M. ROBINSON, 1993 ; B. FAHEY et R. JACKSON, 1997). Mais, dans certains cas, des taux d'infiltration plus élevés, dus aux caractéristiques des sols, facilitent le mouvement de l'eau dans les couches de sol et soutiennent le débit de base A. SIRIN *et al.*, 1991 ; H.C. PEIRERA, 1992).

La connaissance du rôle de la forêt sur les débits extrêmes est particulièrement essentielle en région méditerranéenne où des sécheresses sévères sont suivies de précipitations abondantes. Cette situation climatique est particulièrement marquée sur notre zone d'étude (site expérimental du Mont-Lozère) où il existe une influence montagnarde (2000 mm de pluie par an).

L'intérêt d'utiliser la modélisation hydrologique pour l'étude de l'impact hydrologique des changements d'occupation du sol est largement reconnu. Des modèles hydrologiques ont été utilisés avec succès pour quantifier (M. BRANDT *et al.*, 1988 ; J. LAVABRE *et al.*, 1993) ou pour prédire (P. STORCK *et al.*, 1998 ; B. MATHEUSSEN *et al.*, 2000) les effets hydrologiques de changements rapides d'occupation du sol sur des bassins versants forestiers (coupes à blanc, exploitation forestière, incendies).

Dans cette étude, un modèle pluie-débit conceptuel journalier incluant un module relatif au *continuum* sol – végétation - atmosphère (GRHum modèle – C. LOUMAGNE *et al.*, 1996) a été utilisé comme outil d'analyse. Dans ce modèle, la fonction de production est fondée sur un concept réaliste consistant à appréhender le sol sous la forme d'un système à deux couches. L'évapotranspiration est calculée en tenant compte des caractéristiques du sol et du couvert

végétal. Ce modèle est utilisé pour mettre en évidence une relation quantitative entre le couvert forestier et les débits et pour évaluer l'impact hydrologique des changements des conditions de surface. L'approche générale adoptée dans le cadre de cette étude consiste à étalonner un modèle hydrologique sur un bassin versant expérimental soumis à une coupe forestière pendant une période non influencée par la coupe, puis à utiliser le modèle ainsi calibré pour simuler les débits pendant la période influencée par la coupe. Le modèle fournit alors une estimation de ce qu'auraient été les débits en l'absence de coupe forestière. La comparaison des débits simulés et observés pendant la période de la coupe forestière permet d'estimer quantitativement les effets de la coupe. La même démarche, réalisée sur un bassin n'ayant pas subi de coupe forestière, fournit une estimation de l'amplitude du biais pouvant altérer les résultats du modèle. Cette approche est comparée à des études conventionnelles complémentaires pour évaluer les avantages de telles techniques de modélisation.

II - ZONE D'ÉTUDE ET MÉTHODES

Les bassins versants étudiés dans le cadre de cette étude sont situés sur la partie sud du massif montagneux granitique du Mont-Lozère, laquelle est englobée dans le Parc national des Cévennes (Fig. 1). Ces sites sont suivis depuis 1981 dans le but de fournir des données sur l'impact environnemental des perturbations anthropiques des écosystèmes (F. LELONG *et al.*, 1990). Ils sont situés à 80 km de la Méditerranée et sont compris entre 1150 et 1500 m d'altitude. Caractérisé par une distribution irrégulière des pluies dans l'année (2000 mm de pluie annuelle avec des événements très pluvieux en automne et au printemps, et des étés et des hivers très secs), une température annuelle moyenne de 7 °C et des chutes de neige représentant entre 10 et 40 % des précipitations annuelles, le climat est méditerranéen avec des caractéristiques nettement montagnardes.

Le site expérimental est constitué de trois bassins versants à végétation contrastée, mais les données utilisées ici ne concernent que deux d'entre eux : le bassin de la Sapine recouvert par une hêtraie et le bassin de la Latte recouvert actuellement par une végétation herbacée et ligneuse caractéristique des landes. Leurs surfaces sont respectivement égales à 54 ha et

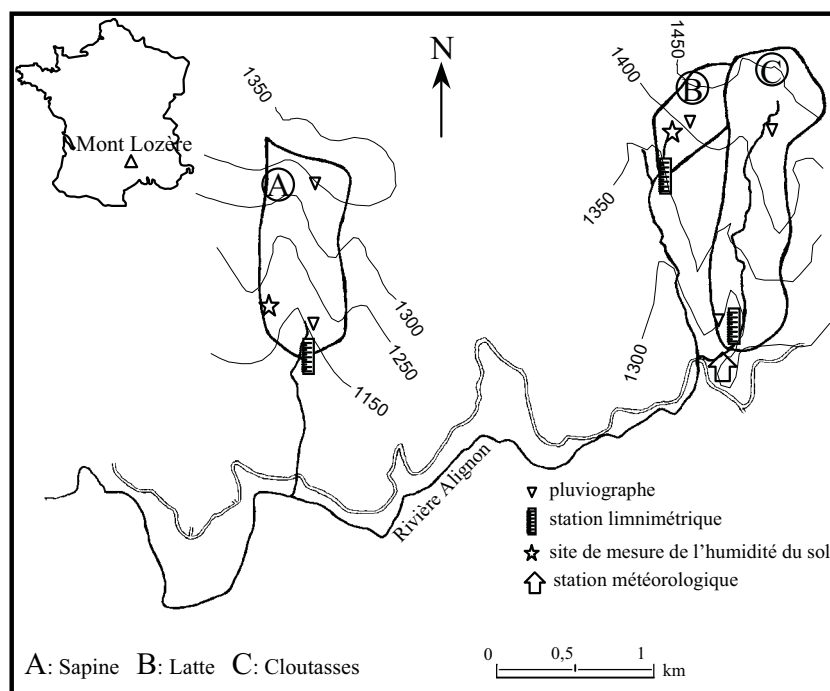


Figure 1 - Situation du site d'étude et présentation des équipements.

19,5 ha. Sur ces deux bassins versants, le socle est constitué d'un granite porphyroïde et les caractéristiques pédologiques sont très similaires (sols de texture grossière, acides et humifères, peu épais). Pour la mesure des précipitations, deux pluviographes sont implantés sur le bassin de la Sapine et un sur le bassin de la Latte. Des seuils bâtis, avec déversoir triangulaire, contrôlent les écoulements à l'exutoire des bassins versants. Les hauteurs d'eau sont enregistrées par des limnigraphes. L'humidité du sol a été mesurée entre septembre 1996 et décembre 1997 sur chaque site par des sondes capacitatives implantées à différentes profondeurs. Une station climatologique voisine (La Vialasse) fournit des mesures d'insolation et de température de l'air. Les mesures de température de l'air sont disponibles depuis 1983. L'évapotranspiration potentielle décadaire est donc calculée par la méthode de L. TURC (1961). Les données journalières nécessaires pour le modèle sont estimées en considérant un taux d'évaporation constant sur chaque décade. Les pluviographes, les limnigraphes, les sondes capacitatives et les capteurs de température de l'air sont équipés depuis 1990 de centrales d'acquisition automatique des données.

Sur le bassin de la Sapine, le hêtre (*Fagus sylvatica*) couvre 80 % de la surface totale. Il constitue une futaie inexploitée depuis plus de 60 ans. Au début de la période d'observation (1981), le bassin de la Latte était aussi un bassin

forestier, l'épicéa (*Picea abies*) et le pin de montagne (*Pinus montana*) couvrant respectivement 85 % et 5 % du bassin versant. La population d'épicéas a été graduellement attaquée par un scarabée, probablement à partir de 1983, année où une sécheresse importante a été observée. La forêt d'épicéas a progressivement déperissé de 1984 à 1987. Après une coupe progressive réalisée durant les étés 1987, 1988 et 1989, de jeunes conifères ont été plantés au cours de l'automne 1989. À cause de la rigueur du climat, la croissance des jeunes arbres est lente et le bassin de la Latte présente encore actuellement la physionomie d'une lande à genêts (les genêts couvrent près de 80 % du bassin et les épicéas 10 %). Ce changement récent d'occupation du sol est particulièrement propice à l'étude de l'impact des forêts sur les écoulements des rivières. Le bassin versant de la Sapine représente le site de référence sans perturbation, alors que des modifications du comportement hydrologique en rapport avec l'évolution de la couverture végétale sont attendues sur le bassin de la Latte.

III - DESCRIPTION DU MODÈLE

Le modèle GRHum (C. LOUMAGNE *et al.*, 1996) est dérivé du modèle pluie-débit journalier conceptuel GR4 (EDIJATNO et C. MICHEL, 1989 ; N. NASCIMENTO et C. MICHEL, 1992)

qui a été testé avec succès sur plus de 300 bassins versants français de différentes caractéristiques (sol, végétation, climat) (EDIJATNO, 1991 ; Z. MAKHLOUF, 1994). Le modèle GR4 est capable de simuler avec une bonne précision les débits à l'exutoire de bassins versants de petites taille, mais il ne restitue pas les niveaux réels d'humidité du sol. Dans le modèle GRHum (Fig. 2), la fonction de production a été modifiée pour introduire un ou plusieurs index d'état hydrique du sol. Le réservoir sol est modélisé comme un système à deux couches : la couche de

surface représente les 10 premiers centimètres de sol et la couche globale représente la zone racinaire et englobe la couche superficielle. Ce modèle a été testé sur deux bassins versants expérimentaux : le bassin versant de l'Orgeval, situé à 70 km à l'est de Paris (C. LOUMAGNE *et al.*, 1996 ; N. CHKIR, 1994), et le bassin de Naizin, situé en Bretagne (A.L. COGNARD-PLANCQ, 1996). Une étude régionale a été menée sur 36 autres bassins versants bretons (C. LOUMAGNE *et al.*, 1996 ; A.L. COGNARD-PLANCQ, 1996).

