

**Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud,
Ecole des Mines de Paris
& Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

**DEA Hydrologie, Hydrogéologie, Géostatistique et Géochimie
Filière Hydrologie et Hydrogéologie Quantitatives**

**Prise en compte des couverts neigeux temporaires au sein d'un
modèle pluie débit**

Auteur : Nicolas ECKERT

Directeurs de recherche :

Claude Michel

Vazken Andréassian

Organisme d'accueil :



**Groupement d'Antony
U.R. Qualité et Fonctionnement
Hydrologique des Systèmes Aquatiques
Parc de Tourvoie, BP 44
92 163 Antony cedex**

Septembre 2002



Résumé

GR4J est un modèle pluie-débit global à pas de temps journalier développé par le Cemagref Antony avec un objectif de parcimonie et une démarche non-réductionniste. Cette étude vise à étendre le champ d'action du modèle aux bassins affectés par des couverts neigeux temporaires sans altérer son potentiel opérationnel. Quatre modules neiges ont été construits et évalués sur soixante-dix bassins versants français, afin de déterminer une structure satisfaisante et respectant la philosophie de GR4J. Il est apparu souhaitable de recourir à une description semi-distribuée pour l'extrapolation des données météorologiques et le suivi de l'évolution du paquet neigeux. Une fonction de production basée sur les degrés-jours a donné des résultats satisfaisants dès lors que les variations d'insolation étaient prises en compte. Mais une formulation plus rudimentaire s'appuyant sur l'énergie disponible sous forme d'ETP s'est montrée tout aussi efficace. La spécificité des couverts temporaires s'est avérée résider d'une part dans la nécessité de compter une partie de la précipitation neigeuse comme de la pluie, et d'autre part dans l'intérêt que représente le routage sans délais de l'eau de fonte jusqu'au réservoir sol.

Trois modules neige ont pu être validés. Ils sont susceptibles de fonctionner correctement sur un grand nombre de bassins en France et dans des régions où règnent des conditions hydroclimatiques similaires. Un gain de un point de Nash peut être espéré, sans risques de disfonctionnement du modèle dans son ensemble. Néanmoins l'amélioration ainsi obtenue est souvent peu apparente sur les hydrogrammes. La neige reste en effet, à l'échelle des bassins versants étudiés, un épiphénomène qui n'influence les écoulements que de façon épisodique. De plus il est souvent hasardeux de chercher à faire le lien entre le fonctionnement du modèle et les phénomènes physiques affectant le paquet neigeux, car il est illusoire d'espérer rendre compte d'un ensemble de processus thermodynamiques complexes avec le formalisme choisi.

Abstract

GR4J is a daily lumped rainfall-runoff model developed at Cemagref in Antony with an objective of parsimony and a non-reductionist approach. The objective of this study is to extend the model applicability to catchments affected by temporary snowcover without spoiling its operational performance. Four snow routines were built and evaluated by systematic simulations on seventy French watersheds, in order to determine an approach both satisfactory and respectful of GR4J's philosophy. It was outlined that a semi-distributed description was needed for extrapolating meteorological data and following snow pack depletion. A degree-day melting routine gave satisfactory results when solar radiation intensity variations were taken into account. A more rudimentary formulation using available potential evapotranspiration energy was also found efficient. Temporary snowcover specificity lies in the necessity to count a part of snow precipitation as rain and in the routing without any delay of the meltwater in the soil store.

Three snow routines were validated. They are likely to match a large number of catchment conditions in France and countries under similar hydroclimatic forcing. These routines will typically provide an improvement of about one percent of Nash criterion, with little risk of damaging the whole model behaviour. Nevertheless it is often moderate and vague. Indeed snow is only an epiphenomenon in the studied catchments and its influence on runoff remains modest. Besides, it is often hazardous to try to find a link between model behaviour and the underlying snowpack physical processes because it appears illusory to think that it is possible to satisfactorily describe complex thermodynamic processes with the chosen formalism.

INTRODUCTION

Différents régimes hydrologiques contraints par le phénomène neigeux sont recensés: Les bassins versants de haute montagne et les bassins versants nordiques sont caractérisés par la présence de couverts neigeux qui persistent tout au long de l'hiver et, lorsque l'altitude est suffisante, de couverts permanents: calottes et glaciers. Le régime d'écoulement est strictement nival avec des basses eaux en hiver et des crues régulières en général bien maîtrisées au moment de la fonte des neiges. Les couverts neigeux temporaires affectent quant à eux de larges zones sous climat tempéré: moyenne montagne et régions à forte influence continentale. Le régime d'écoulement associé est pluvio-nival: de novembre à avril de fréquentes variations de température occasionnent des épisodes successifs d'accumulation et de fonte, tandis que les débits sont assez élevés et extrêmement variables suivant l'état du manteau neigeux. La fonte des couverts temporaires peut avoir pour conséquences des crues nivales ou pluvio-nivales très brusques. Celles-ci sont souvent destructrices car elles surviennent de façon très épisodique, de sorte qu'il n'existe aucune mémoire du risque chez les populations concernées.

La modélisation des bassins versants affectés par les couverts neigeux est problématique. Les accumulations de neige et les retards à l'écoulement qui en résultent sont négligés, de sorte que les sorties des modèles sont biaisées dès lors que la température passe en dessous de zéro degré. Des modèles spécifiques existent. Malheureusement ils ne sont pas bien adaptés aux bassins où la neige est épisodique. De plus, ils demandent une quantité de données si importante qu'ils ne peuvent être considérés que comme des outils de recherche. A l'échelle du bassin versant les modèles pluie-débit sont pourtant incontournables, aussi bien pour la quantification de la ressource en eau que pour la prévision de crue ou la mise en évidence de non-stationarités du comportement hydrologique sous l'effet du changement climatique. L'hydrologie opérationnelle requiert donc le développement d'outils spécifiques appelés communément « modules neiges » à intégrer dans les modèles pluie-débit classiques. On parle alors de modèle précipitation-débit.

Le groupe hydrologie du Cemagref Antony développe depuis une vingtaine d'années une série de modèles pluie-débit pour l'hydrologie opérationnelle: les modèles Génie Rural (GR). Ils appartiennent à la famille des modèles à réservoirs, sont de type conceptuel et ils privilégient une approche parcimonieuse et globale. Le modèle GR4J est le modèle GR le plus universellement utilisable. Au cours des dix dernières années plusieurs essais de prise en compte de la neige dans GR4J ont déjà été réalisés. Cette étude visait à poursuivre dans cette voie de façon à étendre le champ d'action de GR4J aux bassins versants affectés par des couverts temporaires, dans une optique de prévision des crues pluvio-nivales et de gestion de la ressource en eau en zone de moyenne montagne. Pour ce faire un échantillon de bassins versants représentant la variabilité structurale et climatique du territoire français a été choisi et différents modules neiges utilisant des approches variées pour GR4J ont été construits. Des simulations systématiques ont ensuite été effectuées.

Ce rapport présentera succinctement les principaux enjeux et problèmes de la modélisation des paquets neigeux, ainsi que les données et les outils qui ont été utilisés. Les résultats des simulations effectuées seront ensuite exposés. Il sera alors possible de discuter l'efficacité absolue et relative des différentes approches, ainsi que des problèmes spécifiques posés par les couverts temporaires.

Sommaire:

INTRODUCTION.....	2
SOMMAIRE.....	3
CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique.....	4
Modélisation hydrologique et modèles pluie-débit.....	4
Prise en compte de la neige au sein des modèles pluie-débit.....	7
L'approche développée au CEMAGREF : les modèles GR et le modèle GR4J.....	14
CHAPITRE 2 : Présentation des données.....	18
Bassins versants étudiés.....	18
Données météorologiques et hydrométriques.....	21
CHAPITRE 3 : Construction d'un Module Neige pour GR4J.....	22
Méthodologie générale.....	22
Module neige dérivé de Makhlouf.....	22
Module neige dérivé de HBV.....	24
Module neige dérivé de Meslier.....	25
CHAPITRE 4 : Résultats des simulations réalisées.....	26
Fonctionnement initial des différents modules.....	26
Ajustement du module Makhlouf ETP.....	28
Ajustement du module Makhlouf degré.....	34
Ajustement du module HBV.....	39
Ajustement du module Meslier.....	42
CHAPITRE 5 : Discussion.....	45
Efficacité comparée des différents modules.....	45
GR4J et les couverts neigeux.....	46
Spécificité des couverts temporaires.....	49
Fonctionnement du modèle sur un bassin nival.....	50
CONCLUSION et REMERCIEMENTS.....	51
REFERENCES.....	52
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES.....	55
ANNEXES.....	56
Annexe 1 : Description mathématique du modèle GR4J.....	56
Annexe 2 : les modules neige construits.....	59

CHAPITRE 1 : Synthèse bibliographique

I. Modélisation hydrologique et modèles pluie-débit

1. La modélisation pluie-débit

1.1. Définition et structure générale d'un modèle pluie-débit

Un modèle est une représentation simplifiée d'un système complexe. En hydrologie le système étudié est le bassin versant. Les modèles pluie-débit y figurent la transformation de la pluie en débit à des fins scientifiques et/ou opérationnelles.

Tout modèle est caractérisé par ses **variables d'entrée**, sa **structure** (ensemble des compartiments du système étudié et relations qui les lient) et ses **variables de sortie**. Dans le cas d'un modèle pluie-débit, les entrées sont toujours les données de précipitations puis, selon la complexité du modèle, des données d'évapotranspiration potentielle (ETP), de température, de nature des sols, de végétation, de topographie, d'altitude... Le débit à l'exutoire du bassin versant constitue la sortie du modèle qui intéresse l'hydrologue opérationnel. Le modèle est parfois capable d'en produire d'autres: cartes d'humidité des sols, flux de polluants....

Un très important effort de recherche associé à l'accroissement des capacités informatiques a permis le développement au cours des 30 dernières années d'un grand nombre de modèles pluie-débit.

1.2. Intérêts de la modélisation pluie-débit

Connaître le débit des rivières est, c'est une évidence, de première importance pour la gestion de la ressource en eau et la maîtrise du risque hydrologique. La modélisation pluie-débit constitue un substitut efficace à des mesures de débit fastidieuses, quand elles sont possibles.

Les applications des modèles pluie-débit sont multiples : simulations de crues à court terme, prévision d'étiages, prédétermination des crues et dimensionnement d'ouvrages, mise en évidence de la non stationnarité du comportement hydrologique sous l'effet du changement climatique ou de l'évolution de l'occupation du sol.... De plus les modèles pluie-débit permettent d'allonger les délais de prévision par rapport aux modèles débit-débit.

1.3. Les différents types de modèles

On trouve dans la littérature d'innombrables essais de classification des modèles pluie-débit. N'est présenté ici que le strict minimum à la compréhension de la démarche de cette étude.

1.3.1. *Modèle global ou distribué :*

Un modèle est dit **global** lorsque le bassin versant est traité comme un objet unidimensionnel. Dans un modèle **distribué**, au contraire, une grille est superposée au bassin versant et chaque cellule est prise en compte séparément. Il existe dans la littérature une certaine confusion autour du terme **semi-distribué**. Fondamentalement il désigne des modèles qui considèrent un découpage du bassin versant en sous bassins élémentaires. Toutefois il est souvent appliqué à toute fragmentation du bassin versant en sous-unités plus petites, par exemple en bandes d'altitude (Dunn et al. 1998; Fontaine et al. 2002).

1.3.2. *Modèle boîte noire, conceptuel ou physique :*

La structure du modèle est un important critère de classification.

Les **modèles physiques** cherchent à décrire les mécanismes internes du système en se fondant sur une connaissance parfaite du bassin versant (altitude, végétation, nature des sols...) et en

procédant à la résolution numérique des équations différentielles élémentaires: Saint Venant, Darcy, Richards, équations de conservation.... Le modèle SHE (Abbott et al. 1986) vise un tel objectif. De tels modèles sont extrêmement longs à mettre en oeuvre et requièrent une énorme puissance de calcul. De plus, malgré de très nombreux tests, leur supériorité en terme d'efficacité sur des modèles beaucoup moins lourds n'a pas été établie (Beven 1989). Ces modèles sont donc incompatibles avec les impératifs de l'hydrologie opérationnelle et restent pour l'instant des outils de recherche fondamentale.

Les **modèles de type boîte noire** sont globaux. Ils établissent un pur lien mathématique entre variables d'entrée et de sortie. Appartiennent à cette catégorie les modèles linéaires de type ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with eXogeneous inputs, (Salas 1993) et les réseaux de neurones artificiels très utilisés ces dernières années en prévision des débits (Hsu et al. 1995).

Les **modèles conceptuels** ou **modèles à réservoirs** décomposent la transformation pluie-débit en sous processus traités chacun de façon globale. Le bassin versant est représenté par un petit nombre de réservoirs qui se remplissent les uns les autres. Les volumes et les temps de réaction des différents réservoirs sont contrôlés par les paramètres du modèle. Le modèle comprend toujours une fonction de production qui partage la pluie brute en pluie nette plus évapotranspiration et une fonction de transfert qui assure la répartition temporelle de la pluie brute. De nombreux modèles très populaires appartiennent à cette catégorie: HBV (Bergström 1995), IHACRES (Jakeman et al. 1990), TOPMODEL (Beven et Kirkby 1979), UBC (Quick 1995)... C'est pourquoi ce qui suit concernera essentiellement ce type de modèles.

2. Mise en oeuvre du modèle conceptuel

2.1. Principe

L'utilisation d'un modèle conceptuel sur un nouveau bassin versant jaugé nécessite :

- une série de données aussi représentatives que possibles des entrées dans le système ;
- une estimation initiale des paramètres et variables d'état du système ;
- une méthode d'optimisation des paramètres ;
- un contrôle de la qualité de l'ajustement du modèle au système.

2.2. Phase de calage et optimisation des paramètres

L'optimisation des paramètres consiste à déterminer les valeurs qui minimisent une fonction critère préalablement choisie. Celle-ci est souvent la somme des carrés des erreurs entre débit observé et débit simulé sur la période de calage. Notons que de nombreux auteurs préconisent une analyse multicritère (Dunn et Colohan 1999).

2.3. Phase de contrôle :

La phase de contrôle s'effectue sur une période différente de la phase de calage. Le critère de contrôle le plus commun est celui de Nash (Nash et Sutcliffe 1970) dérivé des moindres carrés.

$$CR(\%) = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs,i}})^2} \right]$$

$Q_{obs,i}$ et $Q_{cal,i}$ sont les débits observés et calculés au pas de temps i , $\overline{Q_{obs,i}}$ est la moyenne des débits observés sur la période considérée. Le modèle est parfait pour $CR=100$. Il est supposé être acceptable pour $CR > 70$. Ce critère présente l'inconvénient de donner beaucoup d'importance aux forts débits. Par conséquent, si l'on ne s'intéresse pas spécifiquement aux crues on applique le critère de Nash appliqué aux racines carrées des débits.

2.4. Initialisation et phase de mise en route du modèle

L'initialisation du modèle implique des choix arbitraires et pas forcément judicieux concernant les valeurs des états du système. C'est pourquoi on laisse le modèle tourner durant une durée correspondant à un cycle hydrologique avant de prendre en compte les résultats de la simulation dans le critère de qualité.

3. Principes et problèmes généraux en modélisation pluie-débit

La modélisation pluie-débit est une discipline très conceptuelle. De nombreux auteurs se sont donc attachés à réfléchir sur la façon dont elle devait être abordée et ont ainsi dégagé un certain nombre de principes autour desquels un consensus s'est progressivement installé.

3.1. Efficacité d'un modèle pluie-débit.

Il est très difficile de définir ce qu'est l'efficacité d'un modèle pluie-débit et de l'évaluer de façon satisfaisante (Rango et Martinec 1994; Perrin et al. 2001). Il est généralement admis que l'efficacité d'un modèle consiste uniquement en sa capacité à reproduire les débits mesurés en phase de contrôle, évaluée par le critère de Nash. Cela est justifiable d'un point de vue opérationnel mais moins d'un point de vue scientifique puisque les modèles pluie-débit ont prouvé en de maintes occasions leur capacité à obtenir de bons résultats en attribuant des valeurs physiquement incorrectes aux différents paramètres, voire même à s'accommoder de données d'entrée présentant un biais systématique (Liden et Harlin 2000; Andréassian et al. 2001).

3.2. Robustesse du modèle

Les modèles sont jugés sur leur capacité à fournir en phase de contrôle des résultats assez peu différents des résultats de calage.

3.3. Principe de parcimonie

Les modèles pluie-débit usuels possèdent de deux à plusieurs dizaines de paramètres. De nombreuses études ont récemment établi que la plupart du temps une augmentation du nombre de paramètres ne rendait pas le modèle plus efficace (Perrin 2000) tout en augmentant considérablement les temps de calcul et/ou en rendant le modèle moins opérationnel et surtout moins robuste (Beven 1989). De plus, deux des principaux problèmes de la modélisation hydrologique se trouvent accrus par un grand nombre de paramètres. Le **surcalage** survient lorsque le modèle s'adapte trop spécifiquement à une série temporelle donnée diminuant ainsi ses performances en phase de contrôle. L'**équifinalité** réside dans la capacité du modèle à trouver différents optimums équivalents dans l'espace des paramètres durant la phase de calage (les erreurs sur les différents paramètres se compensent), de sorte qu'il est ensuite impossible de comprendre pourquoi le modèle est performant (Liden et Harlin 2000). De nombreux auteurs pensent donc maintenant qu'il faut chercher à limiter le nombre de paramètres, mais cela reste souvent un vœux pieu.

3.4. Cas des bassins versants non jaugés

Les bassins versants non jaugés constituent un des problèmes critiques de la modélisation hydrologique puisqu'il est impossible de procéder à l'ajustement du modèle par calage/contrôle. Pour utiliser malgré tout des modèles pluie-débit sur ces bassins, un important effort de recherche a été mené : Il est tentant de chercher à attribuer un sous-bassement physique aux différents paramètres de façon à pouvoir les fixer a priori. Cela n'est pas toujours possible, même dans le cas des modèles à réservoirs (Makhlouf 1994). De même une extrapolation régionale des valeurs des paramètres est parfois possible mais reste souvent hasardeuse (Micovic et Quick 1999).

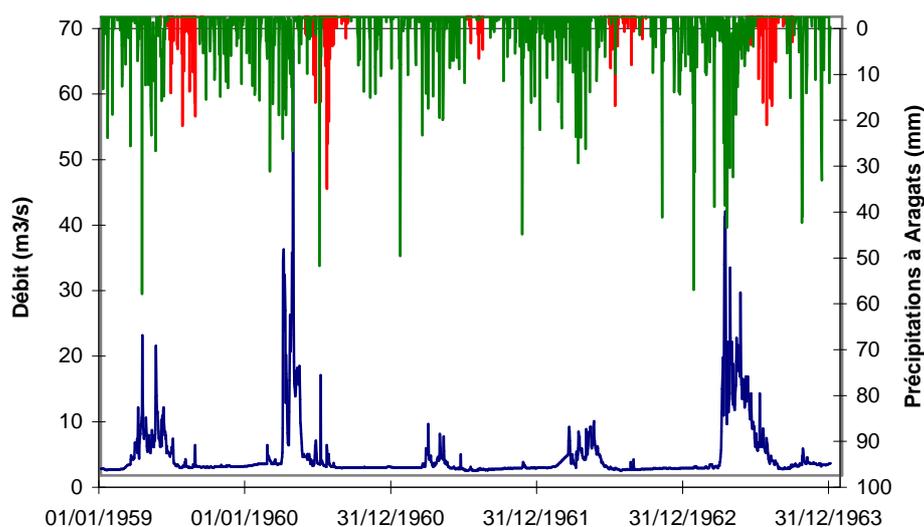
II. Prise en compte de la neige au sein des modèles pluie-débit

1. Les couverts neigeux temporaires :

1.1. Spécificité des couverts neigeux temporaires

Les bassins versants de haute montagne et les bassins versants nordiques sont caractérisés par la présence de couverts neigeux qui persistent tout au long de l'hiver et, lorsque l'altitude est suffisante, de couverts permanents (calottes et glaciers). Durant l'hiver les températures sont suffisamment basses pour que toute la neige qui tombe soit mise en réserve. Le manteau neigeux constitue alors un stock d'eau très important libérée en quelques semaines lors de la fonte printanière, avec des lames d'eau quotidiennes de 15 à 30 mm. Le régime d'écoulement est strictement nival avec des basses eaux en hiver et des crues régulières au moment de la fonte des neiges. Un bel exemple est fourni par la rivière Kassakh à Zovouni, Arménie (cf Figure 1). Le bassin versant concerné mesure 591 km². Il est dominé par le mont Aragats qui culmine à 4090 mètres d'altitude. La rivière Kassakh possède un régime strictement nival avec des hautes eaux d'avril à juin au moment de la fonte des neiges. A la station météorologique d'Aragats, il ne pleut qu'en été (en rouge). Le reste de l'année, il neige.

Figure 1: Débit de la rivière Kassakh à Zovouni

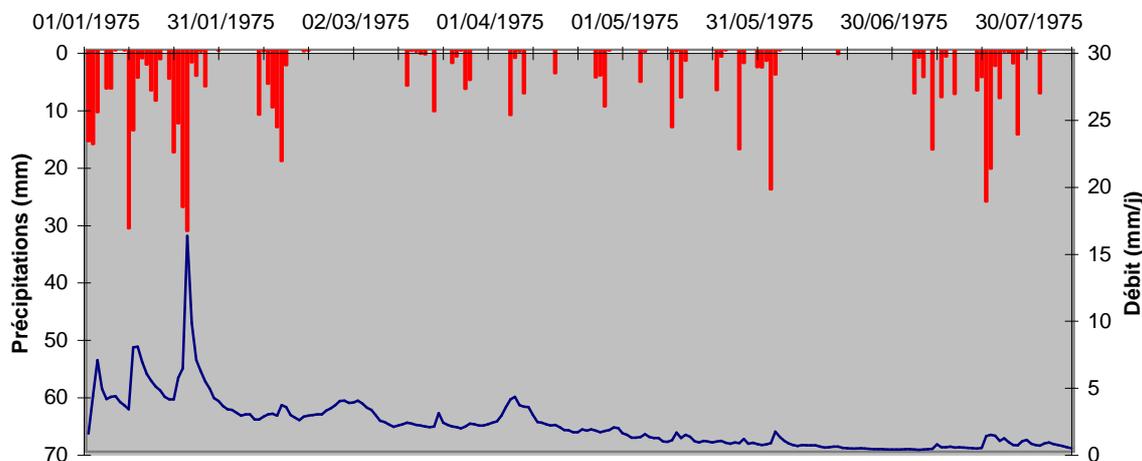


Les couverts neigeux temporaires affectent de larges zones de moyenne montagne sous climat tempéré. En France, sont principalement concernées les régions du centre et du Nord-Est. Le comportement de la couverture neigeuse y revêt durant l'hiver, et dans les tranches d'altitude comprises entre 800 et 1500 m environ, une grande complexité liée essentiellement au balancement fréquent de l'isotherme 0°C. Les épisodes d'accumulation et d'ablation se succèdent, parfois très rapidement, au gré des fluctuations des flux atmosphériques, de sorte que l'estimation globale des volumes de fonte est très délicate. Le régime d'écoulement associé est pluvio-nival : de novembre à mars/avril les débits sont globalement assez élevés mais surtout extrêmement variables suivant l'état du manteau neigeux. On n'observe par contre pas de crue printanière marquée.