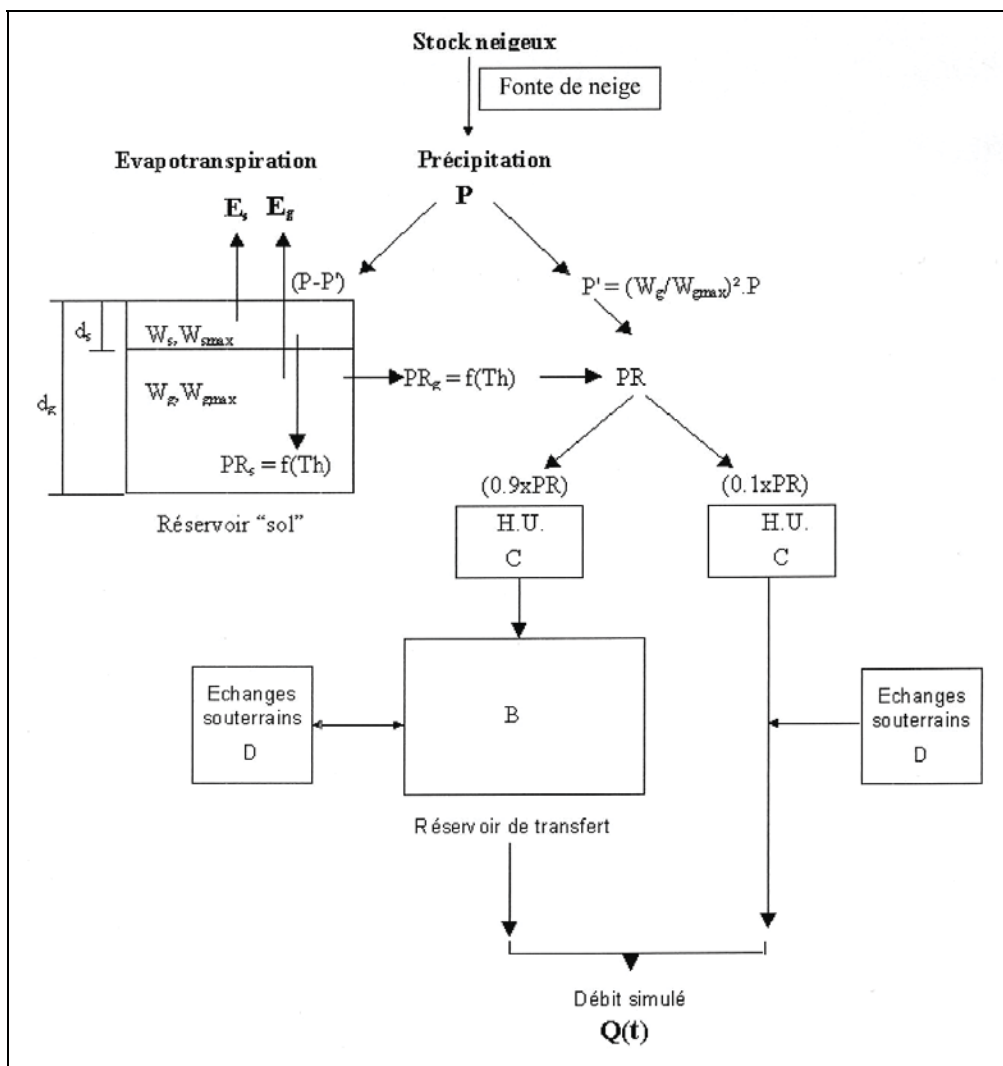


Figure 2 - Structure du modèle GRHum.

En tenant compte du problème observé dans la simulation des crues de printemps dues à des phénomènes de fonte de neige, nous avons implanté dans le modèle un module neige fondé sur le concept développé par S. BERGSTRÖM (dans V.P. SINGH, 1995). Ce module nécessite uniquement des données de température de l'air pour simuler les processus de fonte de neige. Les

précipitations sont supposées s'accumuler sous forme de manteau neigeux quand la température de l'air descend en dessous d'une valeur seuil. Les processus de fonte apparaissent pour des températures supérieures à ce seuil, TT , selon une simple expression basée sur des degrés-jours :

$$\text{FONTE} = C_{\text{fonte}}(T - TT) \quad \text{avec}$$

FONTE : fonte de neige journalière (mm),

C_{fonte} : coefficient de fonte par degré-jour (mm.°C⁻¹),

T : température journalière moyenne de l'air (°C),

TT : seuil sur la température de l'air (°C).

Les précipitations liquides sont tout d'abord scindées en deux parties (P' et P-P') en fonction de l'état hydrique de la couche globale W_g . Une partie (P-P') alimente le réservoir sol et la seconde (P') est acheminée directement vers l'exutoire via une fonction de transfert.

1) Description de la fonction de production

L'évolution de l'état hydrique de chaque couche sol est calculée suivant les équations suivantes :

$$\partial W_s / \partial t = [(P-P') - E_s - PR_s] / d_s$$

$$\partial W_g / \partial t = [(P-P') - E_g - PR_g] / d_g$$

où W représente l'humidité volumique du sol (cm³/cm³), (P-P') est la portion de pluie qui alimente le réservoir sol, E est l'évaporation, PR la lame d'eau écoulée et d l'épaisseur de la couche de sol. Les indices s et g font référence respectivement à la couche de surface et à la couche globale.

Le calcul de la lame d'eau écoulée, effectué à l'aide du modèle de H.A. THOMAS (1981), est discuté dans C. LOUMAGNE *et al.* (1996).

L'évaporation est calculée pour chacune des deux couches de sol en tenant compte des caractéristiques de surface : type de sol, type de végétation et taux de couverture végétale (C. OTTLÉ et D. VIDAL-MADJAR, 1994). L'évapotranspiration de la couche globale est scindée en deux parties, la transpiration de la végétation $E_{\text{vég}}$ et l'évaporation du sol nu E_{sol} , en tenant compte de l'indice de couverture végétale σ_f :

$$E_g = [(1 - \sigma_f) E_{\text{sol}}] + [\sigma_f E_{\text{vég}}] .$$

Pour l'évapotranspiration de la couche de surface E_s , la part de la transpiration de la végétation est limitée par l'état hydrique de la couche de surface et par la distribution verticale du système racinaire. Dans l'équation qui suit, le facteur 0,2 signifie que 20 % du système racinaire est présent dans les dix premiers centimètres de sol :

$$E_s = [(1 - \sigma_f) E_{\text{sol}}] + [(0,2 \sigma_f E_{\text{vég}}) (W_s / W_{\text{smax}})] .$$

L'évolution annuelle de la fraction de couvert végétal doit être définie à l'échelle du bassin versant en tenant compte de l'occupation du sol.

Le calcul de l'évaporation du sol nu, E_{sol} , est fondé sur le concept d'évaporation limite (P.J. WETZEL et J.T. CHANG, 1987 ; J.V. SOARES *et al.*, 1988). Ce concept est appliqué au taux d'évaporation instantané :

$$e_{\text{sol}} = \min(e_{\text{lim}}, \text{etp})$$

$$e_{\text{lim}} = [a \exp(bW_s^2) W_{\text{smax}}] / (W_{\text{smax}} - W_s)$$

où W_s est l'état hydrique de surface (cm³/cm³), W_{smax} est la valeur maximale de W_s , a et b sont deux paramètres, e_{sol} représente le taux d'évaporation du sol exprimé en W/m², e_{lim} et etp sont respectivement les taux d'évaporation limite et potentiel aussi exprimés en W/m². L'expression de e_{sol} est intégrée au pas de temps journalier pour obtenir le terme E_{sol} .

Les valeurs des paramètres a , b et W_{smax} dépendent du type de sol. Des exemples de valeurs peuvent être consultés dans A.L. COGNARD-PLANCQ (1996). En tenant compte de la texture grossière des sols des bassins versants étudiés, nous avons fixé les valeurs de a et b respectivement à 26 et 35 pour une valeur maximale de l'humidité de la couche de surface d'environ 0,5 cm³/cm³.

La transpiration de la végétation $E_{\text{vég}}$ est déduite de l'évapotranspiration potentielle à partir des équations suivantes :

$$E_{\text{vég}} = \beta \text{ETP}$$

$$\beta = 1 - \exp[-12(W_g - W_{\text{flé}}) / W_{\text{gmax}}]$$

$$\text{avec } W_{\text{flé}} = 0,12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3 .$$

La valeur de l'humidité volumique du sol au point de flétrissement $W_{\text{flé}}$ dépend du type de sol et a été fixée en fonction des observations (P. DURAND, 1989).

Trois paramètres liés à la fonction de production doivent être étalonnés : Th , associé au modèle de THOMAS, W_{smax} et W_{gmax} , valeurs maximum des humidités volumiques des deux couches de sol. Il est recommandé de fixer W_{smax} à une valeur réaliste à cause de l'expression empirique de e_{lim} liée à cette valeur. La valeur optimisée pour W_{gmax} peut varier de 0 à 1

cm^3/cm^3 . Mais si l'épaisseur de la couche globale de sol a été judicieusement choisie, la valeur optimisée doit aussi être réaliste. Pour les deux bassins versants (Latte et Sapine), l'épaisseur de la couche globale de sol a été fixée à 0,6 m.