Le débit de la Moselotte à Vagnez, Moselle, France en 1975 en est une illustration (cf Figure 2). Il s'agit d'un bassin versant de 187 km² et d'une altitude moyenne de 406 m. Les débits sont très fluctuants durant tout le mois de janvier avec trois épisodes de crue qui correspondent bien aux précipitations observées. Par contre les précipitations importantes de

la mi février ne sont pas traduites immédiatement par une augmentation du débit : il y a mise en réserve de la neige. Celle-ci est relarguée de fin février à mi avril, occasionnant ainsi de faibles montées des eaux alors qu'aucune précipitation n'est enregistrée.

Figure 2: débit de la Moselotte à Vagnez



1.2. L'aléa de crue pluvio-nivale

La fonte des couverts temporaires peut avoir pour conséquences des crues nivales ou pluvio-nivales très brusques. Celles-ci sont souvent destructrices car difficiles à prévoir (elles peuvent survenir à n'importe quel moment de l'hiver) et d'autant plus surprenantes que les bassins ne sont souvent recouverts de neige que tous les 2 ou 3 ans. Elles ont été étudiées dans une optique de prévention et de sécurisation des populations. Les résultats sont pour l'instant assez contradictoires, ce qui ne fait que refléter la complexité du problème : Tashner et al. (2001) mettent par exemple clairement en évidence le rôle de la neige dans une crue importante survenue après des précipitation assez banales sur le bassin de l'Ammer (Préalpes bavaroises). Humbert (1986) montre quant à lui que, contrairement aux idées reçues, les crues à dominantes nivales sont rares et beaucoup plus faibles que les crues à dominantes pluviales sur le bassin de la Fecht (Haut-Rhin). Retenons que s'il est vrai qu'une fonte de neige sans pluie est incapable de générer une crue véritablement destructrice, il n'en reste pas moins que tout volume de fonte nivale se surimpose aux volumes de pluie liquide et est susceptible d'exhausser dans une certaine mesure les volumes écoulés et les débits de pointe.

2. Couverts neigeux temporaires et modèle pluie-débit :

2.1. Le problème des données d'entrée

L'entrée des précipitations neigeuses dans les modèles hydrologiques est un problème extrêmement délicat. D'abord parce que les précipitations neigeuses sont toujours sous-estimées par les pluviomètres. La raison principale serait l'existence de turbulences au voisinage du cône de réception du pluviomètre qui empêchent la neige d'y pénétrer du fait de sa faible densité. Ensuite parce que le phénomène neigeux possède une extrême variabilité spatiale en général très mal prise en compte par les réseaux de mesure : en zone de moyenne montagne les stations sont souvent toutes situées en fond de vallée ou sur quelques sommets et elles sont la plupart du temps très peu nombreuses du fait des difficultés de circulation induites par le relief. L'extrapolation des données à l'échelle du bassin versant est alors hasardeuse. Au final l'ensemble des incertitudes sur la mesure et leur interpolation interdit une évaluation précise des quantités de neige qui entrent dans le système (WMO 1986).

2.2. Quel modèle pour la neige en zone de moyenne montagne ?

Si les modèles pluie-débit classique sont appliqués aux bassins versants de moyenne montagne sans aucun ajustement, leurs résultats évalués par le critère de Nash sont médiocres car les phénomènes d'accumulation/fonte sont négligés (Faye 1995).

Les efforts de recherche se sont focalisés sur des modèles spécifiques aux bassins versants fortement affectés par le phénomène neigeux, par exemple CROCUS (Martin, Lejeune et al. 1996) ou VSAS2 (Barry, Prévost et al. 1990; Prévost, Barry et al. 1990). Ces modèles sont de type physique : ils intègrent l'ensemble des caractéristiques du bassin versant et procèdent à une approche distribuée de la thermodynamique du paquet neigeux. Ils rendent compte de façon satisfaisante des phénomènes différés d'accumulation et d'ablation dans ces bassins mais demandent une quantité de données d'entrée (bilan radiatif complet, données topographiques...) incompatible avec les impératifs de l'hydrologie opérationnelle (Beven 1989). Ils restent donc pour l'instant des outils de recherche, appliqués seulement sur des sites parfaitement connus de type bassin versant de recherche expérimental (Hanson 2001; Seyfried, Hanson et al. 2001; Slaughter, Marks et al. 2001) . On peut même, au-delà de la difficulté de la collecte de données exhaustives, se demander si cela a un sens de développer des modèles supposés totalement réalistes étant donné l'incertitude immense qui entachera toujours l'estimation de la quantité de neige apportée au bassin versant.

L'approche qui apparaît la plus judicieuse est formalisée par Ferguson (1999). Il s'agit de développer des outils spécifiques, appelés communément « modules neige » dans la littérature, à intégrer dans les modèles pluie-débit classiques, de façon à étendre leur champ d'utilisation aux bassins affectés par les couverts temporaires, sans en altérer le potentiel opérationnel. On parle alors de **modèle précipitation-débit**. La plupart des modèles les plus largement utilisés en hydrologie ont ainsi été dotés de modules neige. Voir par exemple Bergström (1975) pour HBV, Beven et Kirby (1979) pour TOPMODEL, Micovic et Quick (1999) pour UBC ou Schreider, Whetton et al. (2002) pour IHACRES. Seul SRM (Martinec 1975, Rango et Martinec 1981, Martinec et al. 1994) allie un large éventail d'utilisations et une structure spécifiquement dédiée au traitement des couverts neigeux.

3. L'intégration de la neige au sein des modèles pluie-débit via un module spécialisé.

3.1. La modélisation du paquet neigeux

3.1.1. Structure d'un module neige :

Ferguson (1999) reconnaît 4 étapes dans le fonctionnement du module neige d'un modèle pluie-débit : Extrapolation des données météorologiques sur l'ensemble du bassin versant, calcul de la fonte ponctuelle, intégration de la fonte sur l'ensemble de la surface enneigée et routage de l'eau de fonte. L'architecture d'un module neige s'articule donc elle aussi autour d'une fonction de production qui génère un certain volume d'eau de fonte à partir du réservoir neigeux et d'une fonction de transfert qui assure le routage de l'eau de fonte à travers la neige résiduelle jusqu'au réservoir sol où elle est ensuite traitée par le modèle comme de l'eau de pluie. Ferguson (1999) note également que les problèmes de modélisation du paquet neigeux rejoignent les problèmes généraux de la modélisation pluie-débit : les questions d'une approche globale ou distribuée, physique ou conceptuelle demeurent, ainsi que les risques liés au surparamétrage, au surcalage et à l'équifinalité.

3.1.2 Module global ou distribué :

A l'échelle du bassin versant les précipitations ne sont pas uniformes. De même le phénomène de fonte est essentiellement contrôlé par l'altitude. Les quantités d'eau de fonte produites

varient en fonction des gradients orographiques de température et de la fraction du bassin versant recouverte par la neige. C'est pourquoi la plupart des modélisateurs estiment qu'il faut renoncer à une approche globale dès lors qu'on est en présence d'une topographie marquée (WMO 1986; Ferguson 1999).

L'approche la plus simple utilisée dans SRM (Martinec 1975) ou SWAT (Fontaine et al 2002) découpe le bassin versant en bandes d'altitudes. HBV combine un découpage en bandes d'altitude avec une division en sous-bassins (Bergström 1975; Lindström et al. 1997). Les modèles les plus récents utilisent une division du bassin versant en cellules, souvent celles d'un modèle numérique de terrain (MNT), l'écoulement se faisant d'une cellule à l'autre selon la direction de plus grande pente. Les modules neige de IHACRES (Schreider et al. 2002) et DIY (Dunn et Colohan 1999) sont construits sur ce principe.

3.1.3 Module physique ou empirique

Notons tout d'abord que la thermodynamique du paquet neigeux constitue une discipline en soi. Le métamorphisme de la neige et ses propriétés physiques complexes et changeantes ont fait l'objet de nombreux travaux (Llamas 1993...) qui dépassent largement le cadre de la modélisation hydrologique. De fait le traitement du manteau neigeux est donc nécessairement au moins ponctuellement conceptuel. Néanmoins deux approches restent possibles : la méthode purement empirique dite des degrés-jours (U.S. Army Corps of Engineers, 1956) et la méthode à fondements plus physiques dite du bilan d'énergie (Anderson 1976).

3.2. L'extrapolation des données météorologiques

L'extrapolation des données météorologiques à partir des mesures ponctuelles dont on dispose constitue la première étape du fonctionnement du module neige.

Elle est basée sur l'application de gradients orographiques de précipitation et de température fixés par l'utilisateur. Les stations météorologiques situées sur le bassin versant mesurent température et précipitations. Le modèle calcule à partir des gradients quelle quantité de précipitation affecte chaque bande d'altitude ainsi que la température moyenne qui y règne. Si plusieurs stations sont utilisées il est en général possible de les pondérer. Il reste alors à déterminer sous quelle forme se produit la précipitation. La température est utilisée comme critère. L'approche la plus rudimentaire, utilisée par exemple dans SRM (Martinec 1975) consiste à fixer un seuil T_0 (qui n'est pas nécessairement 0°C). Pour $T < T_0$ on considère qu'il tombe de la neige, et pour $T > T_0$ qu'il tombe de la pluie. Certains modèles comme HBV (Bergström 1975) sont capables pour T proche de T_0 de considérer différents mélanges pluie/neige. Le module neige de IHACRES (Schreider et al. 2002) va même jusqu'à utiliser une courbe de densité de probabilité de précipitation neigeuse en fonction de la température... Les données d'entrées nécessaires sont donc les précipitations, les températures, la topographie ou au moins l'hypsométrie du bassin versant et la température seuil T_0 .

A ce schéma de base se greffent parfois de petites fonctions auxiliaires. Certains auteurs majorent d'autorité toute précipitation neigeuse afin de tenir compte de la sous-estimation au moment de la mesure (Makhlouf 1994). Dans le cas des modèles distribués basés sur un MNT une pondération peut être introduite en fonction de l'orientation des pentes et d'éventuels gradients spatiaux de température et/ou précipitation. Certains modèles récents font enfin intervenir une fonction de redistribution par le vent. On considère que une fraction F_n de la couverture neigeuse est susceptible d'être remaniée journalièrement par le vent. L'action éolienne déplace cette neige d'une fraction F du bassin à la fraction $1-F$. Les paramètres F et F_n sont à fixer ou caler. Dunn et Colohan (1999) montrent qu'une telle approche n'améliore

pas le critère de Nash mais que les débits de base sont mieux reproduits et que les valeurs des paramètres du modèle ont « davantage de signification physique ».

3.3. La fonction de production

La fonction de production assure le calcul d'une fonte ponctuelle et l'intégration de la quantité d'eau de fonte générée sur la surface du bassin versant. La fonte ponctuelle est calculée soit par bilan d'énergie soit en utilisant la température atmosphérique comme index (méthode empirique des degrés-jours).

3.3.1. Les fonctions de production basées sur la méthode du bilan d'énergie

La méthode dite du bilan d'énergie a été développée au début des années 50 (US Army Corps of Engineers, 1956) et formalisée de façon exhaustive par Anderson (1976). Le modèle du bilan d'énergie ponctuel est basé sur deux équations qui expriment de deux manières différentes le terme ΔQ de variation durant l'intervalle de temps Δt de la quantité de chaleur stockée dans le paquet neigeux : l'échange d'énergie aux interfaces neige/atmosphère et neige/sol rend compte des processus d'accumulation et de fonte qui affectent le manteau neigeux (équation 1) tandis que le transfert de masse et d'énergie à travers la couverture neigeuse s'exprime à partir des profils de température calculés au début et à la fin du pas de temps (équation 2):

$$\Delta Q = Q_n + Q_e + Q_h + Q_p + Q_g \quad (1)$$

$$\Delta Q = e \times r_s \times [(c_i \times T_s)_{t+\Delta t} - (c_i \times T_s)_t] + L_f \times r_w \times (W_{t+\Delta t} - W_t) \quad (2)$$

Q_n est le flux radiatif net intégré sur l'ensemble des longueurs d'ondes, Q_e et Q_h les quantités d'énergie transférées sous forme de chaleur latente et chaleur sensible entre neige et atmosphère, Q_p la chaleur apportée par la pluie et Q_g le terme d'échange avec le sol.

T_s , e et W sont respectivement la température, l'épaisseur et le taux en eau du manteau neigeux, c_i et L_f la capacité calorifique et la chaleur latente de la glace et ρ_s et ρ_w les masses volumiques de la neige et de l'eau.

La résolution numérique du système impose le choix d'une méthode de discrétisation des équations ainsi que l'utilisation de formules empiriques ou semi-empiriques permettant d'estimer de nombreux paramètres comme la conductivité thermique de la neige, le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans la neige ou le coefficient d'atténuation des radiations solaires dans la neige en fonction d'autres grandeurs plus mesurables (température et taille de grain du manteau neigeux...).

La robustesse de cette approche au niveau ponctuel a été démontrée en de nombreuses occasions. Sorteberg et al. (2001) montrent ainsi que les quantités d'eau de fonte prévues par le modèle sont effectivement obtenues en mesurant l'eau qui percole à travers des échantillons de neige norvégienne au lysimètre. Koivusalo et Heikinheimo (1999) arrivent aux mêmes conclusions en Finlande.

L'application de la méthode à l'échelle du bassin versant se révèle moins convaincante. L'utilisation des équations du bilan d'énergie nécessite une grande quantité de données : pression de vapeur, vitesse du vent, valeurs des différents flux radiatifs... et ce à différentes altitudes. C'est donc une méthode très lourde étant donné la difficulté à accéder aux données en zone de montagne. De plus de nombreux essais de comparaison ont été réalisés afin de tenter d'établir la supériorité en terme d'efficacité du bilan d'énergie sur des approches plus empiriques sans résultats réellement probants (Rango et Martinec 1995).

Cette méthode peut toutefois se justifier dans certaines circonstances : Elle a été utilisée avec succès sur de petits bassins montagnards sur lesquels des méthodes plus grossières se révèlent inopérantes. Blöschl et al. (1990) s'en servent ainsi pour l'étude d'un bassin des Alpes

autrichiennes possédant des glaciers de taille modestes et qui présente malgré tout de fréquentes crues pluvio-nivales. Ils montrent que moyennant la collecte d'un important jeu de données comprenant notamment les fluctuations saisonnières de l'altitude de la limite du manteau nival sur les glaciers il est possible de simuler les débits de façon satisfaisante. Kokkonen et al. (2001) montrent également que même si le critère de Nash n'est pas meilleur avec un modèle de bilan d'énergie qu'avec IHACRES, d'autres sorties du modèle comme les hauteurs de neige ou les débits de base sont beaucoup plus réalistes. Il convient enfin de signaler que durant une précipitation pluvieuse ou neigeuse le terme de radiation solaire est négligeable. L'US National Weather Service utilise dans ces conditions un bilan d'énergie simplifié où tous les termes sont indexés sur la température atmosphérique (Bras 1978).

3.3.2. Les fonctions de production basées sur la méthode des degrés-jour

Cette méthode vise à prédire la fonte de la neige à partir de la température atmosphérique uniquement. Elle a été décrite dès les années 30 et a été depuis très largement utilisée (Rango et Martinec 1995). Elle est employée dans la plupart des modules neiges des modèles hydrologiques les plus utilisés comme SRM, HBV, TOPMODEL, IHACRES et repose sur une équation extrêmement simple :

$$F = M \times (T_m - T_o)$$

F est la quantité d'eau de fonte produite journalièrement en mm, T_m la température de l'atmosphère et T_o la température seuil au-dessus de laquelle la fonte se produit. M est le facteur de fonte ou facteur degré/jour en mm par degré Celsius.

Malgré son dépouillement cette équation est encore l'objet de discussions considérables : T_o est souvent mais pas nécessairement fixé à 0° C et ne correspond pas forcément à la température de seuil pluie/neige utilisée pour l'extrapolation des données météorologiques. De même T_m est parfois la température moyenne du jour évaluée par la demi-somme des valeurs extrêmes, parfois la médiane de mesures faites toutes les heures ou toutes les 2 heures, parfois la température maximale du jour.... Mais c'est tout particulièrement la variabilité du facteur de fonte M qui a été le plus abondamment décrite (Martinec et Rango 1986).

Les études qui tentent de démontrer la faiblesse de la méthode considèrent souvent un facteur de fonte qui varie suivant la nature de la surface (sol nu, couvert forestier...) mais est constant durant toute la saison. Cela est incompatible avec l'augmentation de l'insolation au cours du printemps. La méthode des degrés-jour n'est donc robuste qu'avec un facteur de fonte variable (Rango et Martinec 1995). De multiples approches ont été tentées :

WMO (1964) sur la base de nombreuses mesures au lysimètre propose l'emploi des valeurs présentées dans le Tableau 1 (en mm.°C⁻¹.j⁻¹).

Tableau 1 : Facteur de fonte selon WMO

	Couvert forestier	Couvert forestier partiel	Pas de forêt
Avril	2	3	4
Mai	3	4	6
Juin	4	6	7

Anderson (1968) propose de prendre en compte la **variabilité saisonnière** en posant:

$$M = \frac{M_{\max} + M_{\min}}{2} + \sin\left(\frac{2np}{366}\right) \times \left(\frac{M_{\max} - M_{\min}}{2}\right)$$

Où M_{\max} et M_{\min} sont les valeurs saisonnières maximales et minimales du facteur de fonte et n le numéro du jour d'une année commençant le 21 mars. Les valeurs limites présentées dans le Tableau 2 sont proposées (en mm. °C⁻¹.j⁻¹):

Tableau 2 : Valeurs limites pour le facteur de fonte selon Anderson

Couvert forestier	M_{\max}	M_{\min}
Conifères denses	2 à 3,2	0,8 à 1,2
Forêt mixte	3,2 à 4	1 à 1,6
Feuillus dominants	4 à 5,2	1,4 à 2
Pas de forêt	5,2 à 8	2 à 3,6

Des essais d'indexation du facteur de fonte ont également été réalisés afin de pouvoir calculer le facteur de fonte à partir de mesures de densité :

Martinec (1960) propose $M = 11 \times \frac{\rho_s}{\rho_w}$

Kuusisto (1980) suggère plutôt $M = 10,4 \times \frac{\rho_s}{\rho_w} - 0,7$ en zone forestière

et $M = 19,6 \times \frac{\rho_s}{\rho_w} - 10,7$ en zone ouverte.

où ρ_s et ρ_w sont les masses volumiques respectives de la neige et de l'eau.

Depuis son introduction la méthode des degrés-jour a largement fait la preuve de sa robustesse et de la largeur de sa palette d'utilisation, à condition qu'une réflexion préalable sur les valeurs à attribuer au facteur de fonte soit menée (Martinec, Rango et al. 1994). Elle est employée avec succès aussi bien pour la modélisation des couverts temporaires dans le Middle West américain (Kongoli et Bland 2000) que pour l'étude de l'ablation sur les glaciers himalayens (Singh, Kumar et al. 2000) ou la simulation des écoulements dans un bassin de haute montagne de Colombie Britannique (Moore 1993) ou dans un petit bassin arctique (Hinzman and Kane 1991). Dès lors que la fonte ponctuelle est convertie en écoulement, elle donne des résultats aussi valables que la méthode du bilan d'énergie ce qui explique sa popularité en hydrologie opérationnelle. Son seul point faible semble être sa moins bonne fiabilité au niveau ponctuel (par rapport à un calcul par bilan radiatif), attribuable à son manque de fondement physique.

Pour tenter de minimiser ce problème des efforts ont récemment été entrepris afin de coupler la méthode des degrés-jours avec une approche radiative simple. Kustas et Rango (1994) et Brubaker, Rango et al. (1996) proposent:

$$M = M_q \times R + M_r \times (T_m - T_o)$$

avec M_r le facteur de fonte réduit, considéré constant au cours de la saison, R le flux radiatif direct net en [$W.m^{-2}$] et M_q une constante dépendant de la nature du sol en [$mm.j^{-1}.W^{-1}.m^2$]. Les valeurs des flux radiatifs sont mesurées pour les petits bassins versants et évalués à l'aide d'un modèle radiatif simple lorsque les données ne sont pas accessibles. Cette approche a été testée ponctuellement : les valeurs d'eau de fonte ainsi calculées se sont révélées aussi proches des mesures au lysimètre que des valeurs calculées avec un bilan d'énergie complet. Son intégration dans le module neige du SRM a également donné des résultats très satisfaisants en terme de simulation d'écoulements. Oddbjorn et Kilingtveit (2002) ont obtenus des résultats analogues en intégrant un bilan d'énergie simplifié utilisant vitesse du vent, humidité et couverture nuageuse dans HBV.

3.3.3. L'intégration de la fonte ponctuelle sur le bassin versant

Cette étape est déterminante pour la simulation des débits. Elle est également très délicate. Le relief et les gradients orographiques de température et précipitation induisent des différences

spatiales considérables à l'intérieur même du bassin versant en terme d'apport de neige et de vitesse de fonte de la couverture neigeuse. La surface occupée par la couverture neigeuse se réduit progressivement au fur et à mesure que la saison de fonte avance jusqu'à être réduite aux zones les plus élevées et/ou ombragées du bassin versant.

Un modèle peut simuler correctement les taux de fonte ponctuels mais commettre des erreurs considérables sur les valeurs de débit s'il ne tient pas compte des variations d'extension de la couverture neigeuse (Ferguson 1999). Deux approches sont possibles :

De nombreux modèles comme HBV (Bergström 1995; Lindström, Johansson et al. 1997) recourent à une modélisation ponctuelle du paquet neigeux : le modèle simule l'épaisseur de neige mesurée en équivalent en eau sur chaque bande d'altitude ou chaque cellule en fonction des données de précipitation et des taux de fonte. L'extension de la couverture neigeuse est alors la somme des aires qui possèdent un équivalent en eau non-nul. Le modèle en déduit la quantité d'eau de fonte produite à chaque pas de temps.

Quelques modèles comme SRM (Martinec, Rango et al. 1994) ou SWAT (Fontaine, Cruickshank et al. 2002) utilisent une série temporelle d'observations de la couverture neigeuse et des courbes de disparition de la neige. Les données sont acquises par télédétection : imagerie visible et/ou infra-rouge ou Radar. Elles permettent la construction de courbes de correspondance entre superficie de la couverture neigeuse et date, température ou hypsométrie propres au bassin versant. Ces courbes permettent ensuite au modèle de déterminer sur quelle surface doit se faire l'intégration de la fonte ponctuelle.

3.4. Le routage de l'eau de fonte

L'eau de fonte percole rapidement à travers les pores entre les cristaux de neige, à moins d'être retardée par des niveaux de glace. Après avoir rejoint le sol elle se déplace comme de l'eau de pluie. La plupart des modèles considèrent que le temps de transfert de l'eau de fonte à travers le paquet neigeux est suffisamment court pour éviter l'introduction d'un réservoir de routage spécifique à l'eau de fonte. Quelques modèles comme HBV (Lindström et al. 1997) font transiter l'eau de fonte dans un réservoir de routage dont les paramètres sont optimisés durant la phase de calage et qui se vidange dans le réservoir sol.

III. L'approche développée au CEMAGREF : les modèles GR et le modèle GR4J

1. Historique et philosophie des modèles GR

La division hydrologie du Cemagref Antony développe depuis une vingtaine d'années une série de modèles pluie-débit pour l'hydrologie opérationnelle : les modèles GR pour Génie Rural (Edijatno et Michel 1989; Edijatno et al. 1999). Ces modèles appartiennent à la famille des modèles conceptuels à réservoirs. L'approche est globale. Le pas de temps est le plus souvent journalier même si des modèles dérivés à pas de temps mensuel, annuel et interannuel ont été construits (Makhlouf et Michel 1994).

Ces modèles privilégient le principe de parcimonie: la version de base GR3J possède trois paramètres ajustables et aucune version n'en compte plus de cinq.

2. Le modèle GR4J

2.1. Structure du modèle

Le modèle GR4J est le modèle GR le plus largement utilisable. Il s'agit d'un modèle pluie-débit à pas de temps journalier et 4 paramètres ajustables. Les données d'entrée sont

uniquement les précipitations et l'ETP. La version de base (Nascimento 1995) a subi plusieurs modifications (Rakem 1999; Perrin 2000). La plus récente est présentée en Figure 3. Une description mathématique du modèle est proposée en Annexe 1.

La structure du modèle repose sur deux réservoirs : le **réservoir sol S** et le **réservoir de routage R** ainsi que sur **deux hydrogrammes unitaires : SH1 et SH2**. Une **fonction de production** assure la répartition quantitative de l'eau dans le modèle. Une **fonction de transfert** contrôle la répartition temporelle de l'eau alimentant l'écoulement.

2.1.1. Fonction de production

Une **pluie nette P_n** et une **évaporation nette E_n** sont calculées à partir des **précipitations P** et de l'**ETP E** . P_n alimente le réservoir de production (**pluie stockée P_s**) et contribue à l'écoulement (**Pluie routée P_r**). Lorsque toute la pluie est consommée par l'ETP, celle-ci prélève directement **E_s** sur le réservoir de production.

Un **terme de percolation $Perc$** sort du réservoir de production et alimente l'écoulement.

Des **échanges F** se produisent entre le système modélisé et le milieu extérieur.

2.1.2. Fonction de routage

P_s se partage en **Q_1** et **Q_9** . Q_9 est routé par l'hydrogramme unitaire SH2 et alimente le réservoir de routage. Q_1 rejoint l'exutoire après routage par l'hydrogramme unitaire SH1 (**débit Q_d**). La vidange du réservoir R produit le **débit Q_r** qui alimente le débit à l'exutoire.

La somme de Q_d et de Q_r est égale au **débit total Q** du cours d'eau calculé par le modèle.

2.1.3. Calage du modèle

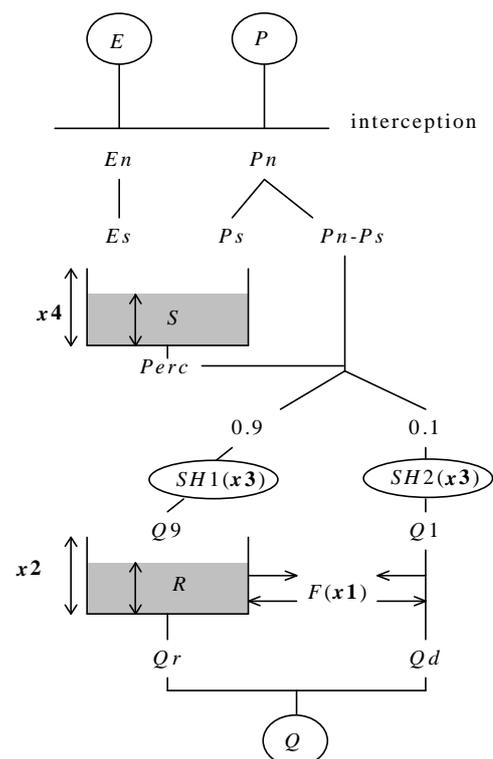
Quatre paramètres sont optimisés : La méthode est dite 'pas à pas' (Edijatno et Michel 1989).

- **x4**: capacité maximale du réservoir de production (fixée à 330 mm dans GR3J d'Edijatno *et al.*, 1999)
- **x2** : capacité maximale du réservoir de routage
- **x3**: durée de l'hydrogramme unitaire
- **x1**: paramètre d'échanges souterrains

2.2. Utilisations du modèle

Le modèle a été largement testé sur un grand nombre de bassins versants en France, en Australie, au Brésil et aux Etats Unis (Perrin et al, 2001) ainsi qu'en Côte d'Ivoire (Servat et Dezetter 1992) et sa relative robustesse a été clairement établie. Des études comparatives ont

Figure 3 : Modèle GR4J version Perrin 2000



montré qu'il pouvait être aussi efficace que des modèles possédant un nombre bien plus important de paramètres ajustables (Perrin et al. 2001).

Le modèle a été utilisé pour la mise en évidence d'effet de changements environnementaux (Nascimento 1995). Il a également été appliqué pour la gestion de barrages-réservoirs (Yang, et al. 1991) et a servi à la mise au point d'une méthode variationnelle de prévision des débits de crue (Yang et Michel 2000).

2.3. Sensibilité du modèle

La sensibilité de GR4J a été assez largement explorée. Il a été établi que le modèle était capable de détecter des modifications de régime hydrologique sur de petits bassins versants. Andréassian et al. (2001) ont montré que le modèle s'améliorait lorsque la densité des données de précipitations augmentait. Ils est également apparu que le modèle était dans une certaine mesure capable de s'accommoder de données présentant un biais systématique. Andréassian et al. (2002) ont par contre fait apparaître que les estimations de débit étaient peu sensibles à la précision des données d'ETP.

La sensibilité aux précipitations neigeuses reste à étudier.

3. L'intégration d'un module Neige dans GR4J

3.1. Contraintes

Doter GR4J d'un module neige performant permettrait d'étendre son champ d'action aux bassins versants affectés par des couverts temporaires et de l'utiliser pour la prévision des crues pluvio-nivales et la gestion de la ressource en eau en zone de moyenne montagne.

Il s'agit de déterminer quelle est la meilleure approche possible à coupler avec la structure existante du modèle. En particulier se pose le problème du respect de la philosophie des modèles GR : parcimonie, approche globale et peu de données d'entrée afin d'être applicables de façon opérationnelle sur le plus grand nombre possible de bassins versants.

Ces contraintes sont lourdes et au vu de la littérature, il n'est pas évident qu'elles soient compatibles avec une prise en compte efficace de la neige. Il semble possible de respecter la parcimonie et le faible volume de données d'entrée caractérisant GR4J en fondant le module neige sur une approche de type degré-jour : on ne rajoute pas de paramètres à caler et seules sont à entrer des données de température et les valeurs du facteur de fonte. La plupart des auteurs insistent en revanche sur la variabilité spatiale induite par les gradients orographiques : il conviendra donc de se demander s'il n'est pas nécessaire de renoncer à une description globale du bassin versant au profit d'une approche semi-distribuée en bandes d'altitude. Des données topographiques ou au moins hypsométriques devront alors être fournies au module.

Au cours des dix dernières années, deux essais notables de prise en compte de la neige dans les modèles GR ont été réalisés au Cemagref

3.2. Une approche très grossière : Makhlof (1994)

3.2.1. Principe :

Makhlof (1994) a tenté d'adapter GR4J à des bassins mosellans affectés par des couverts temporaires. Le bassin versant est découpé statistiquement en 10 zones. Le modèle considère que la discrimination entre neige et pluie est effectuée au moment de la mesure. La précipitation neigeuse est systématiquement majorée. L'extrapolation des données de précipitation est rudimentaire : on considère que la fraction du bassin versant affecté par la neige correspond à la fraction des postes pluviométriques qui enregistrent de la neige. La

fonte de la neige est calculée en fonction de l'énergie disponible sous la forme des données moyennes interannuelles d'ETP.

3.2.2. Résultats obtenus et discussion

Makhlouf (1994) a ainsi réussi à obtenir une légère augmentation du critère de Nash sur les bassins qu'il a étudié, ce qui laisse à penser que cette approche est compatible avec GR4J.

Cette méthode possède deux atouts: Elle majore les précipitations neigeuses de façon à tenir compte des incertitudes sur la mesure et surtout elle n'exige aucune donnée d'entrée supplémentaire par rapport à GR4J, si ce n'est la discrimination des précipitations entre pluie et neige, ce que fait la Météorologie Nationale.

En contrepartie cette approche apparaît comme extrêmement grossière: elle néglige la structure spatiale du bassin versant (notamment sa topographie), elle suppose que les données de précipitations sont tout à fait représentatives et elle ne tient pas compte, puisque les ETP utilisées sont des moyennes interannuelles, des fluctuations climatiques journalières comme les grands froids et les forts redoux qui peuvent causer de brusques variations de débit. Une représentation fine des épisodes d'accumulation et fonte semble donc d'emblée à exclure.

3.3. Une approche librement dérivée des degrés-jour : Meslier (1999)

3.3.1. Principe :

Meslier (1999) a développé un module adapté aux bassins versants des Alpes méridionales, et du Languedoc pour le modèle GR2M, modèle conceptuel à deux paramètres et pas de temps mensuel (Makhlouf et Michel, 1994). La méthode utilisée est dérivée des degrés-jours.

Un modèle régional de correspondance entre température moyenne mensuelle et altitude est utilisé. Il permet d'estimer la température moyenne mensuelle T_{bv} du bassin versant. Une température de seuil pluie/neige T_s est utilisée. En fonction de T_{bv} , de T_s et des données de précipitation le modèle détermine la proportion k de neige qui tombe mensuellement sur le bassin versant : l'approche est donc de type global.

Différentes fonctions de production sont proposées : elles sont de type linéaire ou polynomial en $M \times (T_{bv} - T_s)$ où M est le facteur de fonte. L'originalité de l'approche réside dans l'intervention dans la fonction de production du stock de neige résiduel. Les trois paramètres k , T_0 et M sont à caler. L'eau de fonte produite rejoint ensuite le réservoir sol mais ne subit plus l'ETP.

3.3.2. Résultats obtenus et discussion

Cette approche se révèle concluante en terme de critères de Nash: les écoulements mensuels sur les bassins languedociens sont bien mieux reproduits après l'ajout du module neige. Les meilleurs résultats sont obtenus avec une fonction de production linéaire de type degré-jour et en faisant varier le facteur de fonte au cours de la saison afin de tenir compte de l'augmentation progressive de l'ensoleillement.

Ces résultats sont encourageants : ils montrent qu'une approche globale et parcimonieuse des couverts neigeux est possible. Néanmoins cette méthode n'a prouvé son efficacité qu'au pas de temps mensuel et sa compatibilité avec GR4J reste à étudier.

CHAPITRE 2 : Présentation des données

I. Bassins versants étudiés

1. Critère de choix des bassins

Ce projet vise à adjoindre un module neige à GR4J sans en diminuer le champ d'utilisation. GR4J doit donc fonctionner aussi bien avec ou sans le module neige sur les bassins où la neige est rare. Il doit également rester utilisable sur des bassins présentant des caractéristiques physiques et climatologiques très différentes.

Il est donc apparu nécessaire d'étudier un large échantillon de bassins versants, ceux –ci étant affectés à des degrés très divers par le phénomène neigeux.

2. Localisation

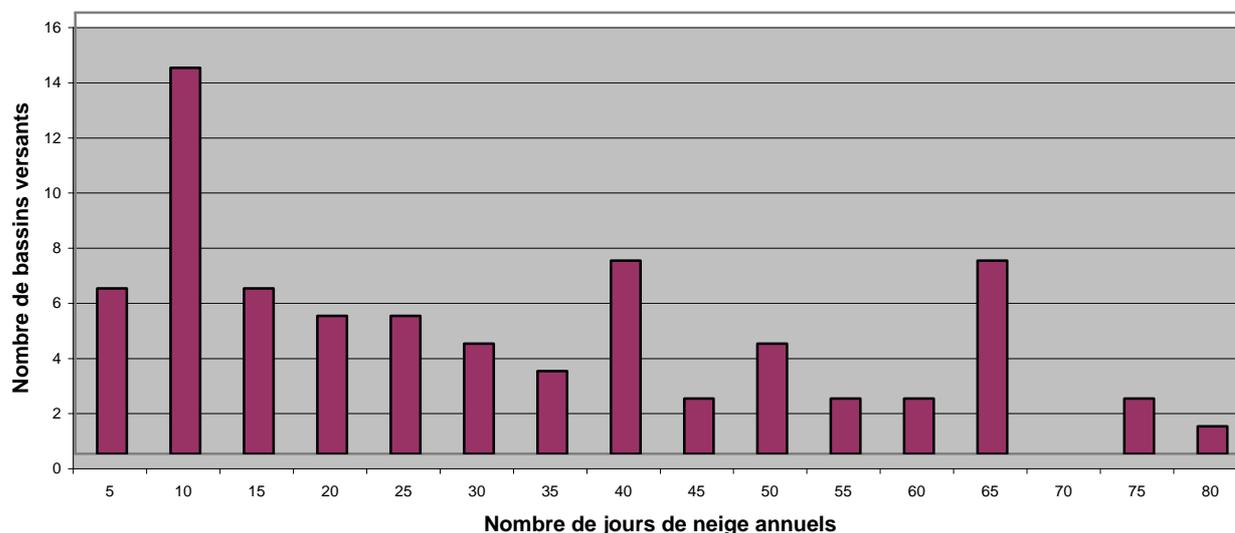
L'étude porte sur 70 bassins versants français de Lorraine, de Bretagne, du Massif Central du Languedoc et du littoral méditerranéen (cf Figure 3). Cet échantillon est censé représenter la variabilité structurale, climatique et lithologique du territoire français.

3. Bassins versants étudiés et précipitation neigeuse

Les pluviomètres discriminent les précipitations qu'ils mesurent en pluie et neige. Météo France considère que le nombre de jour de neige par an sur un bassin versant correspond au nombre de jours où au moins un des pluviomètres du bassin enregistre de la neige.

Dans le cadre de cette convention, les bassins étudiés possèdent de 2 à 80 jours de neige par an. Une distribution est présentée en Figure 4.

Figure 4: Distribution des bassins versants étudiés selon le nombre de jours de neige annuels



4. Données disponibles

En calage comme en contrôle la durée de fonctionnement du modèle a été fixée à 5 ans. Les périodes pour lesquelles suffisamment de données ont été enregistrées sur les bassins versants étudiés sont listées dans le Tableau 3. Les bassins versants étudiés y sont repérés par les codes d'identification des stations hydrométriques.

Figure 5 : Carte de situation géographique des bassins versants et des stations météorologiques et hydrométriques fournissant les données étudiées

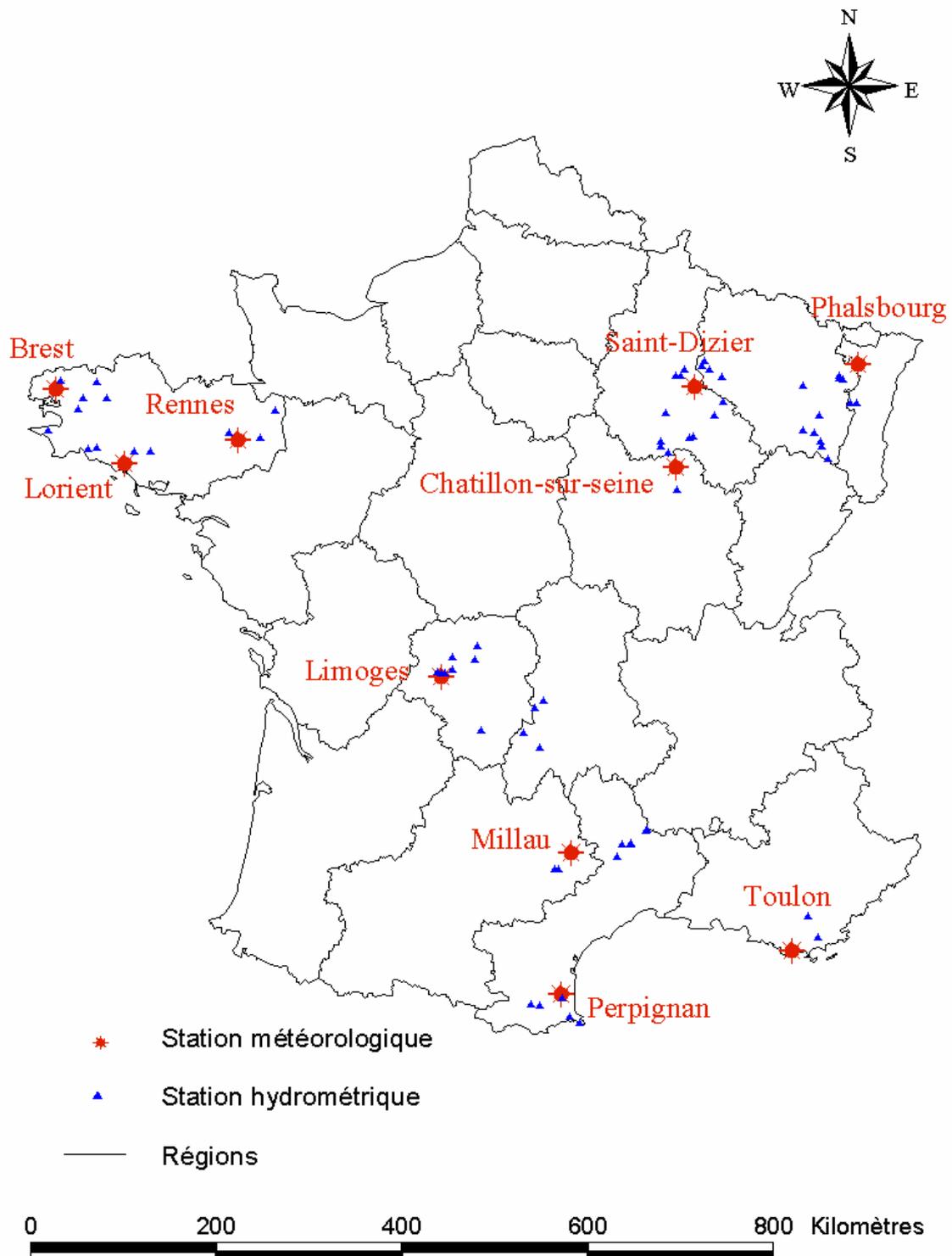


Tableau 3: Liste des stations hydrométriques utilisées

N°	Code station	Station météo	Période 1		Période 2		Période 3		Période 4		Période 5	
1	J2233010	Brest	1973	1978	1978	1983	1983	1987	1987	1990		
2	J2614010	Brest	1972	1977	1977	1981	1981	1985	1985	1989		
3	J3205710	Brest	1979	1984	1984	1990						
4	J3403020	Brest	1983	1986	1986	1989						
5	J3601810	Brest	1974	1979	1979	1983	1983	1987	1987	1990		
6	J3834010	Brest	1967	1972	1972	1977	1977	1981	1981	1986	1986	1990
7	J4014010	Brest	1977	1982	1982	1986	1986	1990				
8	H0100020	Châtillon-sur-Seine	1968	1973	1973	1978	1978	1983				
9	H0203010	Châtillon-sur-Seine	1978	1983	1983	1987						
10	H0210010	Châtillon-sur-Seine	1968	1973	1973	1978	1978	1983				
11	H0400010	Châtillon-sur-Seine	1972	1977	1977	1982	1982	1987				
12	H1051020	Châtillon-sur-Seine	1972	1976	1976	1980	1980	1984				
13	H1122010	Châtillon-sur-Seine	1972	1976	1976	1980	1980	1984				
14	H1231010	Châtillon-sur-Seine	1972	1976	1976	1980	1980	1984				
15	L0244510	Limoges	1967	1973	1973	1979	1979	1985	1985	1990		
16	L0321510	Limoges	1980	1985	1985	1989						
17	L0400610	Limoges	1980	1985	1985	1989						
18	L0614010	Limoges	1965	1971	1971	1977	1977	1982				
19	L0615810	Limoges	1982	1986	1986	1990						
20	L5014110	Limoges	1974	1978	1978	1982						
21	L5114010	Limoges	1965	1970	1970	1974	1974	1978				
22	P0010010	Limoges	1960	1965	1965	1970	1970	1975				
23	P0115020	Limoges	1980	1985	1985	1990						
24	P0874020	Limoges	1965	1967	1967	1969						
25	P0885010	Limoges	1965	1967	1967	1969						
26	P0894010	Limoges	1965	1967	1967	1969						
27	P3464010	Limoges	1965	1969	1971	1976	1976	1981				
28	J4514010	Lorient	1982	1986	1986	1990						
29	J4614010	Lorient	1977	1981	1981	1985	1985	1990				
30	J5613010	Lorient	1970	1976	1976	1982	1982	1988				
31	J5704810	Lorient	1986	1988	1988	1990						
32	O3584610	Millau	1968	1971	1971	1975						
33	O3594010	Millau	1968	1971	1971	1975						
34	V5404020	Millau	1965	1969	1969	1972						
35	V5406010	Millau	1967	1969	1969	1971						
36	V7104010	Millau	1981	1984	1984	1988						
37	V7105210	Millau	1981	1984	1984	1988						
38	V7115010	Millau	1985	1987	1987	1990						
39	Y2002010	Millau	1975	1979	1979	1983						
40	Y0105210	Perpignan	1968	1973	1973	1978	1978	1982	1982	1986	1986	1990
41	Y0115410	Perpignan	1966	1970	1970	1975	1975	1980	1980	1985	1986	1990
42	Y0444010	Perpignan	1980	1985	1985	1990						
43	Y0466010	Perpignan	1973	1977	1977	1981	1981	1985	1985	1990		
44	Y0474030	Perpignan	1973	1977	1977	1981	1981	1985	1985	1990		
45	A2702010	Phalsbourg	1976	1981	1981	1985	1985	1990				
46	A2713710	Phalsbourg	1967	1971	1971	1976						
47	A4020610	Phalsbourg	1971	1975	1975	1979						
48	A4152010	Phalsbourg	1970	1975	1975	1980						
49	A4173010	Phalsbourg	1970	1975	1975	1980						
50	A4250640	Phalsbourg	1971	1975	1975	1980						
51	A4362010	Phalsbourg	1970	1975	1975	1980						
52	A6561110	Phalsbourg	1970	1975	1975	1979						
53	A6621210	Phalsbourg	1973	1974	1974	1976						
54	A9001050	Phalsbourg	1968	1973	1973	1978	1978	1983				
55	A9013050	Phalsbourg	1968	1973	1973	1978	1978	1983				
56	A9021050	Phalsbourg	1968	1973	1973	1978	1978	1983				
57	J0014010	Rennes	1970	1976	1976	1982	1982	1988				
58	J7060620	Rennes	1970	1976	1976	1982	1982	1988				
59	J7373110	Rennes	1972	1977	1977	1983						
60	H5062010	Saint-Dizier	1976	1980	1980	1985						
61	H5102010	Saint-Dizier	1970	1975	1975	1980	1980	1984				
62	H5102020	Saint-Dizier	1974	1978	1978	1981						
63	H5122310	Saint-Dizier	1973	1977	1977	1981	1981	1985				
64	H5123210	Saint-Dizier	1971	1974	1974	1977						
65	H5142610	Saint-Dizier	1975	1980	1980	1985						
66	H5153010	Saint-Dizier	1973	1977	1977	1981	1985	1988				
67	H5172010	Saint-Dizier	1975	1980	1980	1985						
68	H5173110	Saint-Dizier	1973	1977	1977	1981	1985	1988				
69	Y4616220	Toulon	1968	1973	1973	1978						
70	Y5105010	Toulon	1972	1977	1977	1983						

II. Données météorologiques et hydrométriques

1. Précipitations

1.1. Mesure ponctuelle

Les mesures de précipitations utilisées sont issues de la base de données PLUVIO constituée par Météo France. Les mesures de précipitations sont obtenues à l'aide de pluviomètres manuels ou automatiques, ou de pluviographes (qui enregistrent également l'intensité de la pluie). Elles s'expriment en lame d'eau dont l'unité est le [mm], c'est à dire le [$L.m^{-2}$].

La mesure de la précipitation neigeuse est enregistrée en équivalent en eau. Comme nous l'avons signalé précédemment, elle est systématiquement sous-estimée.