2) La fonction de transfert

La fonction de transfert permet la transformation de la lame d'eau écoulée PR en un hydrogramme à l'exutoire du bassin versant. Dans ce but, on utilise un hydrogramme unitaire pour la fonction retard et un réservoir non linéaire a été choisi pour la fonction de drainage. La durée de l'hydrogramme unitaire C et la valeur maximum de la capacité B de réservoir de transfert doivent être étalonnées. Les échanges de sub-surface sont simulés par une fonction empirique dépendant d'un paramètre D devant lui aussi être étalonné. Comme la fonction de transfert est restée inchangée par rapport au modèle GR4, il est suggéré au lecteur de se référer aux papiers relatifs au modèles GR4 et GRHum pour plus de détails (EDIJATNO et C. MICHEL, 1989 ; N. NASCIMENTO et C. MICHEL, 1992 ; C. LOUMAGNE *et al.*, 1996).

IV - ÉTALONNAGE DU MODÈLE

Le travail de modélisation a été entrepris sur les bassins versants de la Latte et de la Sapine pour lesquels nous avons utilisé la base de données hydrologiques (pluies, débits, évapotranspiration potentielle) sur la période allant de 1983 (début des mesures pour la détermination de l'ETP) à 1997. L'étalonnage du modèle implique le calcul de l'indice de couverture végétale σ_f . L'évolution annuelle de cet indice de couverture végétale a été définie sur chaque bassin versant en tenant compte du couvert végétal réel et des changements d'occupation du sol. Afin de justifier la modification du modèle originel par introduction d'un module de fonte de neige, l'amélioration du calcul des débits apportée par cette modification est démontrée pour la période du printemps 1996. Enfin, la simulation de l'état hydrique du sol est contrôlée par comparaison avec des mesures effectuées durant l'automne 1997.

1) Illustration de l'indice de couverture végétale

Les bassins versants étant de petite taille,

leur occupation du sol est connue en détail. L'évolution de l'indice de couverture végétale durant l'année est donc construite ici à l'échelle du bassin versant à partir des observations de terrain. Nous avons utilisé les pourcentages des différents types de végétation présents sur le bassin versant en combinaison avec l'évolution de chaque type de végétation au cours de l'année, évaluée de façon empirique. Les valeurs empiriques des évolutions annuelles prennent en compte les principaux stades du développement phénologique de la végétation. Aucune variabilité interannuelle marquée n'apparaît, à l'exception de la date du début de la sénescence qui dépend des caractéristiques de l'été précédent.

Nous présentons sur la figure 3 les évolutions annuelles de l'indice de couverture végétale σ_f pour le bassin versant de la Sapine, recouvert principalement de hêtres, et pour le bassin versant de la Latte, avant, pendant et après la coupe forestière.

Pour évaluer les conséquences, sur la modélisation, de cet indice de couverture végétale, qui n'est pas déterminé avec une grande précision, nous avons comparé, sur le bassin de la Latte et durant la période influencée par la coupe (1987-1991), les simulations réalisées avec les trois valeurs obtenues pour ce bassin versant. Aucune influence claire de l'indice n'apparaît sur les simulations des débits. Ce dernier point, constaté avec trois indices contrastés, indique que, dans le cadre de cette étude, l'imprécision sur l'indice de couverture végétale aura des conséquences mineures sur les calculs des débits.

Lorsque la pluie annuelle moyenne est proche de la valeur interannuelle (années 1987 et 1988), l'indice de couverture végétal influence nettement le calcul du taux d'évapotranspiration réel (Tab I). Le taux d'évaporation calculé E_g est plus faible lorsque nous utilisons l'indice de couverture végétale correspondant à la coupe forestière, avec une différence sur le rapport entre les taux d'évapotranspiration réelle et potentielle, E_g/ETP , de -5 % par comparaison avec le rapport correspondant à l'indice de couverture végétale de la forêt d'épicéas et de -7 % avec celui correspondant à la lande. Pour les années sèches, le déficit d'évapotranspiration reste le même quel que soit l'indice de couverture végétale utilisé.

L'indice de couverture végétale exerce aussi une forte influence sur les simulations de l'état hydrique du sol. Avec l'indice de la forêt

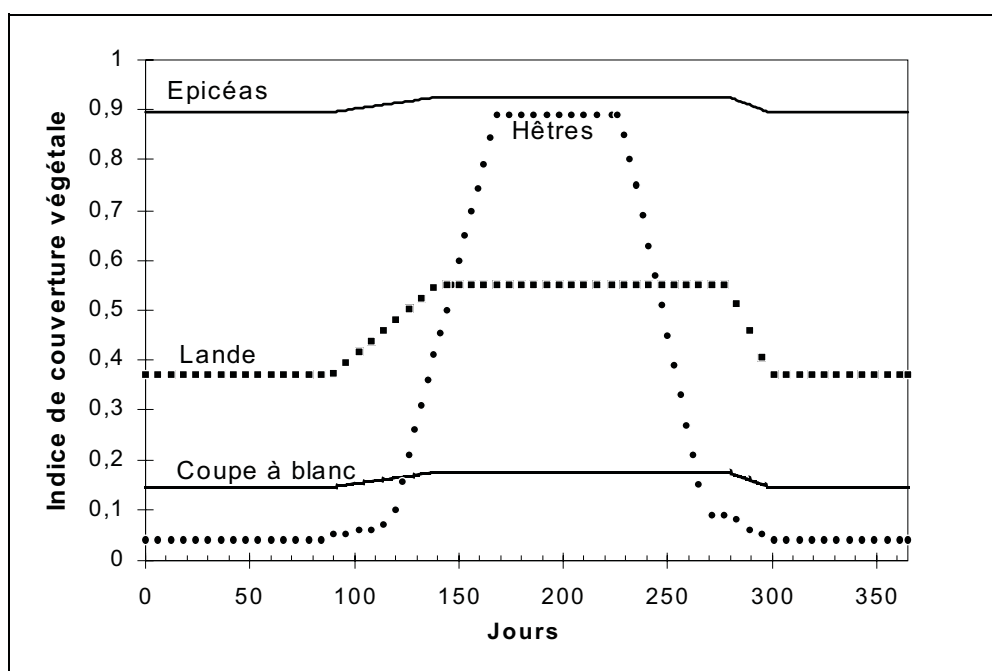


Figure 3 - Évolution au cours de l'année de l'indice de couverture végétale sur les bassins versants de la Sapine et de la Latte.

Tableau I - Ratio à l'échelle annuelle entre l'évapotranspiration réelle calculée par le modèle (E_g) et l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Indice de couverture végétale :	E_g / ETP			ETP (mm)	Précipitations (mm)
	Coupe	Forêt d'épicéas	Lande à genêts		
1987	0,69	0,74	0,76	511	2012
1988	0,74	0,78	0,80	531	2147
1989	0,51	0,50	0,52	596	1386
1990	0,70	0,69	0,70	567	1417
1991	0,64	0,64	0,65	562	1347

d'épicéas, la couche de surface étant protégée de l'évaporation physique grâce au couvert forestier, l'humidité volumique du sol en surface (W_s) reste au-dessus de 30 %, alors qu'elle descend à une valeur minimale d'environ 2 % avec l'indice végétal correspondant à la coupe forestière. Avec l'indice correspondant à la lande, la protection par le couvert végétal subsiste, mais elle est moins forte que pour la forêt. Pour la couche globale du sol, la teneur en eau volumique (W_g) fluctue entre 11 et 29 % pour les trois types d'indices de couverture végétale. Mais, comme cela était attendu, la demande en eau dans la couche globale est plus forte pour la forêt d'épicéas et la lande que pour le couvert végétal subsistant durant la coupe.

2) Performances du modèle

L'étalonnage du modèle implique l'optimisation des valeurs des six paramètres du modèle, c'est à dire la recherche des valeurs pour lesquelles est obtenue la meilleure adéquation entre débits simulés et débits observés. Le calage est basé uniquement sur le critère de NASH N. Trois autres critères sont utilisés pour évaluer les performances du modèle : l'erreur de bilan sur les débits BE, le rapport des pics de crues annuels moyens AFR et le rapport des volumes de crues FR.

Les équations se présentent de la manière suivante :

$$N = 100 \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n (Q_{\text{jobs}} - Q_{\text{jcal}})^2}{\sum_{j=1}^n (Q_{\text{jobs}} - Q_m)^2} \right]$$

$$AFR = 100 \frac{Q_{\text{afcal}}}{Q_{\text{afobs}}}$$

$$BE = 100 \left[\frac{\sum_{j=1}^n (Q_{\text{jobs}} - Q_{\text{jcal}})}{\sum_{j=1}^n Q_{\text{jobs}}} \right]$$

$$FR = 100 \frac{\sum_{j=1}^n Q_{\text{jfcal}}}{\sum_{j=1}^n Q_{\text{jfobs}}}$$

avec : Q_{jobs} : débit journalier observé , Q_{jcal} : débit journalier calculé, Q_m : débit moyen observé, Q_{afcal} et Q_{afobs} : moyenne des pics de crues annuels journaliers respectivement calculés et observés, Q_{jfcal} et Q_{jfobs} : crues journalières respectivement calculées et observées.