1.2. Extrapolation à l'échelle du bassin versant

Le modèle GR4J étant un modèle global à pas de temps journalier, il utilise en entrée une seule donnée de précipitation par jour et par bassin versant. Lorsque plusieurs mesures sont effectuées se pose le problème de savoir quelle entrée doit être choisie. On peut envisager différents types de moyennes, ou encore une combinaison linéaire des différentes valeurs afin d'introduire des pondérateurs... L'optimisation de la distribution des mesures constitue donc un problème en soi. Afin d'aller au plus simple on se tiendra dans un premier temps à une simple moyenne arithmétique des valeurs dont on dispose.

2. Mesures de débit

Les données de débit sont issues de la banque HYDRO gérée par le ministère de l'Environnement. Le débit des cours d'eau est mesuré par les stations hydrométriques installées à l'exutoire des bassins versants étudiés et localisées sur la Figure 3. L'unité du débit est le [$m^3.s^{-1}$] mais il est souvent converti en débit spécifique en divisant par la surface du bassin versant pour se ramener à des [$m.s^{-1}$].

L'instrument de mesure est fréquemment un limnigraphe, appareil mesurant la hauteur d'eau. On passe alors au débit à l'aide d'une courbe de tarage.

3. Températures

Les données de température sont fournies par Météo France. Elles sont mesurées par les stations météorologiques localisées sur la Figure 3. Les extremums journaliers ainsi qu'une température journalière moyenne sont enregistrés.

4. EvapoTranspiration Potentielle (ETP)

L'ETP est la quantité d'eau susceptible d'être prélevée par l'atmosphère dans le réservoir sol, dans l'hypothèse où celui-ci dispose d'un stock suffisant. Elle dépend de l'insolation, de la température, de l'humidité de l'air, de la vitesse du vent.... Il existe une multitude de formules empiriques et semi-empiriques de calcul d'ETP, et définir quelle est la meilleure entrée pour un modèle pluie-débit n'est pas chose aisée (Hervieu, 2001).

Dans le cadre de cette étude nous utiliserons dans un premier temps des valeurs d'ETP moyennes interannuelles estimées à l'aide de la formule de Penman.

CHAPITRE 3 : Construction d'un module neige pour GR4J

I. Méthodologie générale

1. Construction de différents modules neige

Différents modules neiges ont été construits pour GR4J :

- Un module dérivé de l'approche de Makhlouf (1994)
- Un module dérivé du module neige du modèle HBV (Bergström, 1975)
- Un module dérivé de l'approche de Meslier (1999)

Ces trois modules sont conformes aux objectifs définis au chapitre 1 : parcimonie et approche globale ou semi-distribuée très simple.

Le langage de programmation utilisé est le Fortran. Les codes sont présentés en Annexe 2.

2. Réalisation des simulations

Les différents modules sont évalués par des simulations effectuées sur tout ou partie des 70 bassins versants présentés au chapitre 2.

Au cours d'une simulation le modèle tourne successivement sur chaque bassin versant. Pour chaque bassin versant, le calage est effectué tour à tour sur chacune des périodes pour lesquelles des données sont disponibles. Après chaque calage le modèle tourne en contrôle sur toutes les périodes. Ainsi pour les 70 bassins, le programme effectue 170 calages et 520 contrôles.

Afin de rendre compte au mieux des crues aussi bien que des faibles débits, le calage est effectué sur les racines carrées des débits. Le contrôle porte quant à lui sur les débits.

Le programme fournit les valeurs des paramètres du modèle GR4J calculées à chaque calage, ainsi que le critère de Nash obtenu à chaque contrôle, soit 520 valeurs pour les 70 bassins.

3. Evaluation des résultats

Comme un modèle largement utilisable est recherché, **la fonction critère retenue est le critère de Nash moyen en phase de contrôle**. Les distributions des critères de Nash de contrôle sur les 520 couples bassin/période seront néanmoins également examinées.

4. ETP et énergie de fonte.

La fonte de la neige est induite par l'absorption d'une partie du rayonnement visible et infra rouge. Cette énergie n'est donc plus disponible pour agir sur le réservoir sol. Logiquement l'énergie équivalente à l'eau de fonte produite doit donc être soustraite à l'ETP (calculée grâce à la formule de Penman) avant de faire tourner un modèle pluie-débit. Cela n'est pourtant effectué que très rarement. Afin de tester la sensibilité du modèle GR4J à ce problème et de choisir le meilleur module neige possible, il a été décidé d'effectuer systématiquement les deux simulations : avec et sans impact de la fonte sur l'ETP.

II. Module neige dérivé de Makhlouf

1. Principe

Le module est construit conformément à l'approche de Makhlouf présentée au chapitre 1. Il possède quatre paramètres fixes et aucun paramètre à caler. Ce module sera dénommé par la suite **module Makhlouf ETP**.

Une variante dénommée **module Maklouf degré** est également construite : au lieu d'être calculée directement à partir d'une fraction d'ETP, la fonte est estimée par la méthode des degrés-jours exposée au chapitre 1. Dans ce cas il y a également quatre paramètres fixes, dont trois sont identiques à ceux du module Makhlouf ETP et aucun paramètre à caler.

2. Structure et description mathématique du module

2.1. Extrapolation des données météorologiques:

Le bassin versant est découpé en 10 zones, de façon à pouvoir gérer 10 stocks de neige indépendants. La discrimination entre pluie et neige est faite au moment de la mesure. On dispose de $N=N_1+N_2$ mesures. Si N_1 pluviomètres ont reçu de la neige et N_2 de la pluie il est admis que les $\frac{10 \times N_1}{N_1 + N_2}$ premières zones ont reçu de la neige et les suivantes de la pluie.

2.2. Mise en réserve de la neige

Cette opération est effectuée sur toutes les zones où il est supposé neiger.

S'il tombe une hauteur P (mesurée en équivalent en eau) de neige, on considère qu'il tombe en réalité la quantité $X_1 \times P$.

La quantité $X_2 \times P$ est considérée comme de la neige et ajoutée au stock éventuellement présent. La quantité $P \times (X_1 - X_2)$ est considérée comme de la pluie et transite immédiatement jusqu'au réservoir sol de GR4J.

2.3. Calcul de la fonte

Cette opération est effectuée sur toutes les zones où le stock neigeux n'est pas nul.

S'il tombe la hauteur P de pluie sur de la neige, le modèle considère que la quantité $X_3 \times P$ d'eau de fonte est produite grâce à la chaleur apportée par la pluie.

2.3.1. Pour le module Makhlouf ETP

L'ablation due aux échanges avec l'atmosphère égale à $(L_e/L_f) \times X_4 \times \text{ETP}$ où L_e et L_f sont les chaleurs latentes d'évaporation et de fusion de l'eau.

2.3.2. Pour le module Makhlouf degré

L'ablation est calculée avec les degrés jours. Elle est égale à $X_4 \times (T_m - T_o)$ où T_m est la température journalière maximale et T_o la température seuil.

2.4. Routage de l'eau de fonte

L'eau de fonte rejoint ensuite sans délais le réservoir sol. L'utilisateur peut décider si la fraction d'ETP qui est utilisée pour la fonte de la neige agit ou non sur le réservoir sol.

3. Dispositions pratiques

Les premiers essais ont été effectués conformément aux travaux de Makhlouf :

- La majoration X_1 de la précipitation est fixée à 1.5.
- Un tiers seulement de la précipitation est comptée comme neige, le reste entre sans délais dans le modèle GR4J sous forme de pluie, soit $X_2=0.5$
- Lorsque de la pluie tombe sur de la neige, on considère qu'un volume d'eau de fonte équivalent à trente pour cent de la pluie est généré. On fixe donc $X_3=0.3$
- Dans le module Makhlouf ETP, la fonte utilise 40% de l'ETP soit $X_4=0.4$
- Dans le module Makhlouf degré, le facteur de fonte est fixé à $2.1 \text{ mm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1} \cdot \text{j}^{-1}$ soit $X_4=2.1$

III. Module neige dérivé de HBV

1. Principe

Comme HBV est probablement le modèle pluie-débit muni d'un module neige le plus utilisé, il a semblé intéressant de voir comment se comporte GR4J muni d'un module neige analogue. Le module neige de HBV est semi-distribué. Il recourt à une modélisation ponctuelle du paquet neigeux. Les volumes de fonte sont calculés grâce à la méthode des degrés-jours. Deux aspects du module sont caractéristiques :

- Le paquet neigeux constitue un réservoir capable de retenir de l'eau de fonte et induire ainsi des retards à l'écoulement supplémentaires.
- Le phénomène de regel est pris en compte.

Le module neige construit dénommé par la suite **module HBV** respecte cette approche. Il possède 3 paramètres fixes et deux paramètres à caler.

2. Structure et description mathématique du module

2.1. Extrapolation des données météorologiques et mise en réserve de la neige

Il a été décidé d'utiliser la même distribution arbitraire que celle du module de Makhlof : découpage du bassin versant en dix zones et traitement des données météorologiques selon la fraction de pluviomètres enregistrant de la neige.

La précipitation neigeuse est majorée. Dans toutes les zones où il est supposé tomber la quantité P de neige, on ajoute $X1 \times P$ au stock de neige préexistant.

2.2. Calcul de la fonte

Sur toutes les zones où le stock n'est pas nul et lorsque la température est supérieure à une température seuil T_0 , la fonte est calculée à partir des degrés jours.

Elle est égale à $M \times (T_m - T_0)$

Le facteur de fonte M et la température seuil T_0 sont optimisés lors du calage avec la méthode pas à pas.

2.3. Calcul du regel

Lorsque la température est inférieure à la température T_0 , l'eau de fonte est supposée regeler selon l'équation $G = X2 \times M \times (T_0 - T_m)$

où $X2$ est le facteur de regel et G la quantité d'eau mise en réserve sous forme de glace.

2.4. Routage de l'eau de fonte

Un réservoir neige est créé pour l'eau de fonte. Il est censé représenter la porosité du manteau neigeux qui est susceptible d'héberger de l'eau liquide et d'induire ainsi des retards à l'écoulement supplémentaires. La fraction liquide maximale dans le manteau neigeux est égale à $X3$.

Lorsque de l'eau de fonte est produite, elle remplit le réservoir neige jusqu'à le saturer et ne transite vers le réservoir sol qu'ensuite.

3. Dispositions pratiques

Les choix initiaux ont été les suivants :

- La majoration de la précipitation neigeuse est fixée à un tiers : $X1=1.5$
- Le facteur de regel est choisi conformément à la littérature : $X2=0,05$
- La fraction d'eau liquide ne peut excéder 10% du paquet neigeux soit $X3=0.1$

IV. Module Neige dérivé de Meslier

1. Principe

La démarche de Meslier est originale et elle s'est avérée efficace combinée à un des modèles de la famille GR. Il convient donc de tester un module dérivé de ces travaux en association avec GR4J.

Le module ainsi construit sera dénommé par la suite **module Meslier**. Il possède deux paramètres fixes et un paramètre à caler. L'approche est globale : La hauteur de neige est supposée uniforme sur tout le bassin versant.

Le stockage et la fonte de la neige sont proportionnels à la température. Mais contrairement à une approche degré-jours classique la fonte fait également intervenir le stock disponible.

2. Structure et description mathématique du module

2.1. Extrapolation des données météorologiques

La précipitation moyenne **P** sur le bassin versant est calculée à partir des mesures ponctuelles.

La quantité **P_N** de neige disponible sur le bassin est alors calculée selon $P_N = P \times \frac{N1}{N}$ où N1

est le nombre de pluviomètres enregistrant de la neige et N le nombre total de pluviomètres.

La quantité de pluie **P_P** = P - P_N rejoint directement le réservoir sol.

2.2. Stockage de la neige

Lorsque la température maximale journalière **T_m** est inférieure à une température seuil **T_o**, optimisée lors du calage, la fonte est nulle et la neige disponible est mise en réserve.

Un taux de stockage **A** est calculé : $A = \frac{T_o - T_m}{X1}$ où X1 est le coefficient de stockage.

La quantité de neige P_N × A est alors ajoutée au stock préexistant.

2.3. Calcul de la fonte

Lorsque la Température **T_m** est supérieure à **T_o**, une fonte globale est calculée :

On pose $Z = S \times (T_m - T_o)$ où S représente le stock de neige présent sur le bassin.

La fonte est alors égale à $S \times \frac{Z}{Z + X2}$ où X2 est le coefficient de destockage.

2.4. Routage de l'eau de fonte

L'eau qui entre dans GR4J est alors classiquement la somme de la pluie et de l'eau de fonte. Elle transite sans délais vers le réservoir sol.

3. Dispositions pratiques :

Les coefficients X1 et X2 ont été fixés initialement à 6.7 et 360, conformément aux travaux de Meslier (1999).

CHAPITRE 4 : résultats des simulations réalisées

I. Fonctionnement initial des différents modules

1. Fonctionnement sur tous les bassins versants

1.1. Principe

Cette série de simulations est destinée à fournir une première estimation de l'efficacité relative et absolue des différents modules construits. Pour ce faire, on fait tourner le Modèle GR4J sur les soixante dix bassins versants en modifiant à chaque fois le module neige utilisé. La soustraction de l'équivalent énergétique de la fonte est systématiquement testée.

1.2. Résultats

Les résultats de cette série de simulations sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Fonctionnement des différents modules dans leur version initiale.

	Nash moyen	Nash min	Nash max	quantile 0.3
Sans module neige	80,5	10,9	96,5	77,7
Module Makhlouf ETP sans soustraction	80,9	13,2	96,5	77,7
Module Makhlouf ETP avec soustraction	80,9	13,6	96,4	77,7
Module Makhlouf degré sans soustraction	80	13,9	96,3	76
Module Makhlouf degré avec soustraction	79,9	14,3	96,3	75,9
Module HBV sans soustraction	78,4	16,7	96,1	72,8
Module HBV avec soustraction	78,2	18,2	96	72,5
Module Meslier sans soustraction	78	6,4	96,3	74,1
Module Meslier avec soustraction	78,6	6,4	96,3	75,3

1.3. Commentaires

Le modèle semble bien fonctionner sans aucun module neige sur l'échantillon de bassins étudiés puisque le critère de Nash moyen est 80,5 ; ce qui est fort acceptable.

Seul le module Makhlouf ETP apporte un gain d'efficacité à GR4J, mais il est modeste : un demi-point de Nash. Les autres modules neige font baisser le Nash moyen, des ajustements importants sont donc nécessaires.

Les résultats sont sensiblement identiques avec ou sans la soustraction de l'énergie de fonte. La faible sensibilité de GR4J aux entrées d'ETP (Andréassian et al, 2002) semble ainsi ressortir à nouveau.

2. Fonctionnement sur les bassins les plus affectés par la neige

2.1. Principe

Les différents modules neige donnent donc pour l'instant des résultats un peu décevants. Avant de chercher à les améliorer un par un en ajustant leurs paramètres et/ou en modifiant leur structure, il a été jugé pertinent de les faire fonctionner uniquement sur les bassins les plus affectés par les couverts neigeux de façon à mesurer leur sensibilité et leur aptitude à s'en accommoder. En particulier il était intéressant de vérifier si un ou des modules donnant de mauvais résultats sur l'ensemble des bassins pouvaient se révéler performants sur les bassins fortement touchés par le phénomène neigeux. La sous-population retenue correspond aux bassins affectés par la neige **plus de 50 jours par an**.

2.2. Résultats

Les résultats sont présentés dans le Tableau 5. Ils sont à comparer avec ceux du Tableau 4.

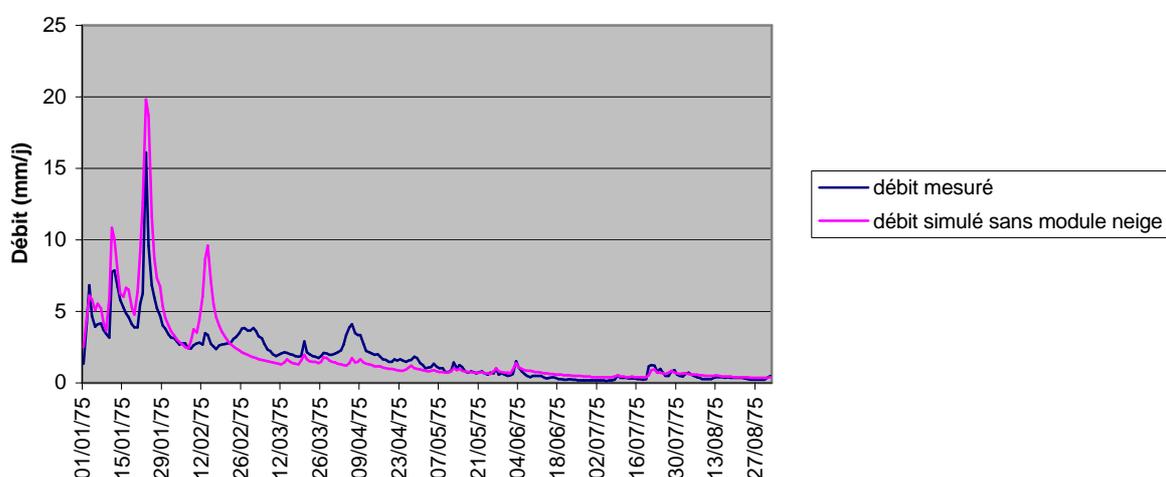
Tableau 5 : Fonctionnement des différents modules sur les bassins les plus enneigés

Bassins à plus de 50 jours de neige/an	Nash moyen	Nash min	Nash max	quantile 0.3
Sans prise en compte	78,6	41,4	90,8	78,5
Méthode Makhlouf ETP sans soustraction	80,9	52,2	90,1	79,4
Méthode Makhlouf ETP avec soustraction	80,9	52,8	90	79,4
Méthode Makhlouf degré sans soustraction	76,6	38,6	89,2	74,6
Méthode Makhlouf degré avec soustraction	76,4	38,2	89,1	74,6
Méthode HBV sans soustraction	66,2	48,8	83,5	59,5
Méthode HBV avec soustraction	65,2	47,2	83,2	59
Méthode Meslier sans soustraction	72,7	33,1	88,2	73,4
Méthode Meslier avec soustraction	77,3	47,5	89,6	76,2

2.3. Commentaires

D'emblée il apparaît que le Nash moyen sans aucun module neige n'est plus que de 78.6. Cette baisse significative de 2 points suggère que la modélisation pluie-débit est effectivement perturbée par le phénomène neigeux. On peut le vérifier en étudiant les hydrogrammes correspondants. Un bon exemple est fourni par le bassin de la Moselotte présenté au chapitre 1 (cf. Figure 6). GR4J s'accommode bien des épisodes de crues pluviales et des étiages. Mais comme il ne permet pas le stockage de la neige, il simule une « fausse crue » à la mi-février et ne prévoit pas le soutient du débit par le relargage de la neige stockée au courant du mois de mars.

Figure 6: Débit de la moselotte à Vagnez (2)



D'autres renseignements précieux sur l'efficacité des différents modules sont obtenus :

Le module Makhlouf ETP paraît efficace : il apporte un gain de Nash de 2,3 points et permet de retrouver l'efficacité obtenue sur les 70 bassins versants. La soustraction de la fonte semble ne jouer aucun rôle.

Le module Makhlouf degré donne des résultats inférieurs. Un important travail d'ajustement semble nécessaire. Peut-être faut-il également songer à modifier la structure du code de façon à faire varier le facteur de fonte au cours de la saison, ainsi que le suggère la littérature.

Le module HBV, qui pourtant donne d'excellents résultats sur les bassins nordiques très enneigés associé au modèle HBV, est extrêmement décevant. Il fait chuter le critère de Nash de 12 points ! Le problème du surcalage est une piste pour expliquer ces mauvaises

performances. Peut-être aussi ce modèle n'est-il pas du tout adapté aux couverts temporaires pour lesquels il n'a pas été conçu.

Le module Meslier donne des résultats intéressants. Ils sont assez mauvais sans soustraction de l'énergie de fonte. Ils sont encore mauvais mais bien meilleurs avec la soustraction (5 points de mieux). Une certaine sensibilité aux données d'ETP semble ainsi être introduite. Des ETP journalières datées pourraient de ce fait peut-être apporter un gain notable.

II. Ajustement du module Makhlouf ETP

Rappelons qu'il s'agit d'un module semi-distribué qui gère dix stocks de neige indépendants. La précipitation neigeuse est majorée et une part est comptée comme pluie. La fonte est estimée à partir de l'ETP. Il y a quatre paramètres fixes et aucun paramètre à caler.

1. Ajustement des paramètres fixes X1 à X4

1.1. Principe

Le module Makhlouf ETP est celui qui a donné pour l'instant les meilleurs résultats, puisqu'il a permis une amélioration du Nash allant jusqu'à 2,3 points pour les bassins les plus enneigés. Ces résultats encourageants s'expliquent si l'on considère que le module avait été construit pour être associé avec GR4J et que ses paramètres fixes avaient été ajustés.

Néanmoins, puisqu'on dispose d'un grand échantillon de bassins versants, il est possible de tester la robustesse de cet ajustement, et éventuellement de l'améliorer encore. Pour ce faire **quatre séries de 121 simulations** ont été effectuées sur les 70 bassins versants afin de tester systématiquement les valeurs attribuables aux paramètres fixes :

Les paramètres X1 et X2 quantifient les volumes d'entrée du modèle puisqu'ils mesurent respectivement la majoration de la précipitation et la fraction neigeuse. Leur ajustement est effectué simultanément. La fonte est sans impact sur l'ETP. Les paramètres X3 et X4 sont fixés conformément aux travaux de Makhlouf (1994) à 0,3 et 0,4. X1 est supposé être compris entre 1 et 2, X2 entre 0 et 1. Les 121 combinaisons sont successivement testées.

Les paramètres X3 et X4 qui quantifient les échanges d'énergie entre le manteau neigeux et son environnement sont testés de façon analogue. X1 et X2 sont fixés à 1,2 et 0,3 conformément aux résultats de la première série de simulations. La fonte est sans impact sur l'ETP. On fait varier X3 et X4 entre 0 et 1.

Les deux séries de simulation sont reprises en soustrayant l'énergie de fonte.

1.2. Résultats

Les résultats de ces quatre séries de simulations sont présentés sur les Figures 7 à 10.

1.3. Commentaires

1.3.1. Paramètres X1 et X2

L'ajustement des paramètres X1 et X2 fournit de belles courbes en cloche. Il existe donc des optimums nets pour ces paramètres. L'approche qui consiste à majorer la précipitation neigeuse et à compter une partie comme pluie apparaît donc pertinente. Les extremums sont un peu moins marqués sans la soustraction qu'avec : le module est donc plus robuste sans impact de la fonte sur l'ETP, mais il donne ainsi des résultats légèrement inférieurs.

Cette étude suggère que les meilleures valeurs pour X1 et X2 sont respectivement 1,2 et 0,3 ce qui veut dire que la majoration de la précipitation doit être inférieure à celle proposée par

Makhlouf (1,5). De plus, seul un quart de la précipitation doit être compté comme neige. Toutefois, si l'on aborde une nouvelle population de bassins versants pour lesquels on dispose de données de contrôle, on peut tester X1 dans l'intervalle [1,2 1,5] et X2 dans [0,2 0,4]. Tous ces doublets devraient fournir des résultats cohérents. Il suffit de choisir le meilleur.

1.3.2. Paramètres X3 et X4

Les extremas sont moins marqués que pour X1 et X2 ce qui traduit une faible sensibilité aux entrées relatives à l'ETP. La soustraction rend les optimums légèrement plus marqués.

Cette étude montre que le paramètre X4 a une influence très réduite : quelle que soit sa valeur entre 0 et 1 les résultats sont quasi identiques. C'est la valeur 0,3 qui semble, de très peu, être la meilleure. Makhlouf proposait 0,4 ce qui est tout aussi acceptable...

Le paramètre X3 semble jouer un rôle plus net: son optimum se situerait aux alentours de 0,5 alors que Makhlouf suggérait 0,3. Le volume d'eau de fonte induit par la pluie est donc plus important que prévu.

1.3.3. Bilan

Les simulations effectuées conduisent donc à proposer le quadruplet [1,2 0,3 0,5 0,3] pour le Module Makhlouf ETP. Makhlouf obtenait quant à lui le quadruplet [1,5 0,5 0,3 0,4].

On peut essayer d'expliquer grossièrement les différences entre ces résultats. Makhlouf a mené son étude sur des bassins de Moselle au climat assez rigoureux. La neige et le vent y sont significatifs et les températures basses. La majoration de la précipitation et la part de neige dans la précipitation totale doivent donc être importante, tandis que, la pluie étant froide, la fonte induite par l'eau de pluie est modérée.

Sur l'ensemble des bassins français, le climat est en moyenne plus doux. C'est pourquoi la part de neige dans la précipitation totale est plus faible et la fonte induite par la pluie, en moyenne plus chaude, plus abondante. Dans cette optique on peut penser que cette étude propose des valeurs plus généralement utilisables. Néanmoins celles-ci pourront être ajustées au cas par cas à la lumière des réflexions précédentes, notamment sur les bassins non jaugés.

Figure 7: Ajustement des paramètres X1 et X2 du Module Makhlouf ETP (sans impact de la fonte sur l'ETP)

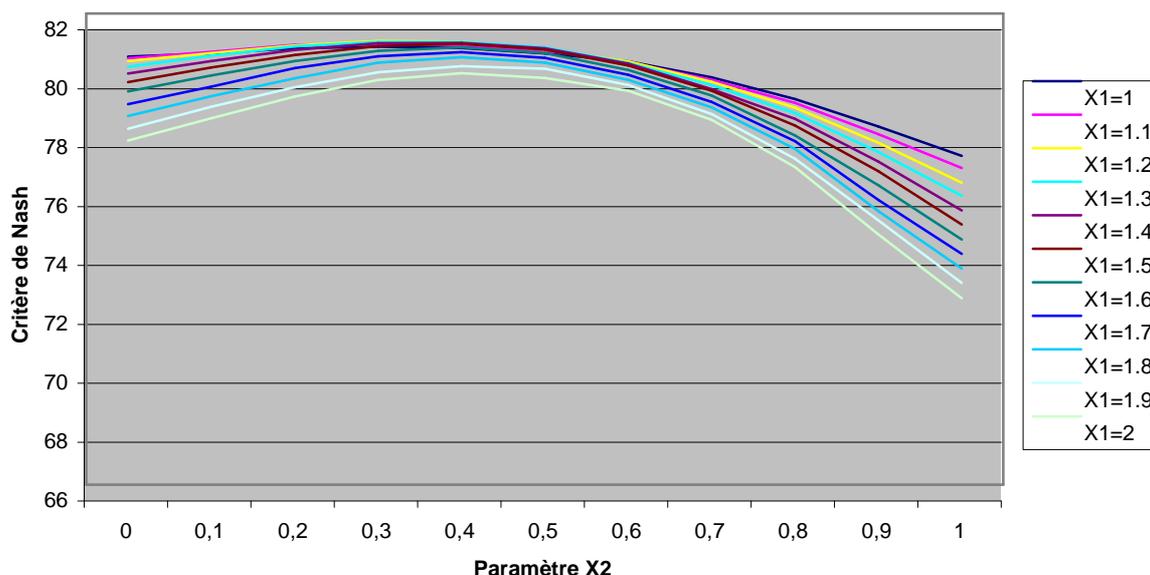


Figure 8: Ajustement des paramètres X3 et X4 du module Makhoulf ETP (sans impact de la fonte sur l'ETP)

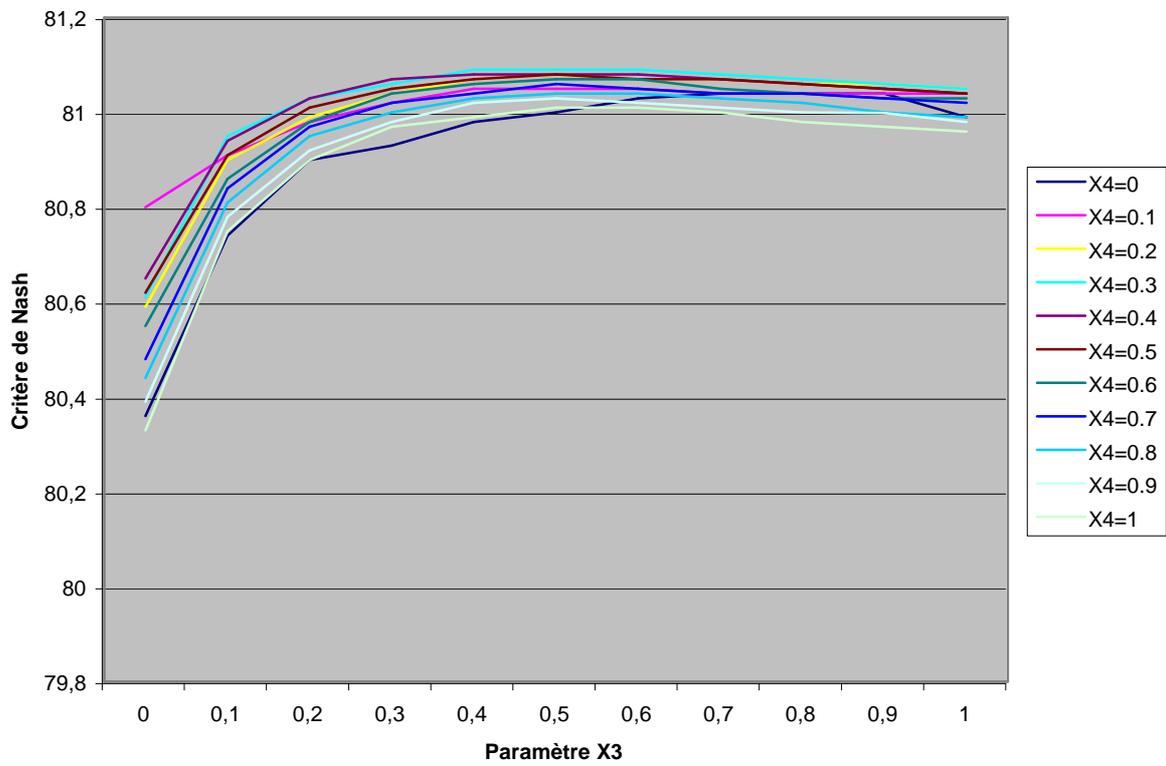


Figure 9: Ajustement des paramètres X1, X2 du module Makhoulf ETP (avec fonte soustraite à l'ETP)

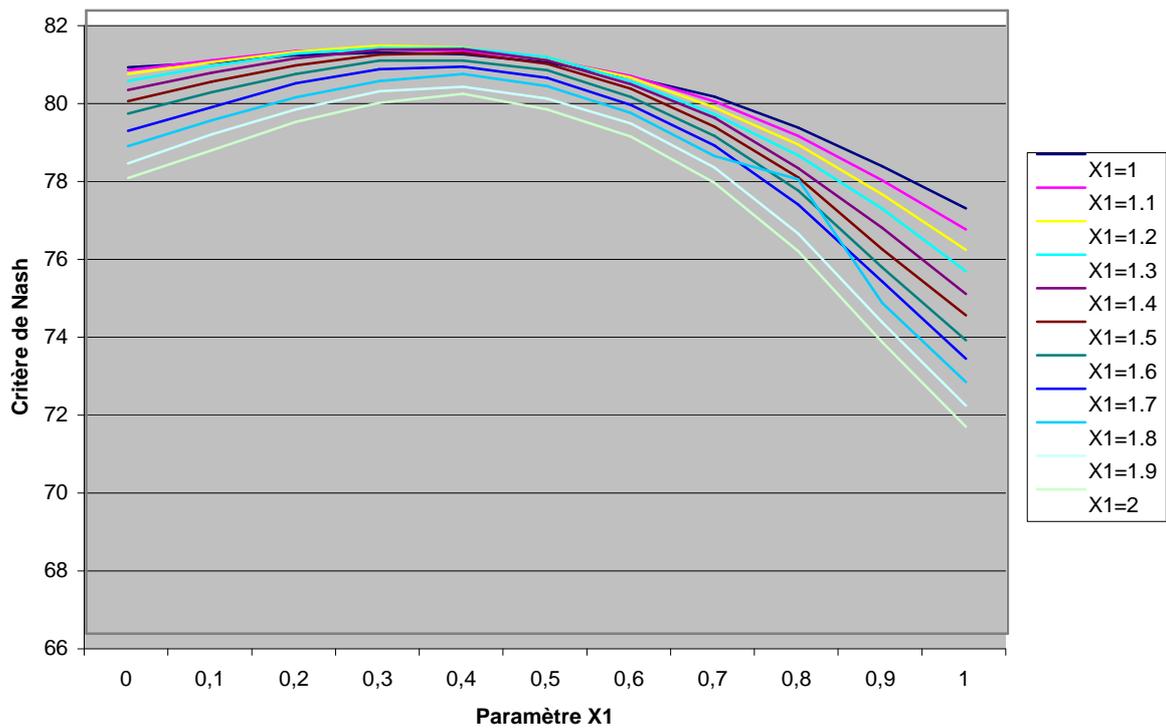
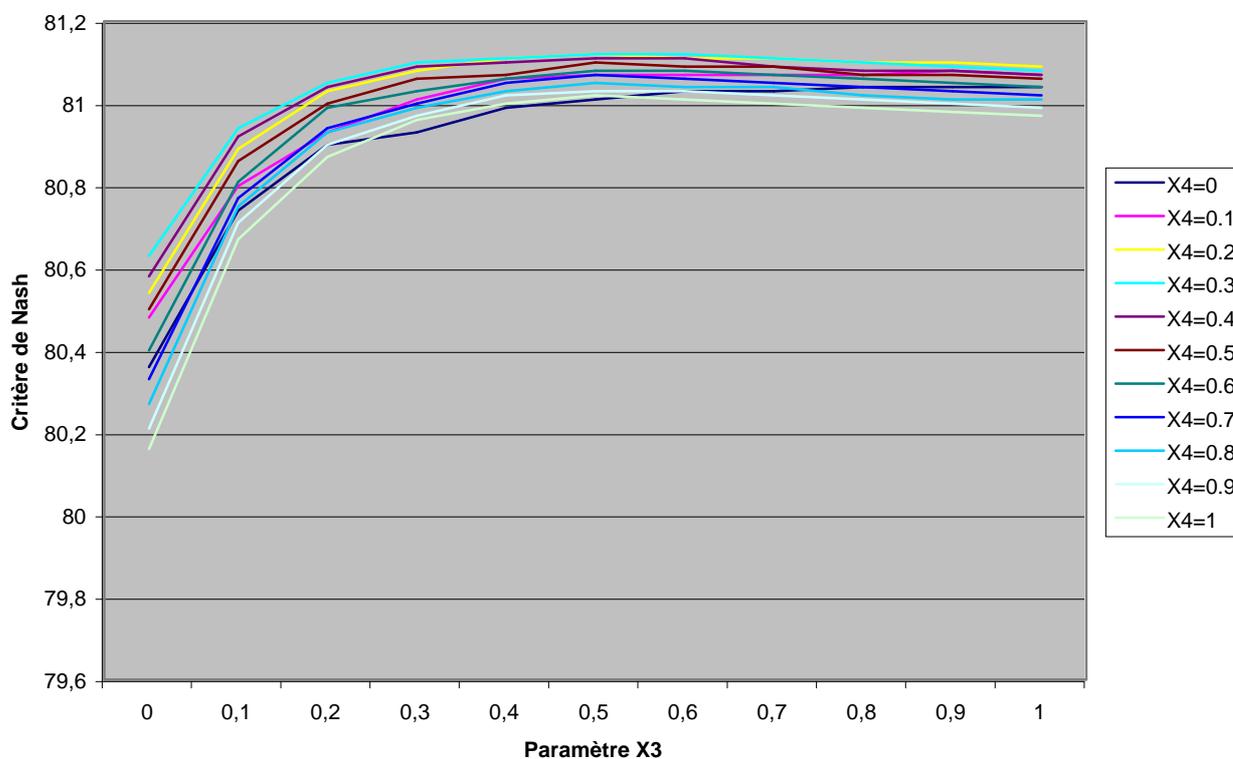


Figure 10: Ajustement des paramètres X3, X4 du module Makhoul ETP (avec fonte soustraite à l'ETP)



2. Fonctionnement du modèle dans sa configuration optimale

2.1. Principe

Les paramètres X1 à X4 sont fixés conformément aux optimums déterminés lors de l'ajustement. On fait alors tourner le modèle sur les 70 bassins versants, puis uniquement sur la sous population des bassins les plus enneigés.

2.2. Résultats

Les critères de Nash moyens obtenus sont présentés dans le Tableau 6. Le modèle GR4J sans module neige est utilisé comme témoin. Les distributions sont présentées en Figure 11 et 12.

Tableau 6: Fonctionnement du module Makhoul ETP dans sa configuration optimale

	Sans soustraction de l'ETP de fonte		Avec soustraction de l'ETP de fonte	
	<i>Tous les bassins</i>	<i>Bassins les plus neigeux</i>	<i>Tous les bassins</i>	<i>Bassins les plus neigeux</i>
Sans module neige	80,5	78,6	80,5	78,6
Fonctionnement initial	80,9	80,9	80,9	80,9
Fonctionnement après ajustement	81,2	81,3	81,8	81,9

2.3. Commentaires :

L'ajustement permet d'améliorer le critère de Nash moyen. Le gain obtenu est nettement plus important avec la soustraction de l'équivalent énergétique de la fonte, conformément à l'observation d'optimums bien marqués lors de la phase d'ajustement.

Le gain s'élève avec soustraction à 1,3 points pour l'ensemble des bassins versants et à 3,2 points pour les bassins les plus enneigés. C'est tout à fait significatif pour un phénomène, la neige, qui ne concerne qu'une partie du bassin versant durant quelques mois au plus.

Si l'on s'intéresse aux distributions des critères de Nash sur l'ensemble des couples bassin/période, ces résultats deviennent plus intéressants encore : les courbes ne se croisent pas, il s'agit donc d'un gain net. Et il convient visiblement d'effectuer la soustraction de l'énergie de fonte.

Figure 11: Distribution des critères de Nash, module Makhoulouf ETP

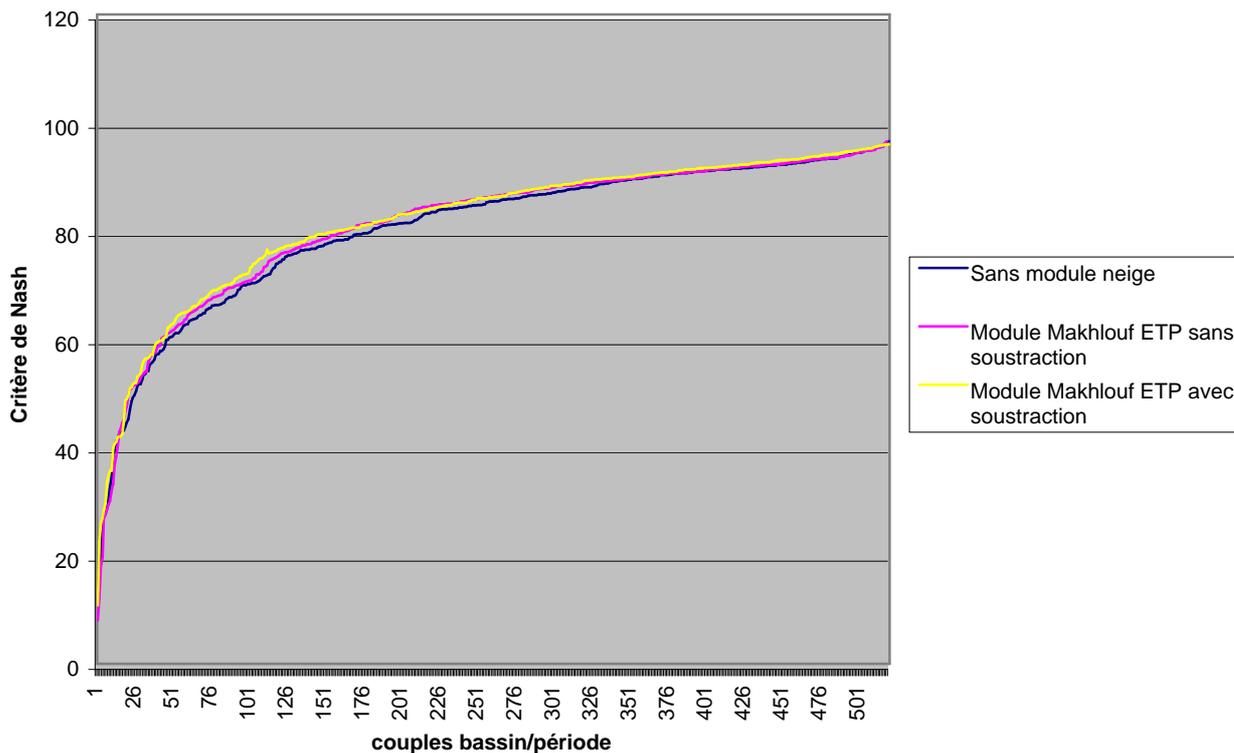
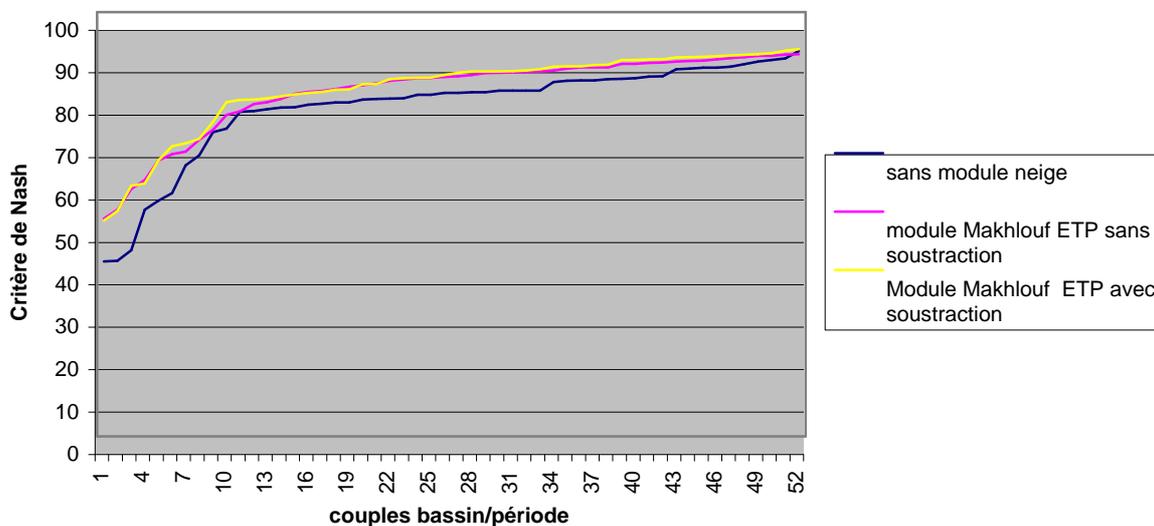


Figure 12: Distribution des critères de Nash pour les bassins les plus enneigés, module Makhoulouf ETP



3. Modifications de la structure du modèle

3.1. Suppression de la semi-distribution

3.1.1. Principe :

Afin d'essayer de quantifier l'importance de la semi-distribution, on la supprime et on la remplace par une approche globale analogue à celle décrite pour le module Meslier. On refait ensuite une simulation.

3.1.2. Résultats et commentaires :

Les critères de Nash moyens obtenus sont 80,8 sans soustraction et 80,7 avec. Ils sont donc nettement inférieurs à ceux obtenus précédemment, et à peine supérieurs au témoin (GR4J sans module neige). La semi-distribution apparaît donc indispensable au module.

3.2. Utilisation d'ETP datées

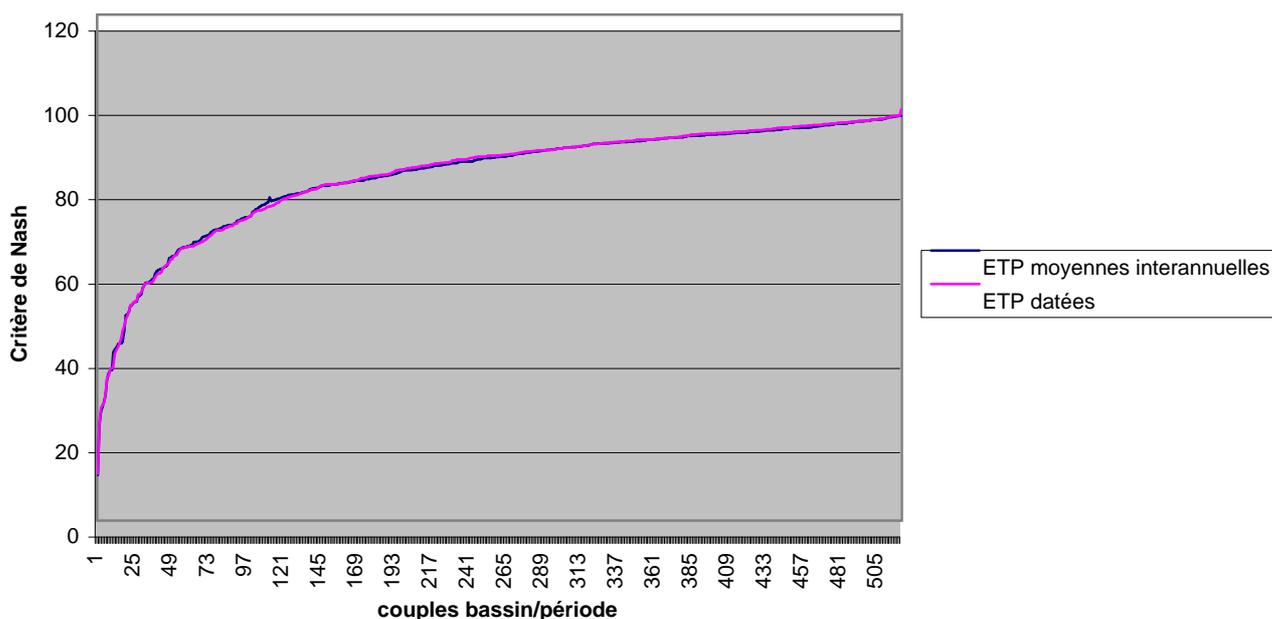
3.2.1. Principe

Puisque la fonte est calculée à partir de l'ETP, il paraissait intéressant de voir s'il était possible d'améliorer encore les résultats du modèle en remplaçant les ETP moyennes interannuelles par des ETP journalières datées calculées selon la formule de Penman à partir des paramètres climatiques mesurés le jour même.

3.2.2. Résultats et commentaires

Avec la soustraction, le critère de Nash moyen ainsi obtenu est 81,9 soit un gain de 0,1 points de Nash seulement par rapport aux ETP moyennes. Ce gain correspond grossièrement à celui obtenu en utilisant des ETP datées pour GR4J sans module neige, il n'est donc pas significatif. On n'observe par ailleurs aucun changement notable dans la distribution des critères de Nash (cf. Figure 13).

Figure 13: Introduction d'ETP datées, module Makhlouf ETP



III. Ajustement du module Makhlouf degré

Rappelons qu'il s'agit d'un module semi-distribué qui gère dix stocks de neige indépendants. La précipitation neigeuse est majorée et une part est comptée comme pluie. La fonte est estimée à partir des degrés-jours. Il y a quatre paramètres fixes et aucun paramètre à caler.