Les critères de performance obtenus sur la période d'étude (1983-1997) indiquent que les débits (critère de NASH > 85%), le volume total des écoulements (erreur de bilan BE < 5 %) et les hautes eaux (critère AFR proche de 100 %) sont bien reproduits sur les deux bassins versants (Tab. II). Deux exemples de simulation sont présentés sur les figures 4a et 4b.

3) Méthode d'étalonnage du modèle

Le nombre de paramètres du modèle étant réduit, l'étalonnage du modèle GRHum ne rencontre pas de difficultés majeures, en particulier liées à des optima secondaires. Ce point a déjà été noté précédemment avec le modèle GR4J (N. NASCIMENTO, 1994). La méthode d'optimisation développée dans ce modèle initial a donc été conservée dans le modèle GRHum. L'optimisation est fondée sur la méthode de la plus grande pente. Cette recherche des valeurs optimales des paramètres est réalisée dans un espace de paramètres transformés, dans

le but d'avoir une précision relative approximativement identique pour tous les paramètres, quelles que soient leurs valeurs.

L'initialisation du modèle concerne les niveaux du réservoir sol et du réservoir gravitaire. Pour éviter les erreurs dues aux incertitudes sur l'initialisation de ces niveaux, une période de mise en route, fixée à 365 jours, est utilisée pour chaque période de calage ou de validation.

4) Introduction du module neige

Les figures 5a et 5b présentent la comparaison entre les débits observés sur le bassin versant de la Sapine durant le printemps 1996, et ceux simulés avec et sans l'introduction du module neige. Dans le premier cas, les précipitations neigeuses sont considérées comme liquides et sont directement transférées à l'exutoire du bassin versant, alors qu'elles devraient être stockées. Après l'introduction du module de fonte de neige, les simulations sont très nettement améliorées, bien que les incertitudes de mesure soient plus importantes sur les précipitations neigeuses que sur les pluies.

5) Simulation du contenu hydrique du sol

Le modèle GRHum permet la simulation du contenu hydrique du sol. Pour contrôler ces simulations, l'humidité de la couche globale du sol du sol calculée est comparée aux mesures effectuées sur le bassin versant de la Sapine (Fig. 6) et sur celui de la Latte (Fig. 7). Sur le bassin versant de la Sapine, trois sondes capacitatives situées à 10, 30 et 60 cm sous la surface du sol fournissent des mesures ponctuelles de l'humidité du sol. Sur le bassin de la Latte, les mesures sont obtenues à partir de quatre sondes situées à 15, 30, 50 et 65 centimètres sous la surface du sol. Bien que la simulation soit réalisée à l'échelle du bassin versant, nous notons que les valeurs simulées suivent bien les fluctuations des mesures ponctuelles. La comparaison des deux variables conduit à un coefficient de corrélation de 0,85 pour la Sapine et de 0,61 pour la Latte.

Tableau II - Critères de performance du modèle pour la période 1983-1997.

Bassin versant	Nash (%)	BE (%)	AFR (%)
Latte	86,1	0,7	97,8
Sapine	91,3	0,5	101,2

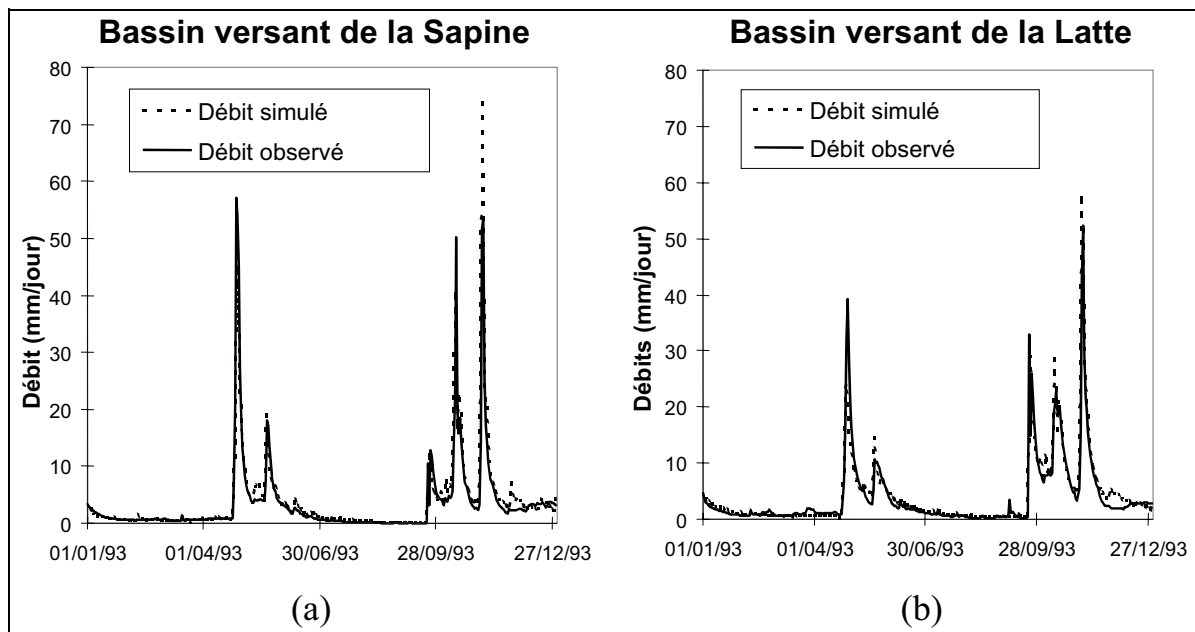


Figure 4 - Comparaison des débits observés et simulés en 1993 pour les bassins versants de la Sapine (a) et de la Latte (b).

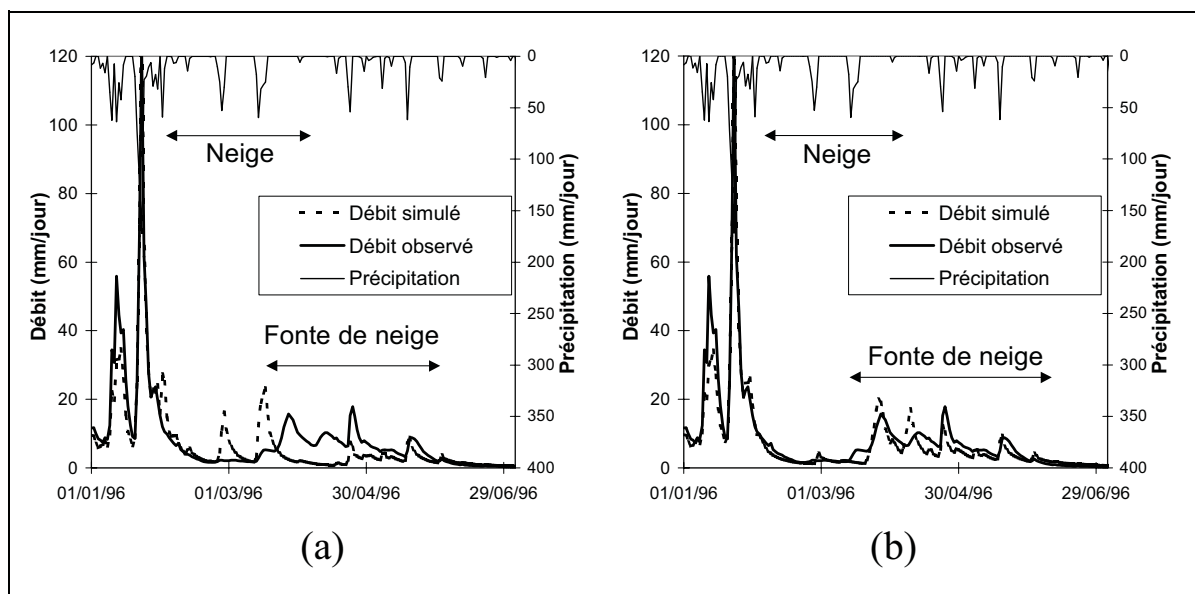


Figure 5 - Débits observés et simulés sur le bassin versant de la Sapine au cours du printemps 1996 avant (a) et après (b) l'introduction du module neige.

V - QUANTIFICATION DE L'IMPACT HYDROLOGIQUE DE LA FORÊT À L'AIDE DU MODÈLE GRHUM

La période d'observation a été scindée en trois en fonction des changements d'occupation du sol sur le bassin versant de la Latte. Durant la première période (Période 1 : 1983-1986), le bassin de La Latte est encore recouvert par la forêt d'épicéas. La seconde période (Période 2 : 1987-1991) correspond à la coupe

forestière et à la colonisation par une végétation caractéristique des landes. Une lande à genêts incluant de petits conifères épars marque la dernière période (Période 3 : 1992-1997). Sur le plan climatique, la première période coïncide avec une succession d'années sèches et humides, alors que les périodes suivantes sont respectivement sèche et humide (Fig. 8). Des précipitations annuelles moyennes de 1808 mm, 1610 mm, 2364 mm ont respectivement été observées sur les périodes 1, 2 et 3.