1. Paramètres fixes X1 à X3

De même que pour le module Makhlouf ETP, les paramètres fixes du module Makhlouf degré ont été ajustés grâce à des simulations systématiques. Les résultats sont présentés graphiquement en Figure 14 à 16.

Figure 14: Ajustement des paramètres X1 et X2 du module Makhlouf degré (sans impact de la fonte sur l'ETP)

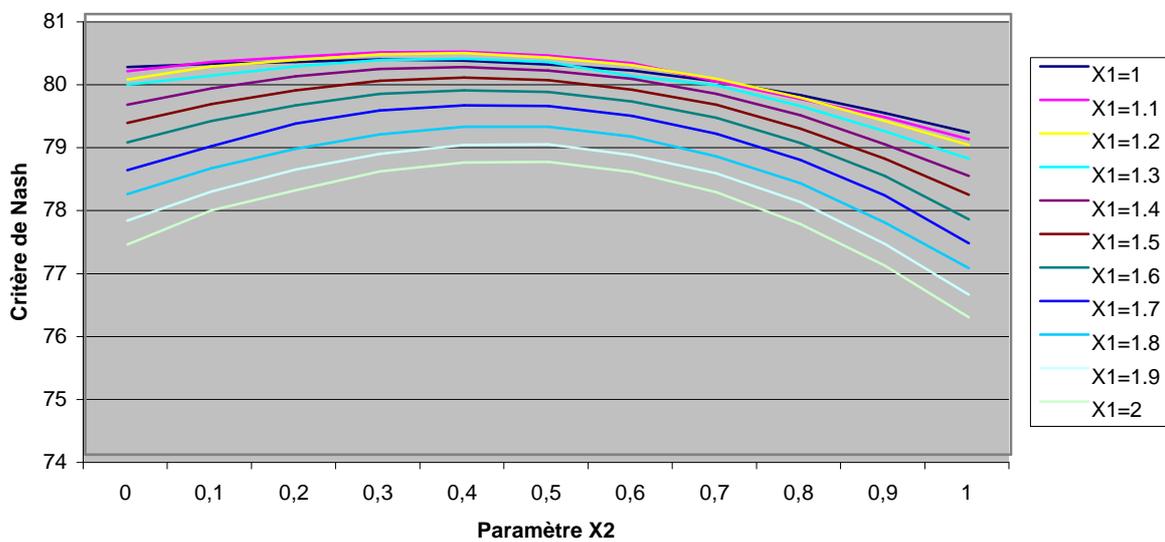


Figure 15: Ajustement des paramètres X1 et X2 du module Makhlouf degré (avec fonte soustraite à l'ETP)

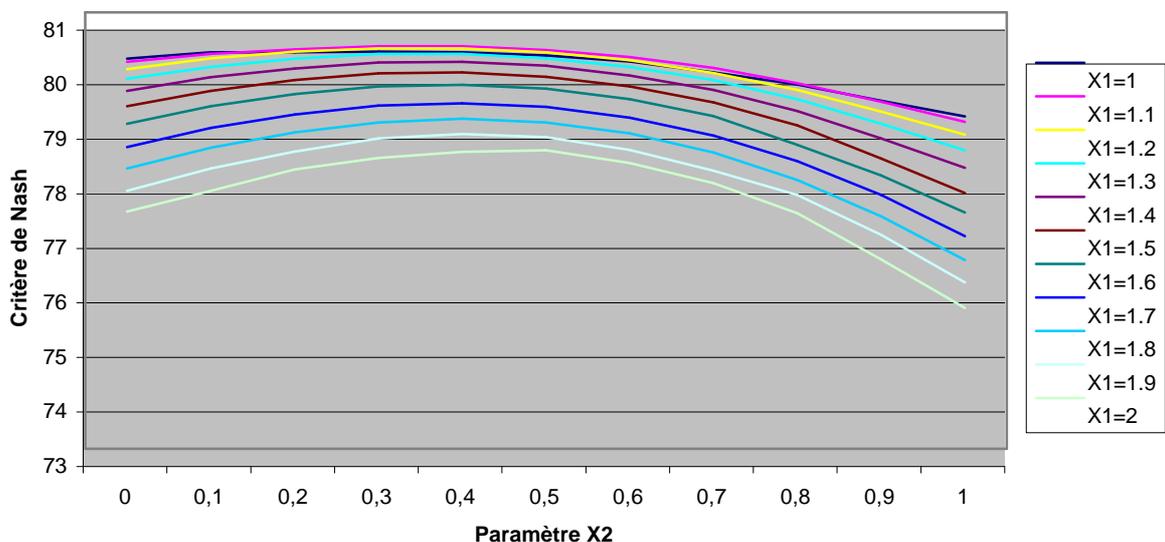
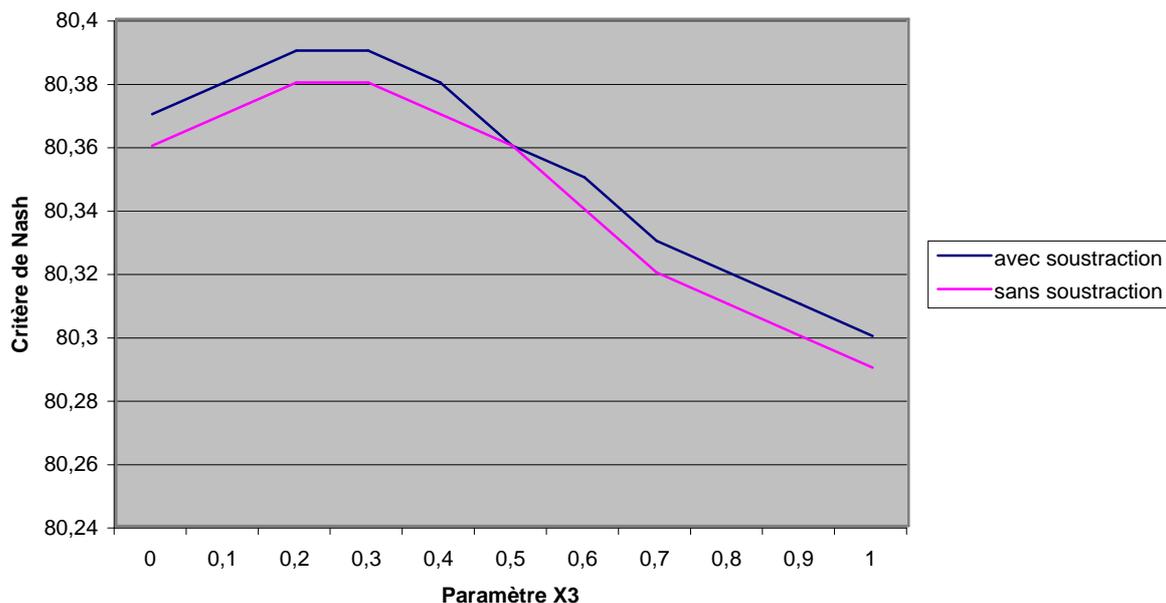


Figure 16: Ajustement du paramètre X3 du module Makhlouf-degré



Les résultats sont assez proches de ceux obtenus avec le module Makhlouf ETP : il existe des optimums nets pour les paramètres X1, X2 et un optimum moins marqué pour le paramètre X3. Le triplet [1,1 0,4 0,3] est obtenu.

2. Fonction de production

2.1. Principe

La différence entre les modules Makhlouf ETP et Makhlouf degré se situe au niveau de la fonction de production. Pour le module Makhlouf degré, on peut jouer sur le facteur de fonte et la température seuil à partir de laquelle la fonte est calculée. Quatre séries de simulation sont ainsi réalisées.

Tout d'abord la température seuil est fixée à 0°C et on fait varier le facteur de fonte avec un pas de 0,1 mm.j⁻¹.°C⁻¹ dans l'intervalle [0,1 8,5] qui couvre très largement l'éventail recensé dans la littérature. Le facteur de fonte est supposé constant au cours de la saison. On le fixe ensuite à son optimum et on fait varier la température seuil avec un pas de 0,1°C dans l'intervalle [-5 5], puis au-delà si l'optimum n'a pas été trouvé.

Dans un deuxième temps des variations saisonnières du facteur de fonte sont introduites conformément aux travaux d'Anderson (1968) exposés au chapitre 1.

$$\text{On pose } M = M_{\text{moy}} + \frac{M_{\text{moy}}}{2} \times \sin\left(\frac{2n \times p}{366}\right)$$

où M_{moy} est le facteur de fonte annuel moyen et n le numéro du jour d'une année commençant le 21 Mars. On détermine successivement la meilleure valeur pour M_{moy} puis la température seuil correspondante.

2.2. Résultats et commentaires

2.2.1. Facteur de fonte fixe

Les résultats sont présentés en Figure 17 et 18. L'optimum pour le facteur de fonte se situe à 0,4 mm.j⁻¹.°C⁻¹. Il s'agit d'une valeur trop faible pour être réaliste, puisque même pour une

forêt de conifères dense, les mesures au sol n'ont pas révélé de facteurs de fonte inférieurs à $0,8 \text{ mm.j}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. La courbe de température seuil correspondante est elle aussi surprenante : Le fonctionnement du module n'est que très peu influencé dès lors que sa valeur est inférieure à $0,5\text{°C}$ et l'optimum, très peu marqué, se situe aux environs de -20°C , valeur physiquement complètement absurde. Ceci confirme qu'un facteur de fonte fixe est insuffisant pour refléter la réalité. Le modèle est capable de s'en accommoder par équifinalité, mais cela n'est évidemment pas satisfaisant. Cette approche doit donc être rejetée.

Figure 17: Ajustement du facteur de fonte pour le module Makhlouf degré

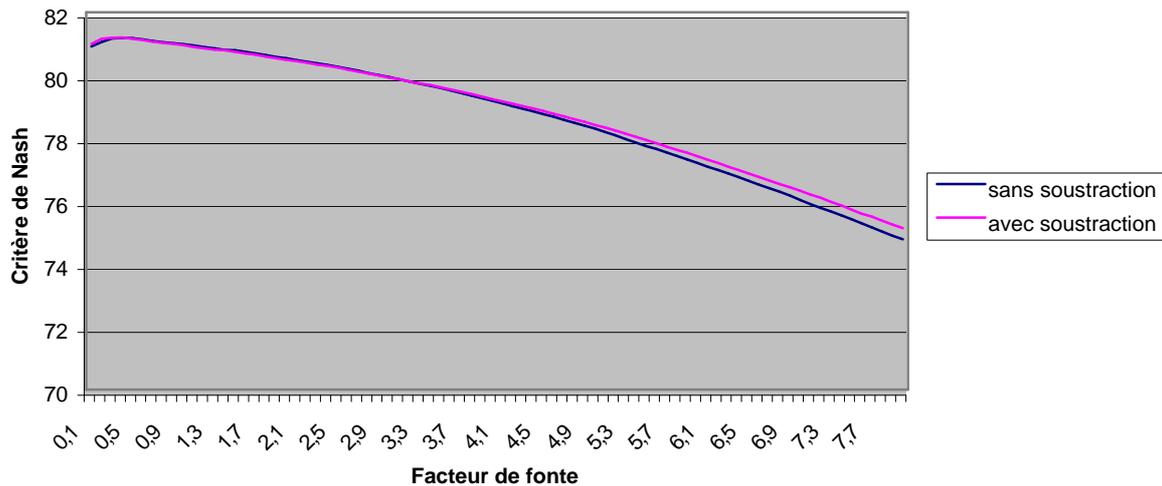
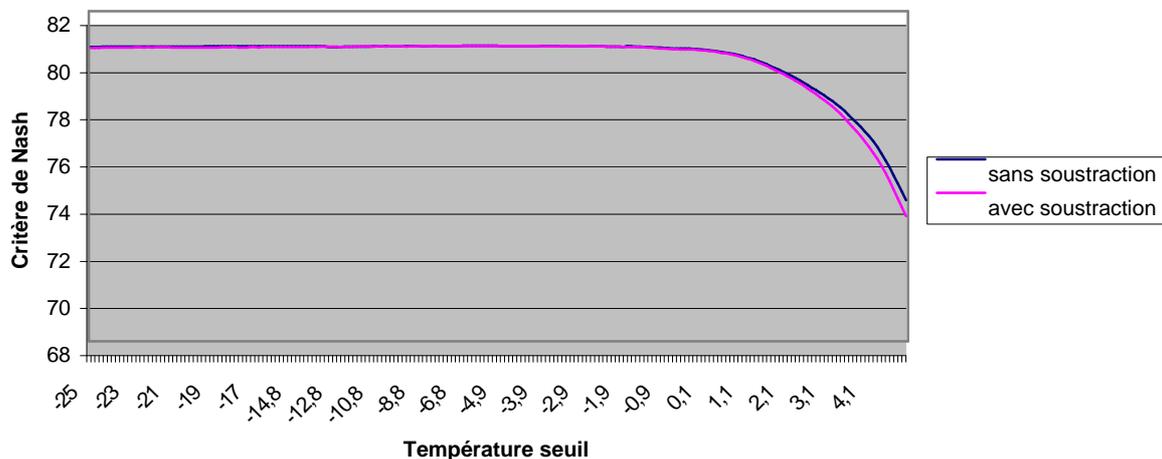


Figure 18: Ajustement de la Température seuil pour le module Makhlouf degré (facteur de fonte fixe)



2.2.2. Facteur de fonte variable au cours de la saison

Les résultats sont présentés en Figure 19 et 20. Le meilleur facteur de fonte moyen semble être $1,5 \text{ mm.j}^{-1}.\text{°C}^{-1}$. La température seuil correspondante présente un optimum bien marqué à $0,5\text{°C}$. Ces résultats sont nettement plus satisfaisants que les précédents car ils ont davantage de sens physique. Comme l'ont noté Rango et Martinec (1995), l'approche par degrés-jours devient donc robuste à partir du moment où l'on fait varier le facteur de fonte.

La valeur obtenue pour le facteur de fonte correspond à peu près aux mesures obtenues au lysimètre dans une forêt mixte. Pourtant les bassins étudiés ne sont qu'en partie recouverts de forêts ce qui laisse à penser que des campagnes de terrain permettraient d'obtenir une valeur

moyenne légèrement supérieure. On retrouve l'idée déjà formulée (Rango et Martinec 1995) que la valeur à attribuer au facteur degré-jour à l'échelle du bassin versant doit être légèrement inférieure à celle obtenue au lysimètre.

On peut également proposer une explication à la valeur obtenue pour la température seuil. Aucune fonte n'est calculée par le modèle dès lors que la température est inférieure à $0,5^{\circ}\text{C}$. Ceci est peut-être la meilleure manière pour le modèle de prendre en compte la spécificité des couverts temporaires : les fluctuations de température atmosphérique sont fréquentes, et rapides de sorte qu'elles ne sont probablement pas toutes traduites en terme de fusion/regel du fait des temps de propagation de la variation de température à l'intérieur du paquet neigeux. Une fonte significative ne se produit que dès lors que la température est nettement au-dessus de zéro, ce que reproduit le modèle. Un autre élément d'explication compatible avec le précédent est que ce modèle ne permet pas le regel, il s'en accommode en ne produisant de l'eau de fonte que pour des températures nettement positives.

Figure 19: Ajustement du facteur de fonte variable pour le module Makhoul degré

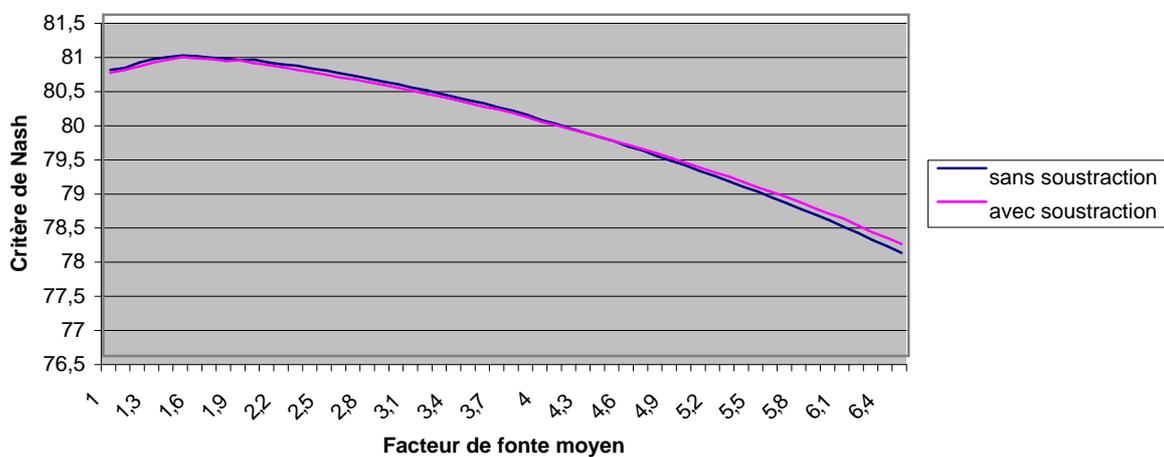
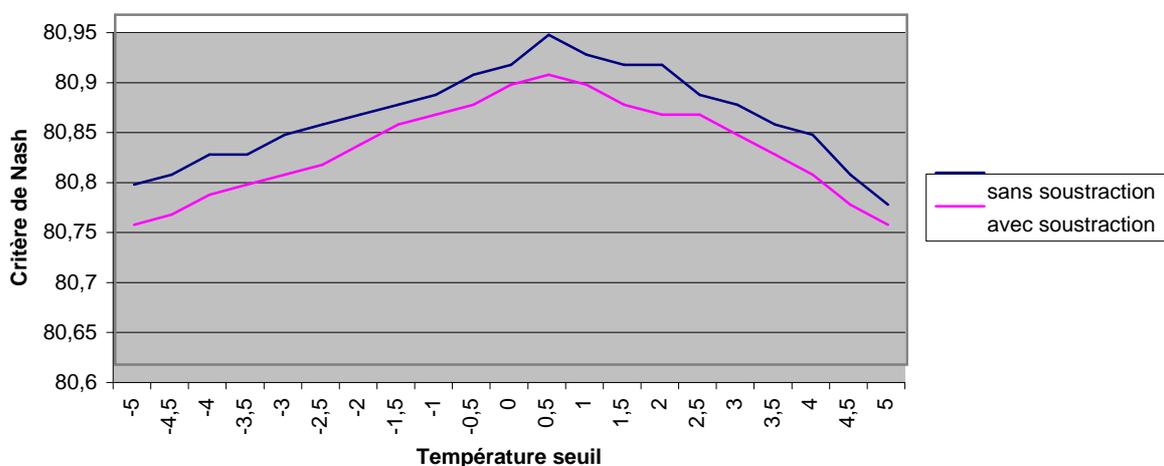


Figure 20: Ajustement de la température seuil pour le module Makhoul degré avec facteur de fonte variable



3. Fonctionnement du modèle dans sa configuration optimale

3.1. Principe

Les paramètres X1 à X3 sont fixés conformément aux optimums trouvés. Le facteur de fonte varie autour de la valeur moyenne $1,5 \text{ mm.j}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$. La température seuil est fixée à $0,5\text{°C}$.

3.2. Résultats et commentaires

Les critères de Nash moyens obtenus sont présentés dans le Tableau 7, la distribution correspondante en Figure 21.

Tableau 7: Fonctionnement du module Makhlof degré dans sa configuration optimale

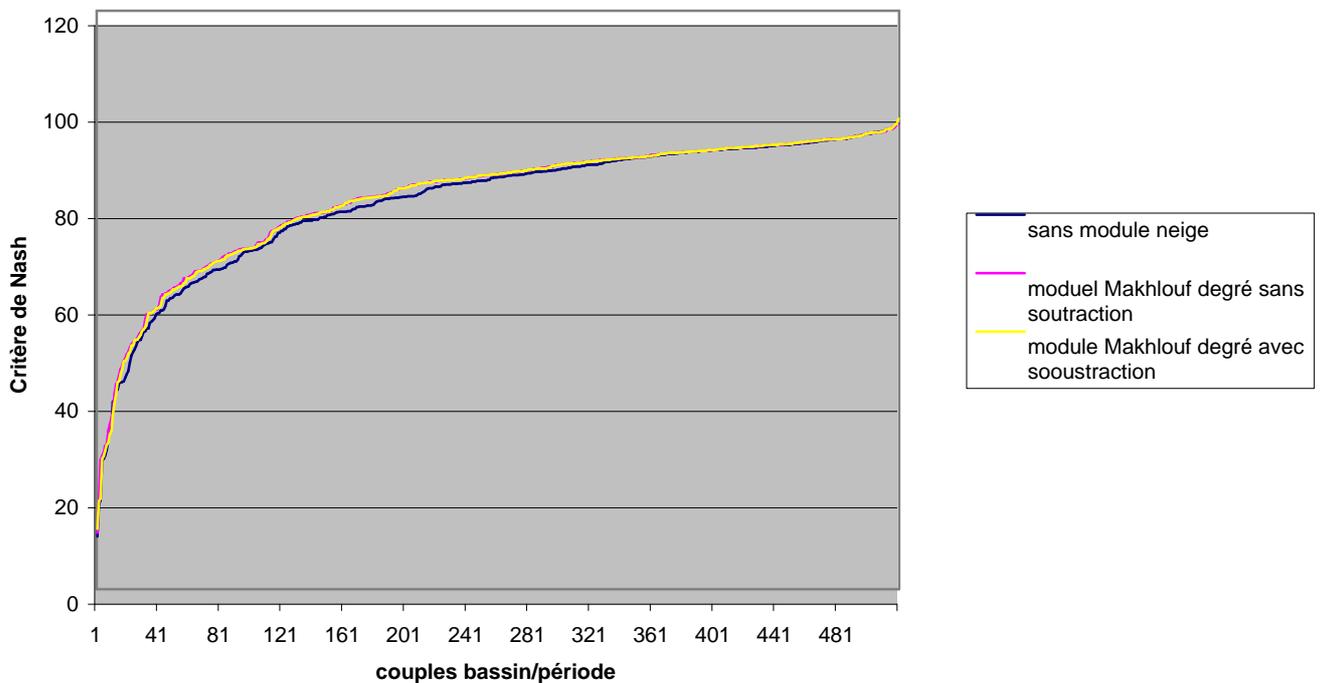
	Sans soustraction de l'ETP de fonte	Avec soustraction De l'ETP de fonte
Sans module neige	80,5	80,5
Fonctionnement initial	80	79,9
Fonctionnement après ajustement	81,4	81,3

Le gain moyen s'élève à 0,9 points de Nash sans la soustraction de l'énergie de fonte et à 0,7 points sans. Il est significatif et du même ordre de grandeur que celui obtenu avec le module Makhlof ETP, bien qu'un peu moins important.

Contrairement au module Makhlof ETP, le modèle est un peu meilleur sans la soustraction. Un tel résultat est difficile à expliquer car peu logique.

En terme de distribution, les résultats sont analogues à ceux obtenus avec le module Makhlof ETP : les courbes ne se croisent pas. Le module apporte donc un gain net. Il est par conséquent utilisable en contexte de couverts temporaires.

Figure 21: Distribution des critères de Nash, module Makhlof degré



III. Ajustement du module HBV

Rappelons qu'il s'agit d'un module semi-distribué. La fonction de production est de type degré-jours. Le regel est pris en compte de même que la présence d'eau liquide dans le manteau neigeux. Il y a trois paramètres fixes et deux paramètres à caler.

1. Paramètres fixes X1 à X3

Des simulations systématiques ont été effectuées pour ajuster les trois paramètres fixes du module. Les résultats sont présentés en Figure 22 à 24.

Figure 22: Ajustement du paramètre X1 pour le module HBV

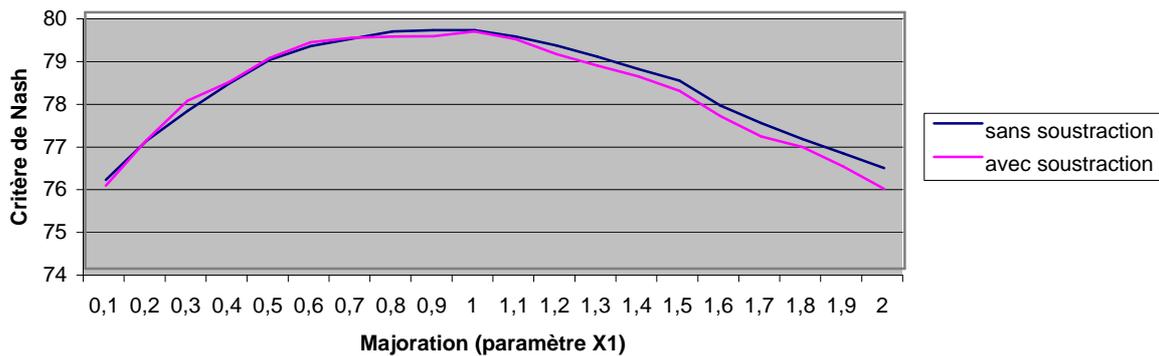


Figure 23: Ajustement du paramètre X2 pour le module HBV

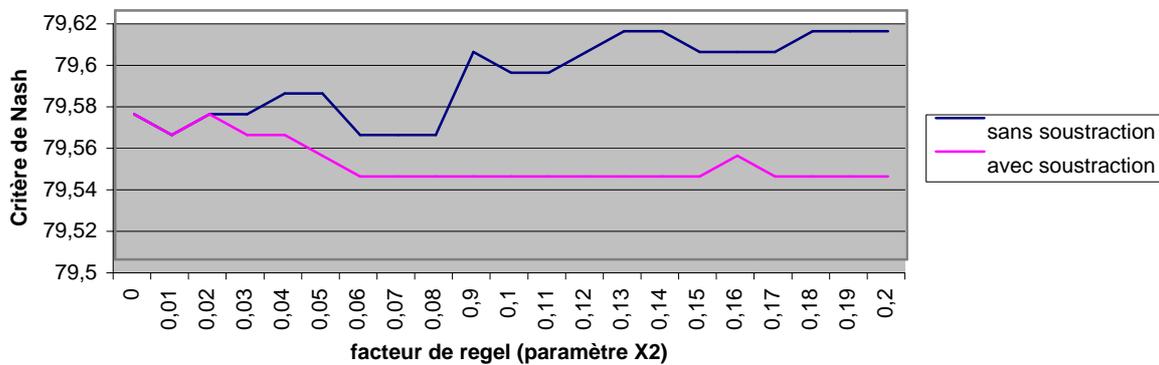
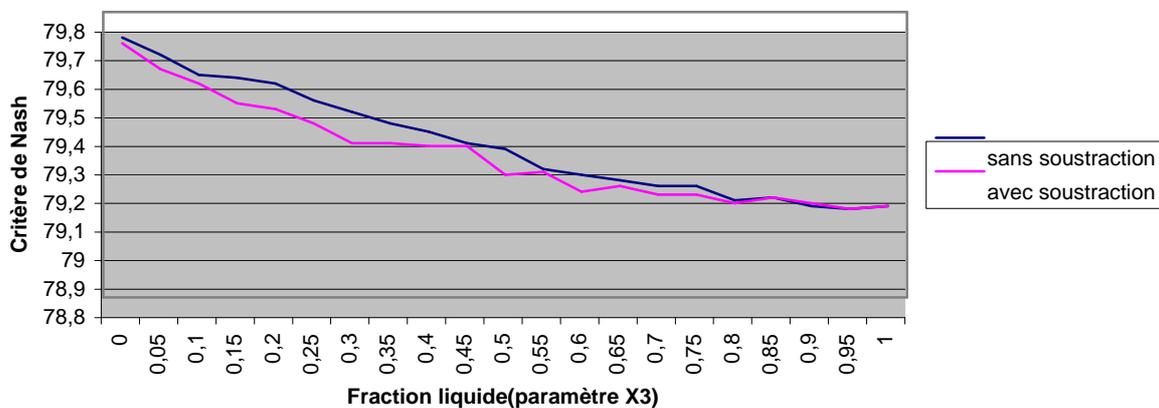


Figure 24: Ajustement du paramètre X3 pour le module HBV



Pour la première fois la majoration de la neige est inefficace, puisque l'optimum de X1 se situe à 1. De même le facteur de regel semble non significatif : quelle que soit sa valeur, le critère de Nash est quasi constant, et surtout on n'observe aucune tendance nette. Quant à la fraction d'eau liquide autorisée dans le manteau neigeux, elle est nulle puisque la meilleure valeur pour X3 est 0.

Ces résultats bien qu'un peu surprenants au premier abord sont cohérents avec le mauvais fonctionnement général du modèle observé avant ajustement : Il est incapable de traiter ce type de couverts neigeux c'est pourquoi il tend à « refuser » la neige en n'effectuant pas de majoration et en ne permettant aucun regel.

On fait ressortir ici ce qui constitue probablement une spécificité des couverts temporaires : les températures sont insuffisamment basses pour permettre un regel quantitativement significatif et l'eau de fonte percole directement à travers le paquet neigeux jusqu'au sous-sol.

2. Modifications de la structure du module

2.1. Introduction d'un paramètre fixe supplémentaire : la température seuil

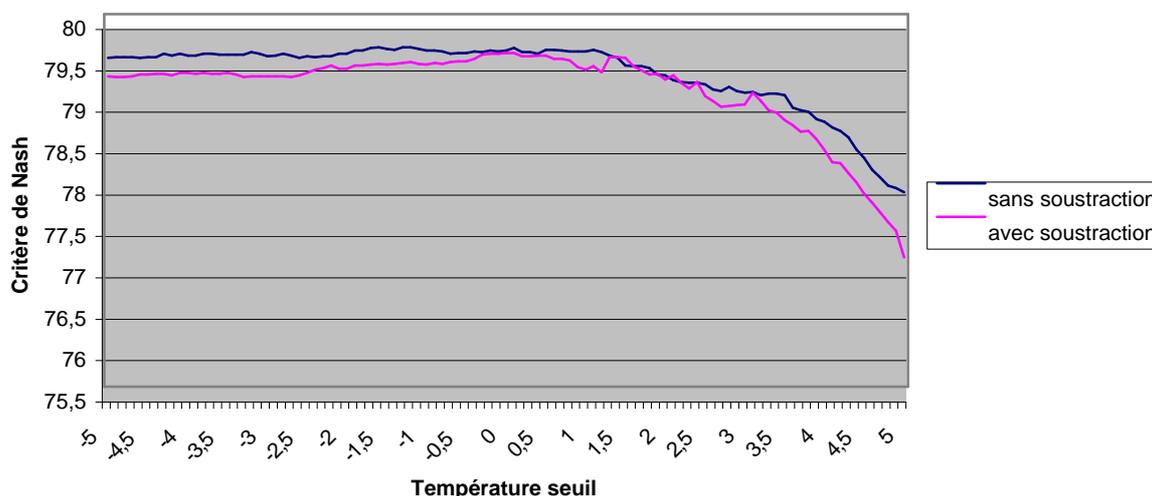
2.1.1. Principe

Une des pistes proposées pour expliquer le mauvais fonctionnement de ce module était le surcalage. Il a donc été essayé de remplacer l'un des paramètres optimisés, la température seuil des degrés-jours, par un paramètre fixe. La méthode de test est la même que celle utilisée pour le module Makhoulouf degré.

2.1.2. Résultat et commentaires

Le résultat est présenté en Figure 25.

Figure 25: Introduction d'une température seuil fixe pour le module HBV



Pour des températures seuil comprises entre -1 et 1°C, on obtient des critères de Nash moyens de l'ordre de 79,6 sans soustraction et 79,5 avec soustraction, soit un gain de plus de un point de Nash par rapport au module original. L'hypothèse du surcalage se confirme donc: il semble que GR4J ne peut supporter deux paramètres à caler pour son module neige.

La meilleure température seuil semble être 0,1°C. Avec le module Makhoulouf degré, on avait obtenu 0,5°C. Cette valeur élevée avait été attribuée notamment à l'absence de prise en compte du regel qui obligeait le modèle à compenser en ne calculant une fonte que pour des

Températures nettement positives. La fonction de regel du module HBV permettrait une modélisation plus fine des épisodes de fonte/regel, ce qui autoriserait l'utilisation d'une température seuil physiquement plus réaliste.

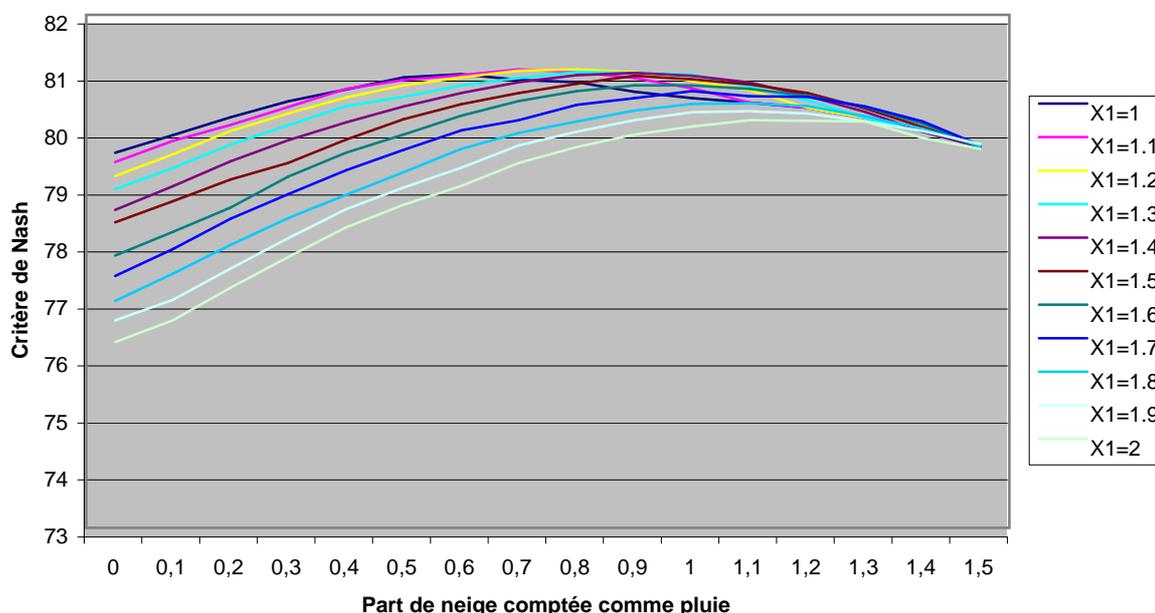
2.2. Une part de pluie est couplée à la majoration

2.2.1. Principe et résultats

Les modules Makhoulouf ETP et Makhoulouf degré fonctionnent relativement bien. L'une de leur spécificité est de compter une part de la précipitation neigeuse majorée comme de la pluie. Il a été jugé pertinent d'incorporer cette fonction dans le module HBV sous la forme d'un paramètre fixe X4 supplémentaire.

Le protocole de simulations est identique à celui exposé pour le module Makhoulouf ETP. Les résultats sans soustraction de l'énergie de fonte sont présentés en Figures 26. Lorsque la soustraction est effectuée les résultats sont similaires.

Figure 26: Module HBV: une part de neige est comptée comme pluie



2.2.2. Commentaires

Les conséquences de cette opération sont spectaculaires : des critères de Nash moyens de l'ordre de 81 sont atteints, soit un gain de trois points par rapport à la version initiale du module et des résultats enfin supérieurs à ceux obtenus avec GR4J sans module neige. De plus la majoration de la précipitation neigeuse retrouve toute son efficacité. Compter une part de la neige comme pluie semble donc décisif pour la modélisation des couverts temporaires. Les valeurs obtenues pour le doublet majoration-part de neige sont [1,2 0,5], proches de celles obtenues pour les modules Makhoulouf ETP et Makhoulouf degré. Elles semblent donc robustes.

3. Fonctionnement du module dans sa configuration optimale

3.1. Principe

Conformément aux résultats précédents, le module fonctionne avec une température seuil fixe à 0,1°C et compte directement une part de la neige comme pluie. Les paramètres X1 à X4 sont fixés respectivement à [1,2 0,13 0 0,5].

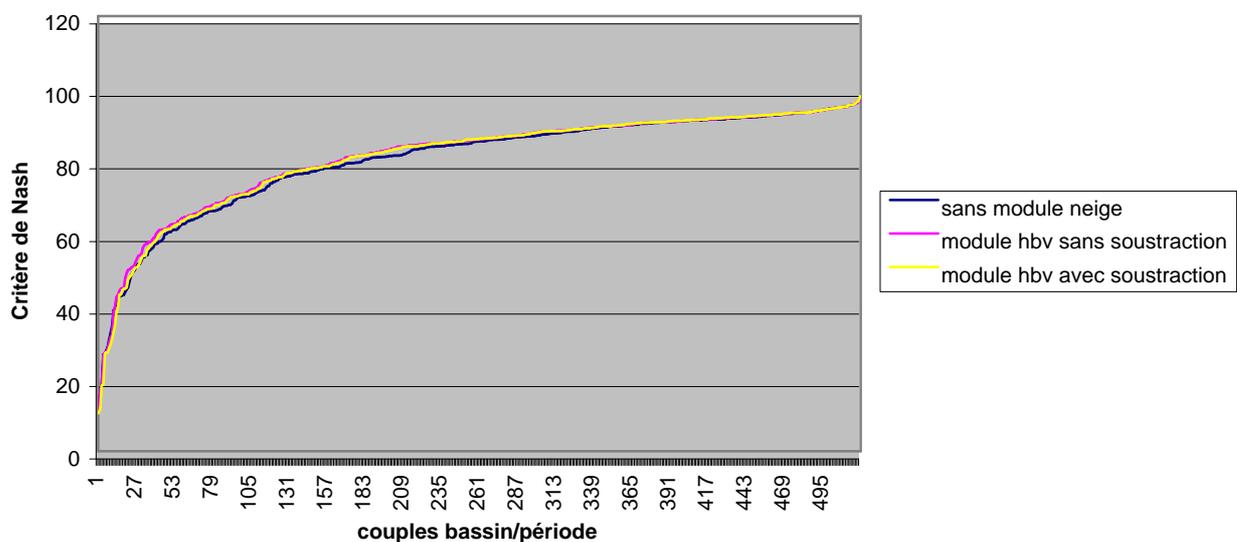
3.2. Résultats et commentaires

Les critères de Nash moyens obtenus sont présentés dans le Tableau 8, la distribution correspondante en Figure 27.

Tableau 8: Fonctionnement du module HBV dans sa configuration optimale

	Sans soustraction de l'ETP de fonte	Avec soustraction de l'ETP de fonte
Sans module neige	80,5	80,5
Fonctionnement initial	78,4	78,2
Fonctionnement après ajustement	81,3	81

Figure 27: Distribution des critères de Nash après ajustement du module HBV



Le gain moyen s'élève à 0,8 points de Nash sans la soustraction de l'énergie de fonte et à 0,5 points avec, résultats extrêmement proches de ceux obtenus avec le module Makhoulouf degré qui utilise une approche degré-jours très similaire. Les modifications effectuées sur le module semblent donc le rendre également utilisable.

La distribution suggère que ce module améliore surtout la modélisation des bassins versants pour lesquels le critère de Nash est de l'ordre de 80.

V. Ajustement du module Meslier

Rappelons qu'il s'agit d'un module global. La fonte est calculée à partir de la température et du stock de neige disponible. Il y a deux paramètres fixes et un paramètre à caler.

1. Paramètres fixes

1.1. Principe et résultats

Des simulations systématiques ont permis de tester un grand nombre de doublets [X1, X2]. Conformément aux résultats initiaux, la soustraction de l'énergie de fonte est toujours effectuée. Trouver des optimums s'est révélé être très ardu de sorte que les résultats de ces tests ne sont que partiellement présentés en Figure 28 et 29.

1.2. Commentaires :

Le doublet [99,200] a ainsi été obtenu. Meslier (1999) utilisait quant à lui [6,7 360]. Pour le paramètre X2, la différence entre ces deux résultats n'est pas significative. La Figure 29 montre que le fonctionnement du modèle est à peu près indépendant du paramètre dès lors que celui-ci est supérieur à 100. Ce n'est pas très étonnant si l'on se réfère à la structure mathématique du modèle : le rôle de X2 est purement numérique, il évite des problèmes de non-définition lorsque le stock de neige devient nul. Pour le paramètre X1 l'écart entre les deux valeurs est plus ennuyeux. La quantité de neige mise en réserve est inversement proportionnelle à X1. Que la meilleure valeur pour X1 soit ainsi dix fois supérieure à celle préconisée par Meslier traduit un dysfonctionnement du modèle : il « refuse » la neige.

Figure 28: Ajustement du paramètre X1 pour le module Meslier

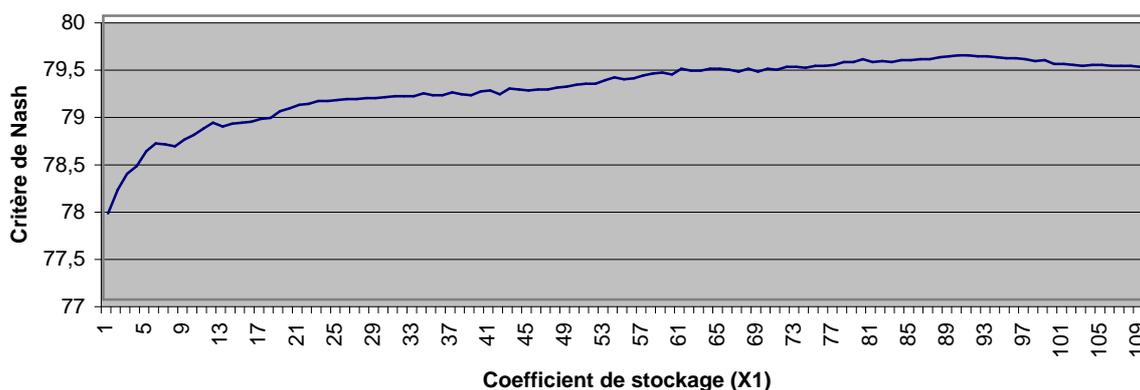
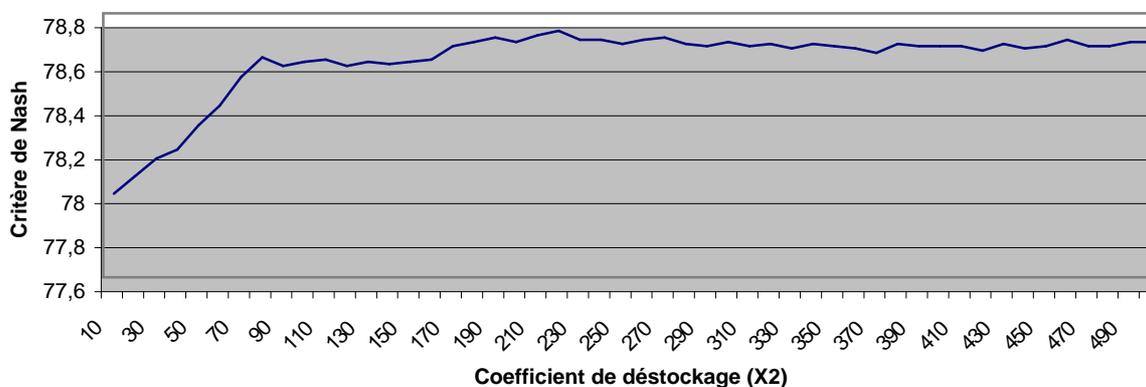


Figure 29: Ajustement du paramètre X2 pour le module Meslier



2. Modifications de la structure du modèle :

2.1. Principe et résultats

On dispose de peu de degrés de liberté pour jouer sur le modèle. Deux modifications qui ont été fructueuses pour d'autres approches ont été tentées : utiliser une température seuil fixe et introduire deux paramètres supplémentaires : majoration de la neige X3 et part de la précipitation comptée comme pluie X4. Les résultats sont présentés en Figure 30 et 31.

2.2. Commentaires

On obtient un bel optimum pour la température seuil à 0,3°C. Ce résultat est cohérent mais le modèle est moins efficace qu'avec une température seuil optimisée. On peut expliquer ce

résultat : la température seuil à caler constitue le seul moyen pour le module de s'adapter au bassin versant. Supprimer cette possibilité altère donc logiquement son potentiel opérationnel. Conformément aux résultats obtenus pour les autres modules, l'introduction des paramètres X3 et X4 apporte un gain notable de près de deux points de Nash, maximal pour le doublet [1,3 0,7]. Néanmoins les résultats restent très décevants puisque l'efficacité du modèle GR4J sans module neige n'est toujours pas atteinte.

Figure 30: Température seuil fixe pour le module Meslier

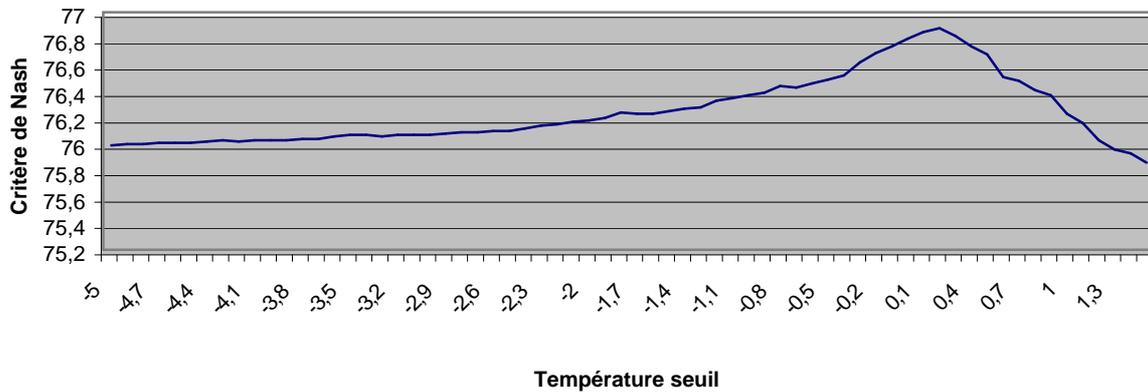
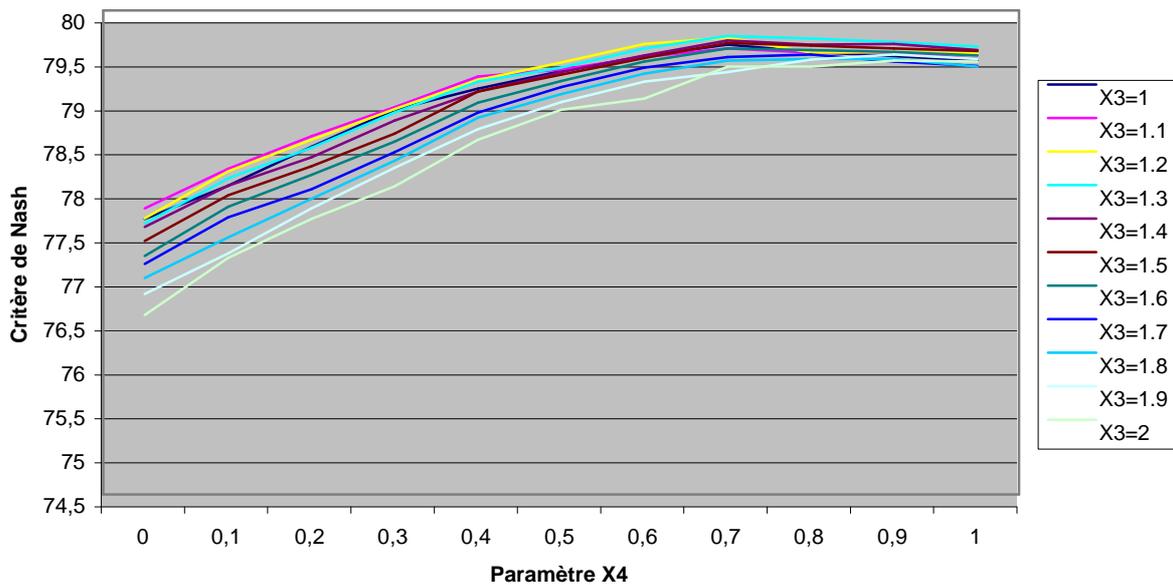


Figure 31: module Meslier: une part de neige est comptée comme pluie



3. Fonctionnement du modèle dans sa configuration optimale

Les paramètres X1 à X4 sont fixés aux valeurs [99 200 1,3 0,7]. La température seuil est optimisée et l'énergie de fonte soustraite à l'ETP. Le critère de Nash moyen obtenu est de 79,81 soit 0,7 points de moins que le modèle GR4J sans module neige. L'utilisation d'ETP datées n'améliore pas le résultat. On en déduit donc que l'approche de Meslier est inutilisable couplée avec GR4J. Sans doute est-ce en partie parce que la modélisation du bassin versant est globale, ce qui est difficilement compatible avec le phénomène neigeux. Mais l'explication principale est vraisemblablement que cette approche avait été développée au pas de temps mensuel. Au pas de temps journalier, elle s'avère insuffisante.