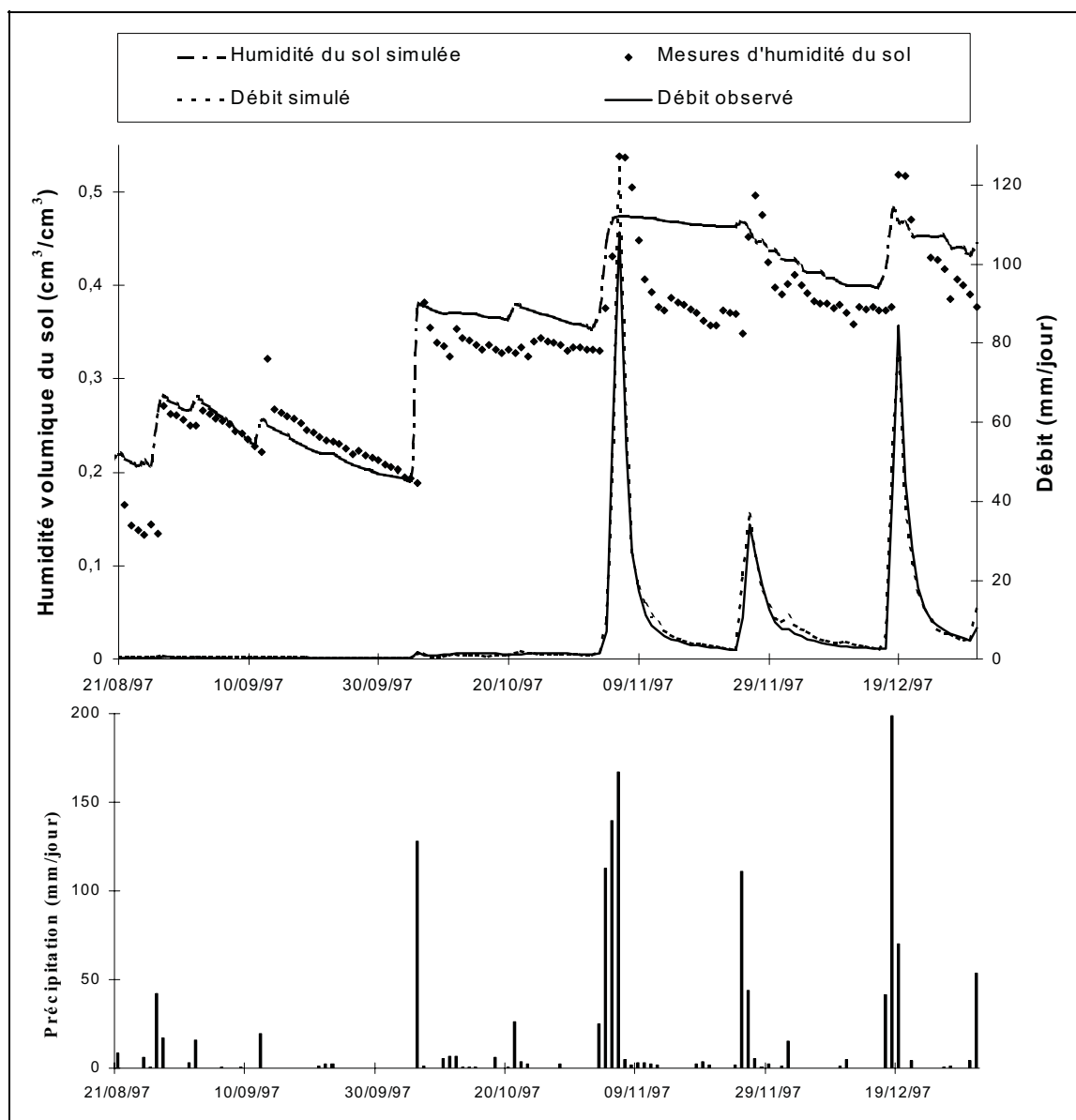


Figure 6 - Évolution des valeurs de l'humidité calculées pour la couche globale du sol et des mesures obtenues par sondes capacitatives sur le bassin versant de la Sapine.

Le tableau III résume, pour les deux bassins, les critères de performance du modèle sur les trois périodes. Avec des valeurs similaires à celles obtenues sur la période d'observation complète (voir Tab. II), le critère de NASH et le critère AFR indiquent que les débits observés sont toujours bien restitués. Les valeurs du critère BE sont plus élevées que les valeurs précédentes, mais restent en dessous du seuil de qualité de 5 %.

Pour le bassin versant de la Sapine, les valeurs des paramètres restent quasiment stables. Pour celui de la Latte, la valeur maximale de l'humidité volumique de la couche globale du sol (W_g) et la capacité maximale du réservoir de

transfert (B) varient significativement entre les trois périodes (Tab. IV).

Pour quantifier l'impact de la coupe forestière sur les écoulements, les jeux de paramètres optimisés sur les périodes 1 et 3 (respectivement pré- et post-coupe) sont utilisés pour simuler les débits pendant la période de la coupe (période 2). Pour le bassin de la Latte, cette approche fournit une estimation de ce qu'auraient été les débits selon deux scénarios. Dans le premier cas (paramètres de la période 1), la coupe n'aurait pas eu lieu et aucun changement n'aurait affecté la forêt d'épicéas. Dans le second cas (paramètres de la période 3), le bassin ayant subi la coupe serait recouvert d'une lande à genêts et de jeunes épicéas (état actuel).

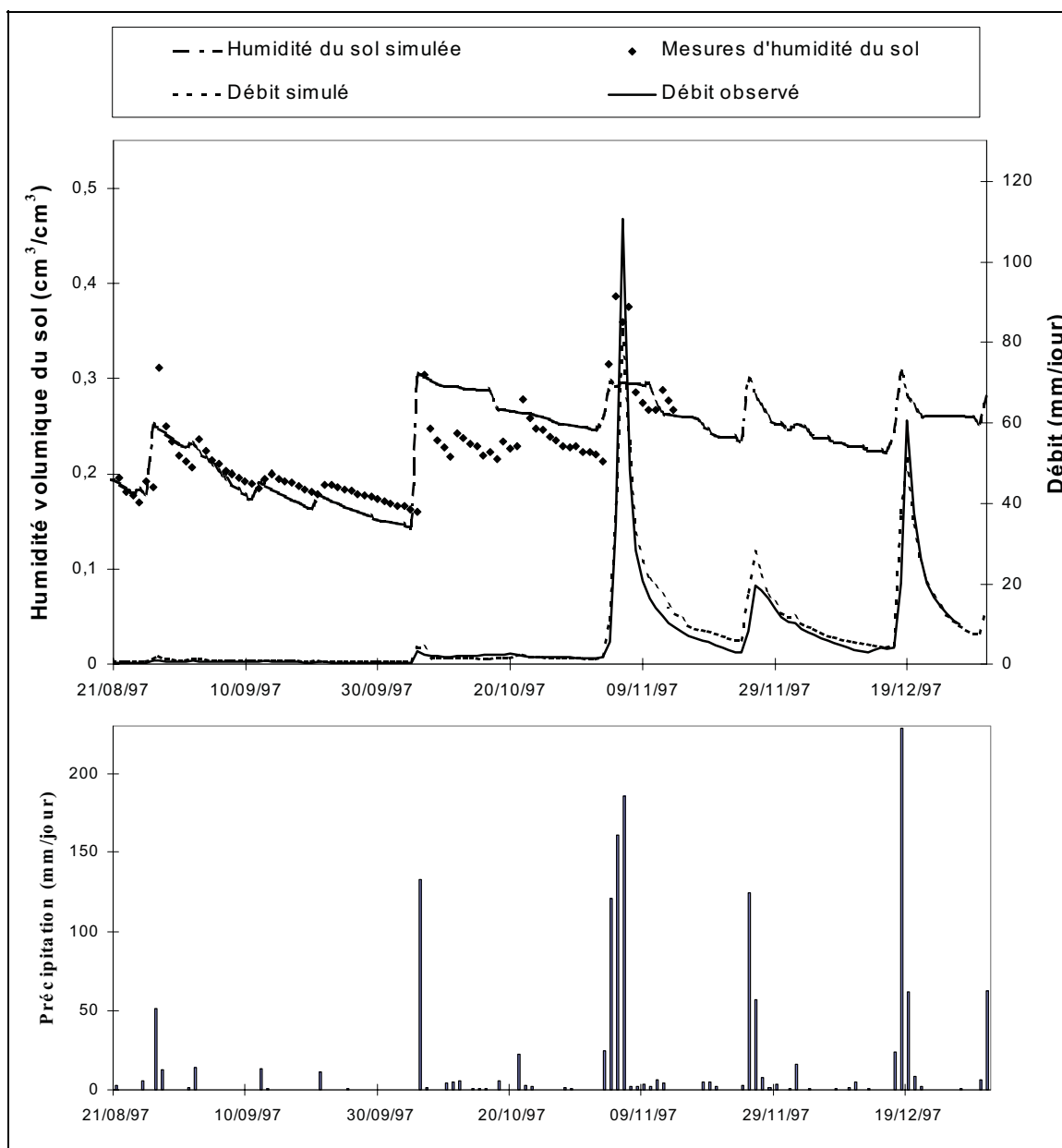


Figure 7 - Évolution des valeurs de l'humidité calculées pour la couche globale du sol et des mesures obtenues par sondes capacitatives sur le bassin versant de la Latte.

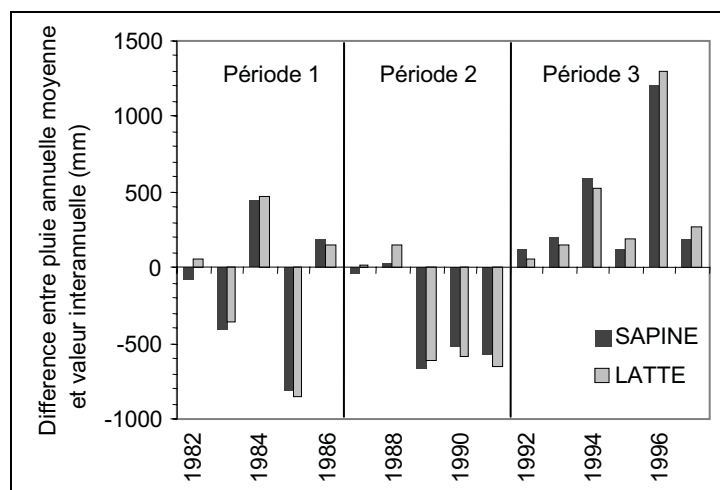


Figure 8 - Évolution des précipitations annuelles (1981-1997).

Tableau III - Critères de performance du modèle pour les périodes 1, 2 et 3.

Bassin versant	Période	Nash (%)	BE (%)	AFR (%)
Latte	1	89,7	1,4	95,8
Latte	2	88,8	4,8	107,3
Latte	3	87,2	1,2	97,1
Sapine	1	93,2	0,8	101,4
Sapine	2	93,1	2,9	90,6
Sapine	3	90,9	-1,0	104,9

Tableau IV - Valeurs optimisées des paramètres pour les périodes 1, 2 et 3.

Bassin versant	Période	W_{smax} (cm^3/cm^3)	W_{gmax} (cm^3/cm^3)	C (jour)	B (mm)	D (mm/jour)	Th
Latte	1	fixé à 0,43	0,40	1,00	659	0,27	0,988
Latte	2	fixé à 0,43	0,29	1,05	498	0,20	0,9985
Latte	3	fixé à 0,43	0,23	1,01	846	0,29	0,983
Sapine	1	fixé à 0,43	0,43	1,05	365	0,20	0,9999
Sapine	2	fixé à 0,43	0,35	1,08	302	0,19	0,99998
Sapine	3	fixé à 0,43	0,50	1,04	344	0,12	0,9955

La même démarche est appliquée au bassin versant de référence (bassin de la Sapine) pour les trois même périodes de simulation, afin d'évaluer la robustesse du modèle. Les paramètres du modèle optimisés sur les périodes 1 et 3 devraient être validés sur la période 2.

a) Résultats pour le bassin de référence – Estimation du biais du modèle

Pour le bassin de la Sapine, les critères de performance du modèle conservent des valeurs acceptables pour les deux validations (Tab. V). L'erreur de bilan est même plus faible dans le cas de la validation des paramètres optimisés sur la période 1, mais cette amélioration provient d'une compensation des erreurs. Les forts débits sont sous-estimés, alors que les faibles débits sont surestimés.

La comparaison des débits observés et calculés (Fig. 9) permet d'évaluer le biais du modèle sur la période 2. Les paramètres optimisés (Fig. 9a) fournissent une très bonne restitution des débits. La ligne de corrélation est quasiment confondue avec la première bissectrice.

L'utilisation des jeux de paramètres optimisés sur les périodes 1 et 3 (Fig. 9b et 9c) conduit à une sous-estimation des écoulements journaliers d'environ 10 %. Ce biais du modèle est principalement dû aux différences climatiques entre la période 2 sèche et les périodes 1 et 3 plus

humides. De ce fait, les jeux de paramètres optimisés sur les périodes 1 et 3 sont influencés par de forts écoulements non observés durant la période de validation.

Les événements de crue des 7 et 8 mars 1991 représentent les débits les plus forts observés durant cette seconde période et correspondent à une période de retour de 5 ans. Bien que ce temps de retour soit modéré, les caractéristiques climatiques de la seconde période de simulation amènent à considérer ces débits comme très élevés par comparaison avec les autres valeurs de débit observées au cours de cette seconde période. En accord avec le biais du modèle, les paramètres optimisés sur une période caractérisée par des écoulements journaliers modérés sont inadaptés à la restitution de ces deux événements de crue. La signification statistique de ces deux points étant discutable, nous avons préféré les exclure des calculs de régression.

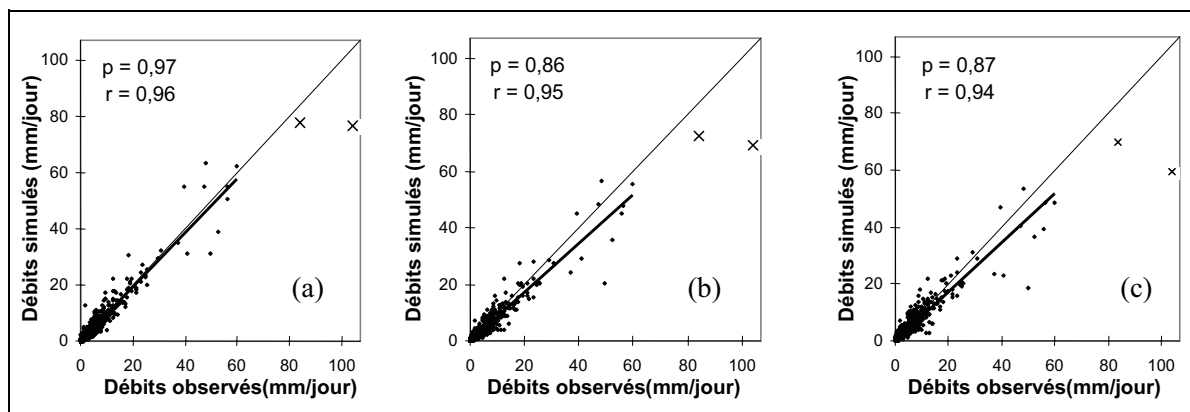
b) Résultats pour le bassin versant expérimental – Estimation des effets de la coupe forestière

Pour le bassin versant de la Latte, lorsque sont utilisés les jeux de paramètres optimisés sur les périodes 1 et 3, la chute des critères de performance est bien plus marquée que pour le bassin de référence (dérive de 10 % du critère de NASH – Tab. V). La corrélation entre les débits observés et calculés obtenue pour le bassin de

Tableau V - Critères de performance du modèle avec les trois jeux de paramètres optimisés.

Bassin versant	Critère	Par. opt. sur la période 2 <i>Étalonnage</i>	Par. opt. sur la période 1	Écart par rapport à l'étalonnage	Par. opt. sur la période 3	Écart par rapport à l'étalonnage
Sapine	Nash	93,1 %	90,3 %	-2,8 %	87,9 %	-5,2 %
	BE	2,9 %	7,9 %	+5,0 %	0,2 %	-2,7 %
	AFR	90,6 %	75,9 %	-14,7 %	72,8 %	-17,8 %
	FR	99,6 %	97,4 %	-2,2 %	91,0 %	-8,6 %
Latte	Nash	88,8 %	77,6 %	-11,2 %	78,7 %	-10,1 %
	BE	4,8 %	15,5 %	+10,7 %	7,7 %	+2,9 %
	AFR	107,3 %	71,5 %	-35,8 %	71,5 %	-35,8 %
	FR	102,2 %	86,7 %	-15,5 %	84,9 %	-17,3 %

Par. opt. : paramètres optimisés.



p : pente de la régression linéaire, r : coefficient de corrélation.

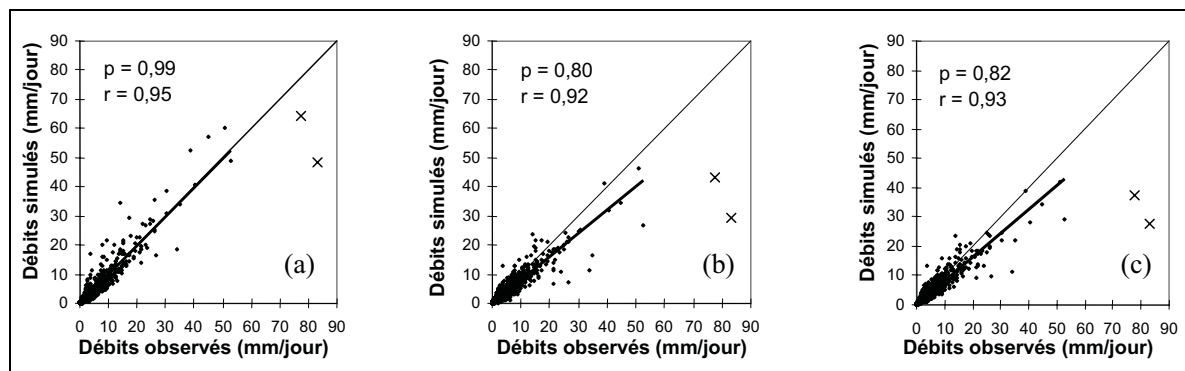
Figure 9 - Corrélation entre les débits observés et simulés pour la période 2 (période de la coupe) sur le bassin versant de la Sapine avec les paramètres optimisés sur : (a) la période 2 (étalonnage du modèle), (b) la période 1 (période pré-coupe), (c) la période 3 (période post-coupe).

la Latte (Fig. 10) est alors comparée à la relation obtenue pour le bassin de la Sapine. Lorsque le jeu optimisé sur la période 2 est utilisé (Fig. 10a), la droite de corrélation et la première bissectrice sont quasiment confondues, ce qui prouve la qualité de la simulation. Comme pour le bassin de la Sapine, l'utilisation des jeux de paramètres optimisés sur les périodes 1 et 3 conduit à une sous-estimation des écoulements (Fig. 10b et 10c). D'après les pentes des deux droites de corrélation (pente de 0,80 et 0,82), cette sous-estimation peut être évaluée à environ 20 % sur l'ensemble de la période de la coupe. La tendance est donc accentuée par rapport au bassin de la Sapine. Si 10 % de la sous-estimation peut être expliquée par le biais du modèle, les dix autres pour cent devraient être liés à l'effet de la coupe.

Les critères de performance du modèle montrent que les effets de la coupe sur les crues sont particulièrement marqués (Tab. V). Pour les deux bassins versants, les jeux de paramètres

obtenus sur les périodes 1 et 3 sous-estiment toujours les crues de la période 2. Toutefois, comme précédemment observé, la tendance est plus nette pour le bassin expérimental de la Latte. Si l'on considère l'évolution du rapport FR (Tab. V), le biais du modèle peut être considéré comme responsable, pour le bassin de référence (Sapine), de 2,2 à 8,6 % de l'écart entre les estimations du volume des crues. Pour le bassin expérimental de la Latte, la sous-estimation des crues atteint des valeurs de 15,5 à 17,7 %. Si le biais du modèle est considéré comme stable entre les deux bassins versants, nous concluons que la coupe forestière a induit une augmentation de 9 à 13 % du volume de hautes eaux.

À cause des caractéristiques climatiques de la période de la coupe, nos résultats ne concernent que des événements de crue modérés correspondant à des périodes de retour inférieures à 3 ans. Il faut aussi noter que les conclusions de notre étude sont fondées sur l'hypothèse que le



p : pente de la régression linéaire, r : coefficient de corrélation.

Figure 10 - Corrélation entre les débits observés et simulés pour la période 2 (période de la coupe) sur le bassin versant de la Latte avec les paramètres optimisés sur : (a) la période 2 (étalonnage du modèle), (b) la période 1 (période pré-coupe), (c) la période 3 (période post-coupe).

biais du modèle, observé et quantifié pour le bassin de référence, s'explique par les conditions climatiques particulières de la période de coupe et qu'il est donc transposable vers le site expérimental. Seule l'utilisation de plusieurs sites de référence pourrait confirmer cette hypothèse.

VI - DISCUSSION

1) Comparaison des résultats avec ceux des études antérieures

Plusieurs autres équipes ont étudié le comportement hydrologique du bassin versant de la Latte. Certains auteurs ont plus spécifiquement étudié les conséquences hydrologiques de la coupe forestière à partir d'investigations comparatives conventionnelles, d'autres ont utilisé des méthodes analytiques statistiques.

Une étude du bilan hydrique annuel sur des bassins versants couplés (Latte et Cloutasses) indique que la coupe sur le bassin versant de la Latte a induit une augmentation de l'écoulement annuel de 150 mm (10 %) durant la période 1987-1990 (C. COSANDEY, 1993). L'étude des processus de genèse des crues a montré que la montée des eaux est toujours rapide et soudaine, ce qui suggère l'existence d'un seuil au-dessus duquel la crue peut apparaître (C. COSANDEY, 1993, 1994). La valeur du seuil semble légèrement décroître durant la période de la coupe. Mais l'auteur ne considère pas cette diminution comme significative comparée aux incertitudes sur l'estimation de la valeur du seuil et sur les mesures de la pluie. L'influence de la coupe est bien plus marquée sur les "petites"

crues, dont le coefficient d'écoulement peut augmenter de 3 à 5 %.

G. GALÉA et D. BARBET (1992) ont aussi étudié l'influence de la déforestation sur les crues du bassin de la Latte avec des méthodes analytiques et statistiques. Leur étude comparative a été réalisée sur des événements de crues observés entre 1981 et 1991 sur les trois bassins versants équipés (Cloutasses, Latte et Sapine). Leurs résultats montrent une augmentation des volumes de crues sur le bassin expérimental à partir de 1987 (début de la coupe). L'amplitude de cette augmentation est comparable à celle mise en évidence avec notre approche. Comme aucune évolution significative de la forme des hydrographes n'a été constatée, G. GALÉA et D. BARBET concluent que la fonction de transfert n'a pas été modifiée mais que la coupe forestière a induit un changement de la fonction de production due à une diminution de la capacité de rétention de bassin versant. L'étude des quantiles de crues a montré que la déforestation sur le bassin de la Latte n'a pas influencé les fréquences d'apparition des débits instantanés, mais a influencé celles des écoulements en 12 et 24 heures. Ce dernier point confirme les résultats obtenus dans le cadre de notre approche par modélisation au pas de temps journalier.

Ces études comparatives passées ont montré que la coupe forestière a induit une augmentation des forts débits sur le bassin versant de la Latte, mais n'ont pas fourni une réelle quantification de ces effets. En fait, la difficulté de ce type d'études comparatives, soulignée par G. GALÉA et D. BARBET (1992) réside dans le fait que les différences d'écoulement entre deux bassins

versants dépendent non seulement de la couverture végétale de chacun des bassins, mais aussi d'autres caractéristiques comme la superficie, la géométrie ou le relief. Notre approche par modélisation semble être une méthode complémentaire qui permet de quantifier les effets de la coupe forestière sur les écoulements du cours d'eau.

2) Limites et avantages de la modélisation hydrologique pour l'étude du rôle de l'occupation du sol

Le principal inconvénient de toute étude utilisant un modèle conceptuel découle de la méthode de calage du modèle. Comme les valeurs des paramètres sont déduites des observations, une longue chronique de mesures des pluies et des débits est indispensable à l'étalonnage du modèle. Pour cette raison, les modèles conceptuels sont pour le moment inadaptés pour prédire des changements d'écoulement suite à une évolution de l'occupation du sol, bien qu'ils soient tout à fait adaptés pour détecter de tels changements (C. PERRIN *et al.*, 2001). Nous avons aussi noté qu'un jeu de paramètres peut être affecté par un biais du modèle dû à des conditions climatiques particulières au cours de la période d'étalonnage.

Malgré ces inconvénients, C. PERRIN *et al.* (2001) résumant clairement les avantages des modèles conceptuels (ou empiriques) globaux. Ces modèles simples sont généralement des outils facilement utilisables, peu demandeurs de données. Ce type de modèles a prouvé son efficacité dans de nombreux cas présentés dans la littérature et est indubitablement utile aux ingénieurs et aux gestionnaires des ressources en eau.

Des modèles physiques ont aussi été utilisés pour étudier l'impact d'une coupe forestière sur les écoulements (P. STORCK *et al.*, 1998 ; B. MATHEUSEN *et al.*, 2000). G. PARKIN *et al.* (1996) notent que, sur une échelle de complexité, les modèles physiques se situent à l'extrême en terme de finesse, à la fois dans la description physique des processus et dans le nombre de paramètres qui doivent être évalués. Cela est donc simultanément perçu comme leur principale force et la principale faiblesse. En effet, ces modèles complexes ne peuvent pas être utilisés facilement dans un contexte opérationnel. De plus, leur précision dépend du degré de détail qui a été introduit dans la description des processus

physiques et dans la description du bassin versant (voir par exemple T. KENWARD *et al.*, 2000). Si l'on considère la complexité des processus concernés et l'hétérogénéité des caractéristiques des bassins versants, les modèles physiques ne peuvent pas être dispensés de toute conceptualisation. Ainsi C.J. BARNES *et al.* (1997) notent-ils que les lois phénoménologiques qui sont les bases de la plupart des modèles physiques ne sont valables qu'à l'échelle du laboratoire. De l'échelle locale à celle du bassin versant, l'hypothèse de continuité n'est généralement pas vérifiée et les paramètres sont parfois déterminés à l'aide de procédures d'optimisation. Le modélisateur est confronté à la difficulté de déterminer les paramètres physiques à l'échelle du bassin versant.

3) Impact hydrologique de la revégétalisation après la coupe forestière

Cette étude a montré que la couverture actuelle du bassin versant de la latte (lande à genêts et jeunes épicéas) aurait le même comportement hydrologique que l'ancienne forêt d'épicéas. Ce résultat pourrait être expliqué par des effets directs de la perturbation anthropique induite par la coupe forestière (extraction mécanique des troncs d'arbres). Le développement naturel d'une végétation nouvelle aurait permis au sol de retrouver rapidement sa structure et ses propriétés hydrodynamiques initiales. Une autre explication pourrait être une rapide colonisation par des espèces de taille moyenne capables de restaurer la transpiration de la forêt à sa valeur initiale. De telles augmentations des débits observées à court terme après des coupes forestières ont aussi été rapportées par d'autres auteurs sous différentes conditions climatiques et pour différentes espèces végétales (B.F. SWINDEL *et al.*, 1982 ; A.P. ALMEIDA *et al.*, 1990 ; J.S. DAVID *et al.*, 1994).

VII - CONCLUSION

Une approche par modélisation a été menée pour souligner le rôle d'une forêt sur les débits au sein d'un bassin versant sub-méditerranéen. Le modèle GRHum a été appliqué aux bassins versants expérimentaux du Mont-Lozère. Dans ce contexte montagneux, il a été nécessaire d'introduire un module neige dans la version initiale du modèle. Les débits simulés avec cette nouvelle version sont en très bon accord avec les

observations. Le modèle restitue aussi correctement l'évolution de l'état hydrique du sol. Ces résultats mettent en évidence la robustesse de ce modèle qui peut être utilisé dans des conditions climatiques et topographiques très différentes.

Toutefois un biais du modèle, expliqué par des différences climatiques marquées entre les trois périodes de simulation, a été mis en évidence sur le bassin de référence où aucun changement de l'occupation du sol n'a eu lieu.

Cette étude souligne le potentiel d'une approche par modélisation pour détecter et quantifier l'impact de la couverture végétale sur le régime hydrologique d'une rivière. A l'aide d'un modèle pluie-débit journalier et conceptuel intégrant le *continuum* sol-végétation-atmosphère comme GRHum, il est possible de simuler les débits et l'état hydrique du sol à partir de différents scénarios de couvertures végétales. Ainsi, l'effet d'une coupe forestière sur le comportement hydrologique d'un bassin versant a été clairement démontré en utilisant, pendant la période de la coupe, les paramètres correspondant aux couvertures végétales pré-coupe (forêt d'épicéas) et actuelle (lande à genêts). Nous notons alors que la forêt aurait réduit les pics de crues journaliers annuels jusqu'à 20% et réduit le volume des crues de 10%. Des résultats similaires ont été obtenus avec les paramètres optimisés durant la troisième période correspondant à la couverture végétale actuelle (végétation herbacée et caractéristique des landes). Cette nouvelle végétation aurait donc un comportement hydrologique similaire à celui de la forêt d'épicéas.

Dans le cas de sites où de longues chroniques de données sont disponibles pour le calage d'un modèle, il s'avère donc qu'un outil de modélisation conceptuelle peut grandement contribuer à l'amélioration des pratiques de gestion courante des ressources en eau.

Remerciements : Ce travail a été soutenu par le projet FOREX "Impact des forêts et des pratiques sylvicoles sur les débits extrêmes des rivières", financé par la communauté européenne. Nous remercions P. ANSART et le personnel du Cemagref, ainsi que J.C. GAUDU de l'INRA, pour leur aide dans la conduite des mesures d'humidité du sol.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARNES C.J., SHORT D.L. et BONELL M. (1997) - Modeling water, nutrient and sediment fluxes using catchment-scale parameters. *IAHS Publ.*, n° 244, p. 195-205.
- ALMEIDA A.P. et RIEKERK H. (1990) - The water balance of Eucalyptus globulus and Quercus suber forest stands in south Portugal. *For. Ecol. Manage.*, vol. 38, p. 55-64.
- CALDER I.R. et NEWSON M.D. (1979) - Land use and upland water resources in Britain - a strategic look. *Wat. Resour. Bull.*, vol. 16, p. 1628-1639.
- CHEN Z.M. et HE M. (1991) - Studies on the utility of forest hydrology using a catchment model. In : *Hydrological interactions between atmosphere, soil and vegetation*, IAHS Publ., n° 204, p. 345-358.
- CHKIR N. (1994) - *Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit*. Thèse École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 327 p.
- COGNARD-PLANCQ A.L. (1996) - *Suivi de l'état hydrique des sols par télédétection spatiale (radar et thermographie infrarouge) et modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant*. Thèse Univ. Paris XI, 135 p. + annexes.
- COSANDEY C. (1993) - Conséquences hydrologiques d'une coupe forestière. Le cas du bassin de la Latte (Mont-Lozère, France). In : *L'Eau, la Terre et les Hommes*, Édit. Presses Univ. Nancy, p. 355-363.
- COSANDEY C. (1994) - Formation des crues "cévenoles" dans des bassins élémentaires du Mont-Lozère. *Rev. Sci. Eau*, vol. 7, p. 377-393.
- DAVID J.S., HENRIQUES M.O., DAVID T.S., TOMÉ J. et LEDGER D.C. (1994) - Clearcutting effects on streamflow in coppiced Eucalyptus Globulus stands in Portugal. *J. Hydrol.*, vol. 162, p. 143-154.
- DUBICKI A. (1994) - Changes in catchment discharge associated with forest dieback in regions of Poland affected by long-range transported air pollutants. *Ecol. Engin.*, vol. 3, n° 3, p. 291-298.
- DUNNE T. et BLACK R.D. (1970) - Partial areas contributing to storm runoff in a small New-

- England watershed. *Water. Resour. Res.*, vol. 5, p. 12-96.
- DURAND D. (1989) - *Biogéochimie comparée de trois écosystèmes (pelouse, hêtraie, pessière) de moyenne montagne granitique (Mont-Lozère, France)*. Thèse Univ. Orléans, 186 p.
- EDIJATNO et MICHEL C. (1989) - Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, vol. 2, p. 113-121.
- EDIJATNO (1991) - *Mise au point d'un modèle élémentaire pluie-débit au pas de temps journalier*. Thèse Univ. Strasbourg, 625 p.
- FAHEY B. et JACKSON R. (1997) - Hydrological impacts of converting native forests and grasslands to pine plantations, South Island, New Zealand. *Agric. For. Meteorol.*, vol. 84, n° 1-2, p. 69-82.
- GALÉA G. et BARBET D. (1992) - Influence de la couverture végétale sur l'hydrologie des crues du BVRE du Mont Lozère. *Hydrol. Continentale*, vol. 1, p. 33-49.
- HEWLETT J.D. et HELVEY J.D. (1970) - Effects of forest clear-felling on the storm hydrograph. *Water. Resour. Res.*, vol. 6, p. 768-782.
- KENWARD T., LETTENMAIER D., WOOD E.F., et FIELDING E. Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. *Rem. Sens. Environ.*, vol. 74, p. 432-444.
- LAVABRE J., SEMPERE TORRES D. et F. CERNESSON (1993) - Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after a wildfire. *J. Hydrol.*, vol. 142, p. 273-299.
- LELONG F., DUPRAZ C., DURAND P. et DIDON J.F. (1990) - Effect of the vegetation upon the biogeochemistry of small watersheds (Mont-Lozère, France). *J. Hydrol.*, vol. 116, p. 125-145.
- LIEBSHER H. (1972) - Results of research on some experimental watersheds in the Upper Harz Mountains. *IAHS Publ.*, p. 150-162.
- LOUMAGNE C., CHKIR N., NORMAND M., OTTLÉ C. et VIDAL-MADJAR D. (1996) - Introduction of the soil-vegetation-atmosphere continuum in a rainfall-runoff model for remote sensing data assimilation. *Hydrol. Sci. J.*, vol. 41, n° 6, p. 889-902.
- LOUMAGNE C., NORMAND M., RIFFARD M., WEISSE A., QUESNEY A., LE HÉGARAT-MASCLE S. et SALEM F. (2001) - Integration of remote sensing data into hydrological models for reservoir management. *Hydrol. Sci. J.*, vol. 46, n° 1, p. 89-102.
- MAKHLOUF Z. (1994) - *Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres*. Thèse Univ. Paris XI, 426 p.
- MATHEUSSEN B., KIRSCHBAUM R.L., GOODMAN I.A., O'DONNELL G.M. et LETTENMAIER D. (2000) - Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River basin (USA and Canada). *Hydrol. Proc.*, vol. 14, n° 5, p. 867-885.
- Mc CULLOCH J.S.G. et ROBINSON M. (1993) - History of forest hydrology. *J. Hydrol.*, vol. 150, p. 189-216.
- NASCIMENTO N. (1994) - *Detection of man-induced changes in the hydrological cycle using an empirical rainfall-runoff model*. Thèse École Nationale des Ponts et Chaussées.
- NASCIMENTO N. et MICHEL C. (1992) - Assessment of modelling uncertainties and measurements errors in hydrology. *4th European J. Scientist Course*, France.
- NASH J.E. et SUTCLIFFE J.V. (1970) - River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. *J. Hydrol.*, vol. 10, p. 282-290.
- OTTLÉ C. et VIDAL-MADJAR D. (1994) - Assimilation of soil moisture inferred from infrared remote sensing in a hydrological model over the HAPEX/MOBILHY region. *J. Hydrol.*, vol. 158, p. 241-264.
- PARKIN G., O'DONNELL G., EWEN J., BATHURST J.C., O'CONNELL P.E. et LAVABRE J. (1996) - Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 2. Case study for a Mediterranean catchment. *J. Hydrol.*, vol. 175, p. 595-613.
- PEIRERA H.C. (1992) - Keynote paper. *10th World Forestry Congress*, Paris, p. 139-150.
- PERRIN C., MICHEL C. et ANDRÉASSIAN V. (2001) - Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J. Hydrol.*, vol. 242, p. 275-301.
- SINGH V.P. (1995) - *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, 1130 p.

- SIRIN A., VOMPERSKY S. et NAZAROV N. (1991) - Influence of forest drainage on runoff: main concepts and examples from central part of the USSR European territory. *Ambio*, vol. 20, n° 7, p. 334-339.
- SOARES J.V., BERNARD R., TACONET O., VIDAL-MADJAR D. et WEIL A. (1988) - Estimation of bare soil evaporation from airborne measurements. *J. Hydrol.*, vol. 99, p. 281-296.
- STORCK P., BOWLING L., WETHERBEE P. et LETTENMAIER D. (1998) - Application of a GIS-based distributed hydrology model for prediction of forest harvest effects on peak stream flow in the Pacific Northwest. *Hydrol. Proc.*, vol. 12, n° 6, p. 889-904.
- SWINDEL B.F., LASSITER C.J. et RIEKERK H. (1982) - Effects of clearcutting and site preparation on water yields from Slash pine forests. *For. Ecol. Manage.*, vol. 4, p. 101-113.
- THOMAS H.A. (1981) - *Improved methods for national water assessments*. US Water Resource Council, Washington.
- TURC L. (1961) - Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. *Ann. Agron.*, vol. 12, n° 1, p. 13-49.
- WETZEL P.J. et CHANG J.T. (1987) - Concerning the relationship between evapotranspiration and soil moisture. *J. Clim. Applic. Meteorol.*, vol. 26, p. 18-27.