CHAPITRE 5 : Discussion

I. Efficacité comparée des différents modules

1. En terme de critère de Nash moyen

Cette étude visait à déterminer le meilleur module neige pour GR4J sur la base de la fonction objectif Critère de Nash moyen sur 70 bassins versants français. Les résultats des simulations sont récapitulés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : efficacité comparée des différents modules neige

	Critère de Nash moyen sur les 70 bassins	Gain apporté par le module
Sans module neige	80,5	/
Module Makhlouf ETP sans soustraction	81,2	+0,7
Module Makhlouf ETP avec soustraction	81,8	+1,3
Module Makhlouf degré sans soustraction	81,4	+0,9
Module Makhlouf degré avec soustraction	81,3	+0,8
Module HBV sans soustraction	81,3	+0,8
Module HBV avec soustraction	81	+0,5
Module Meslier avec soustraction	79,8	-0,7

L'approche la plus fructueuse est donc celle du module Makhlouf ETP, avec un gain moyen de 1,3 points de Nash lorsque la soustraction de l'énergie de fonte est effectuée. L'examen des distributions (cf. Figure 12) révèle que la modélisation d'un grand nombre de bassins versants est légèrement améliorée, sans que celle des autres ne soit dégradée de façon significative. Ce module peut donc être largement utilisé en association avec GR4J.

Les modules Makhlouf degré et HBV sont tout aussi utilisables puisque les distributions obtenues ont une allure similaire. Ils sont cependant un peu moins performants de sorte que leur utilisation est à réserver à des circonstances particulières auxquelles nous reviendrons. Il est intéressant de noter qu'ils fonctionnent mieux sans soustraction de l'énergie de fonte. Le module Meslier dégrade le fonctionnement de GR4J, il est à rejeter définitivement.

2. Au niveau des hydrogrammes

Comprendre complètement comment fonctionne chaque module et de ce fait pouvoir interpréter parfaitement les hydrogrammes simulés dépasse largement le cadre de cette étude tant il est parfois difficile de faire le lien entre le comportement du modèle et la physique sous-jacente. Il est néanmoins riche d'enseignements d'examiner le fonctionnement des différents modules sur un bassin significativement affecté par les couverts neigeux comme celui de la Moselotte à Vagnez au printemps 1975. Les hydrogrammes obtenus sont présentés en Figure 32. Ils doivent être comparés aux Figures 2 et 6.

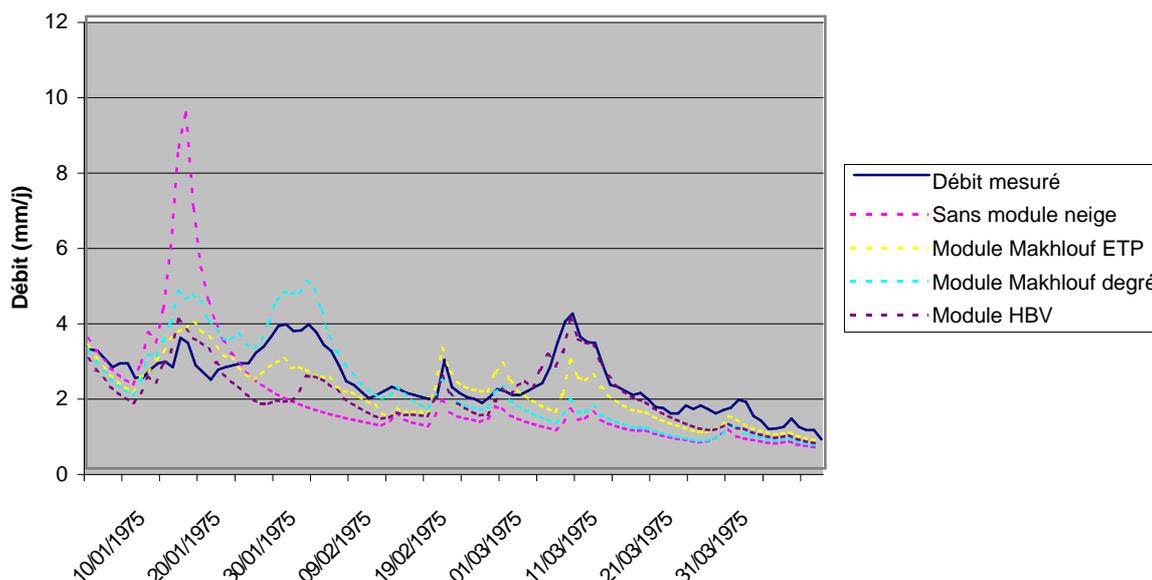
Une chute de neige importante a lieu à la mi-février. GR4J simule alors une « fausse crue ». Les trois modules proposés ont un effet écrêteur plus ou moins marqué sur cette crue, puisqu'ils permettent la mise en réserve de la neige. La meilleure simulation est l'œuvre du module HBV.

Du 25 février au 7 mars environ une bonne partie de la neige accumulée fond, puisque les débits observés sont importants alors qu'on n'enregistre pas de précipitations

supplémentaires. Le module Makhlouf degré relargue tout le stock qu'il avait constitué, de sorte que les débits sont un peu surestimés. Le module HBV tend au contraire tend à ne pas permettre la fonte, les débits sont alors sous-estimés.

Après une période trop complexe pour pouvoir être bien comprise, la saison hivernale se termine début avril par une petite crue vraisemblablement d'origine pluvio-nivale. Celle-ci est très bien vue par le module HBV. Le module Makhlouf degré, n'ayant plus de neige en stock, est incapable de la simuler. Une fois cet épisode terminé, tous les modules donnent des résultats identiques puisque la neige a disparu du bassin.

Figure 32: Débit de la Moselotte à Vagnez (3)



Ceci permet de tirer des conclusions quant aux domaines d'utilisation des différents modules : Le module Makhlouf ETP n'est jamais le plus proche des débits observés mais il prend en compte à peu près tous les épisodes d'accumulation et de fonte. Ceci confirme qu'il est le plus largement utilisable sans grands risques.

Le module Makhlouf degré est un peu moins performant sur les accumulations et relargue très vite la neige stockée. On peut penser que son usage est ainsi à réserver aux bassins où la neige est abondante lorsqu'elle tombe mais très peu persistante.

Le module HBV se montre ici particulièrement performant : la mise en réserve de la neige et son relargage tardif sont très bien traduits. Seule la fonte précoce est un peu moins bien rendue. Ce module semble donc être le plus adapté à des couverts neigeux importants et durables, ce qui n'est pas étonnant étant donné qu'il s'agit d'un modèle scandinave. Il se montre ici à son avantage parce que le bassin de la Moselotte est l'un des plus enneigés des bassins étudiés et qu'en 1975 les chutes de neige y ont, qui plus est, été particulièrement abondantes.

II. GR4J et les couverts neigeux

1. Principes généraux dégagés

Cette étude a permis de dégager un certain nombre de remarques concernant l'utilisation de GR4J sur des bassins affectés par les couverts neigeux.

1.1. Nombre de paramètres optimisés

Les modules neiges construits possédaient de zéro à deux paramètres à caler. Les problèmes rencontrés initialement par le module HBV ont montré que GR4J, qui ne compte que quatre paramètres à caler, était déstabilisé par deux paramètres supplémentaires. En conséquence il convient de se limiter à un seul paramètre pour le module neige. Et il est même possible d'obtenir des résultats corrects sans en rajouter (cas des modules Makhoulouf degré et Makhoulouf ETP).

1.2. Sensibilité à la donnée d'ETP

GR4J est réputé être assez peu sensible à la donnée d'ETP (Andréassian et al., 2002). Cette étude est globalement en accord avec ce résultat. D'une part les critères de Nash moyens ne sont modifiés que de quelques dixièmes de points par la soustraction de l'énergie de fonte. D'autre part le remplacement des ETP interannuelles par des ETP datées n'améliore pas les résultats, même lorsque la fonte est calculée à partir de la donnée d'ETP.

1.3. Utilisation de la méthode des degrés-jours

La méthode des degrés-jour est très largement utilisée pour la modélisation des couverts neigeux. Deux résultats exposés notamment par Rango et Martinec (1995) sont étayés par les travaux effectués sur le module Makhoulouf degré: Tout d'abord la méthode n'est robuste qu'avec un facteur de fonte variable qui tient compte des variations d'insolation au cours de la saison. Ensuite le facteur de fonte à considérer à l'échelle du bassin versant est légèrement inférieur à celui obtenu par des mesures ponctuelles au lysimètre.

Deux autres remarques peuvent également être faites : Lorsque la méthode des degrés jours est utilisée (modules Makhoulouf degré et HBV), la soustraction de l'énergie de fonte dégrade le résultat, alors qu'elle l'améliore le reste du temps (modules Makhoulouf ETP et Meslier). Il semble donc que la méthode constitue un substitut à un bilan d'énergie complet, et qu'il ne faut par conséquent plus procéder d'autorité à d'autres corrections. Il convient également de noter que lorsque le module ne permet pas le regel, il s'en accommode avec une température seuil légèrement plus élevée de façon à ne reproduire que les fontes réellement significatives.

2. Sensibilité du modèle non traduite en terme de critère de Nash

Figure 33: Paramètre x1, impact du module Makhoulouf ETP

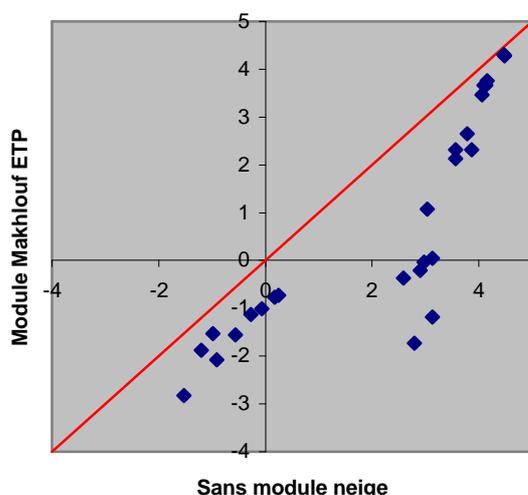
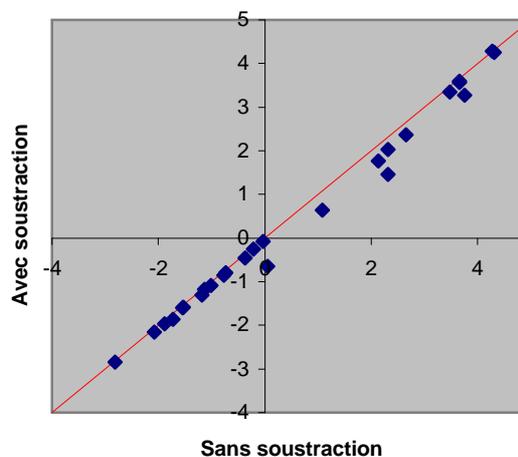


Figure 34: Paramètre x1, impact de la soustraction de l'énergie de fonte



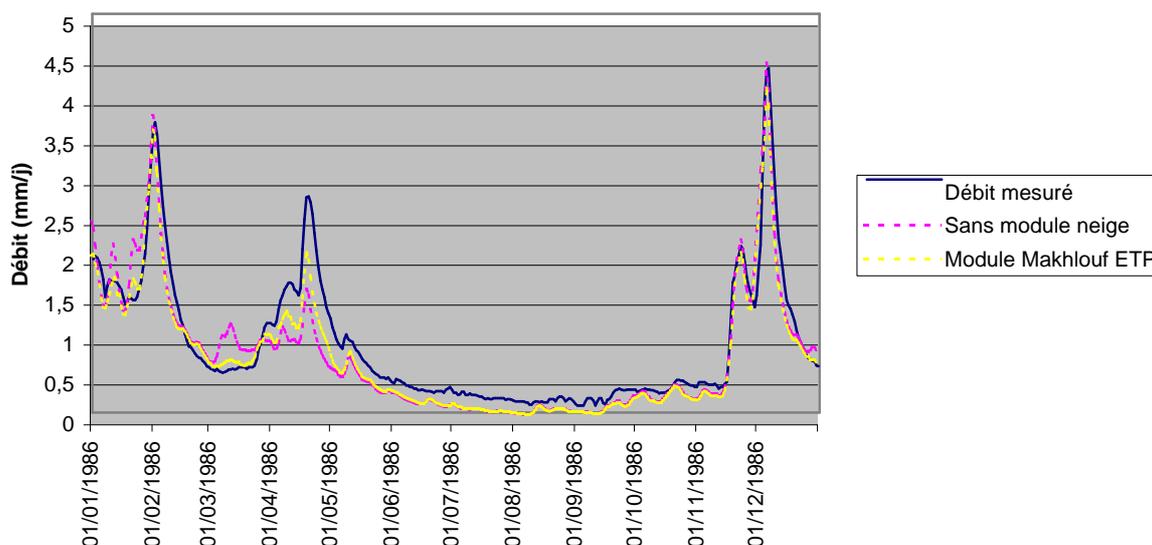
Le module GR4J se comporte relativement bien sans aucun module neige sur les 70 bassins versants étudiés. Il a de ce fait été jugé intéressant d'étudier si une sensibilité du modèle aux couverts neigeux non traduite en terme de critère de Nash pouvait être mise en évidence. Pour ce faire ont été comparées les valeurs des paramètres du modèle GR4J (cf. Annexe 1) obtenues lors du calage sans module neige et avec le module Makhoulf ETP, sans puis avec soustraction de l'équivalent énergétique de la fonte. Les bassins versants utilisés sont les bassins les plus enneigés définis au chapitre quatre.

Il est apparu que GR4J s'accommode des couverts neigeux en jouant lors du calage sur les paramètres qui contraignent les rythmes d'écoulement, c'est à dire les paramètres échanges souterrains (x1) et durée de l'hydrogramme unitaire (x3). Les paramètres de capacité des réservoirs de production (x4) et de routage (x2) ne sont pas modifiés par la présence du module. La soustraction de l'énergie de fonte modifie quant à elle uniquement et dans une moindre mesure le paramètre d'échanges souterrains. Les résultats concernant le paramètre x1 sont représentés en Figures 33 et 34 sous la forme de nuages de points. Sans module neige, la distribution de x1 est bimodale alors que cette bizarrerie disparaît avec le module neige.

3. Que peut-on espérer d'un module neige ?

Cette discussion sera illustrée par la Figure 35 concernant le bassin de la Seine à Bar sur Seine au printemps 1986. Il s'agit d'un bassin de 2340 km² et d'une altitude moyenne de 148 m.

Figure 35: Débit de la Seine à Bar sur Seine



3.1. Un gain limité mais significatif

Les débits simulés sans module neige et avec le module Makhoulf ETP sont identiques à partir de la fin du mois d'avril. Ceci traduit la disparition totale de la neige sur le bassin versant. Si l'on ajoute que ce bassin n'est que très exceptionnellement affecté par les couverts neigeux (sur 25 ans de données, 1986 est l'une des seules années pour lesquelles les rythmes d'écoulement sont clairement modifiés par les épisodes d'accumulation/fonte), il devient évident que cette étude a concerné un phénomène extrêmement limité dans l'espace (les parties les plus élevées du bassin) et dans le temps (quelques mois tout au plus dans l'année). En conséquence l'ajout d'un module neige à un modèle pluie-débit ne peut prétendre améliorer la modélisation que dans des proportions très modestes. Dans cette optique les gains de Nash moyen de l'ordre de un point qui ont été obtenus apparaissent significatifs et d'un ordre de grandeur conforme à ce qui pouvait être espéré.

3.2. Des débits reproduits imparfaitement

Sur la Figure 35 il est clair que le bassin de la Seine à Bar sur Seine est très bien modélisé avec GR4J : La période d'étiage estival et la crue de début décembre sont parfaitement reproduites. Seul le phénomène neigeux perturbe le modèle au cours des premiers mois de l'année : les accumulations en janvier/février et début mars sont négligées ce qui se traduit par de fausses crues simulées. Le soutient des débits par relarguage en mars/avril est alors logiquement impossible. L'ajout du module neige est très loin de permettre une modélisation parfaite de ces phénomènes et d'atteindre ainsi l'efficacité qui est obtenue avec GR4J le reste de l'année. Néanmoins les erreurs sont moins importantes: une partie de la neige est effectivement mise en réserve par le modèle de janvier à début mars, ce qui fait baisser les débits simulés. La fonte de ce stock permet ensuite d'augmenter les débits simulés et de se rapprocher ainsi des débits observés.

Ceci reflète la difficulté à appréhender la neige à l'échelle du bassin versant. La physique du paquet neigeux et la variabilité spatiale des phénomènes d'accumulation/fonte sont beaucoup trop compliquées pour permettre une modélisation précise et réaliste des phénomènes élémentaires avec l'approche qui a été choisie : il semble très délicat de pouvoir concilier hydrologie opérationnelle, représentation conceptuelle physiquement satisfaisante de la neige et simulation fine de tous les épisodes de stockage et relarguage de l'eau de fonte. Cette étude suggère cependant qu'il est possible via l'utilisation d'un module neige simple d'arriver à une légère amélioration de l'estimation des rythmes d'écoulement sans altérer le potentiel opérationnel d'un modèle.

3.3. Des hydrogrammes difficiles à interpréter

Il convient enfin de nuancer l'impression laissée par la Figure 35 sur laquelle l'influence du phénomène neigeux est très nette. Sur la plupart des bassins étudiés les hydrogrammes sont très difficiles à interpréter neuf années sur dix : le gain obtenu avec le module neige est très diffus et souvent très modeste.

III. Spécificité des couverts temporaires

Il est également possible de faire quelques remarques concernant la spécificité de la modélisation des couverts temporaires.

1. Semi-distribution

Cette étude a mis en évidence la supériorité d'une approche semi-distribuée sur une approche globale pour la modélisation des couverts neigeux temporaires : Les modules utilisant la semi-distribution (HBV et Makhoul) se sont révélés plus efficaces que les globaux (Meslier). De plus le fonctionnement des modules distribués a été fortement perturbé lorsqu'ils ont été modifiés en introduisant une description globale du bassin versant. Ceci reflète l'extrême variabilité spatiale du phénomène neigeux et des processus d'accumulation/fonte sous l'effet des gradients orographiques de température (Fergusson 1999).

2. Majoration et répartition neige/pluie

Il est généralement admis que la précipitation neigeuse doit être systématiquement majorée. Cette étude a montré qu'un facteur 1,3 semble raisonnable. Mais elle a surtout établi que pour les couverts temporaires il convenait de compter immédiatement les deux tiers de cette précipitation majorée comme de la pluie. Cette opération est réellement indispensable pour obtenir un fonctionnement correct du modèle ainsi que l'ont montré les travaux réalisés sur le

module HBV. Ceci traduit le forçage climatique exercé sur les bassins affectés par les couverts temporaires : la température est très souvent proche de zéro degrés de sorte que les précipitations sont souvent constituées d'un mélange pluie-neige et qu'une partie de la neige accumulée fond très vite sans constituer un manteau stable.

3. Routage de l'eau de fonte

Le comportement du module HBV a montré qu'il convenait de faire transiter l'eau de fonte directement jusqu'au réservoir sol sans passage par un réservoir neige supplémentaire. Le paquet neigeux est, dans le cas des couverts temporaires, proche du point de fusion durant une grande partie de la saison. Les variations brusques de températures n'ont pas toujours le temps d'être traduites en terme de regel de sorte que la percolation de l'eau de fonte est facile, rapide et quasi permanente.

IV. Fonctionnement du modèle sur un bassin nival

1. Principe et résultats

Cette étude s'intéressait spécifiquement aux bassins affectés par les couverts temporaires. Il a néanmoins été jugé pertinent de faire fonctionner les différents modules neiges construits sur un bassin à régime nival afin de tester leur aptitude à s'accommoder de couverts neigeux très importants. Le bassin choisi est celui de la rivière arménienne Kassakh présenté au chapitre 1. Quatre années de données étaient disponibles. Il a donc fallu se contenter de périodes de calage/contrôle de deux ans. Les différents modules sont successivement essayés en calage puis en contrôle sur les deux périodes. Les résultats sont présentés dans le Tableau 10.

Tableau 10: Fonctionnement des différents modules sur le bassin de la rivière Kassakh

	Critère de Nash	
	Calage sur 1961-63	Calage sur 1963-65
Sans module neige	52,1	31,1
Module Makhlouf ETP sans soustraction	7,7	6,5
Module Makhlouf ETP avec soustraction	9,1	21,9
Module Makhlouf degré sans soustraction	24,3	24
Module Makhlouf degré avec soustraction	4,9	-2,8
Module HBV sans soustraction	63,2	43,8
Module HBV avec soustraction	55,2	36,3

2. Commentaires :

Les résultats en terme de critère de Nash sont globalement assez mauvais. Ceci n'est guère étonnant : le bassin de la Kassakh est un bassin de haute montagne avec de très forts gradients orographiques de température et de précipitation et un régime strictement nival. Vouloir le modéliser correctement avec un modèle aussi simple que GR4J paraît donc illusoire. Néanmoins deux remarques peuvent être faites : les modules Makhlouf degré et Makhlouf ETP dégradent fortement le résultat obtenu sans module neige. Ceci traduit une forte spécificité de ces modules aux couverts temporaires (notamment au niveau du doublet majoration/part de pluie) et indique qu'il faudra réserver ces modules aux bassins affectés par des couverts peu persistants. Le module HBV apporte par contre un gain très net de 11 points sur l'une des périodes et de 13 points sur l'autre. Il confirme ainsi son bon comportement sur les couverts neigeux importants et notamment sa capacité à s'accommoder de longs retards à l'écoulement.

CONCLUSION

La modélisation des couverts temporaires restera vraisemblablement toujours problématique étant donné leur extrême variabilité spatiale. Les modèles physiques sont incompatibles avec les impératifs de l'hydrologie opérationnelle tandis que les modèles conceptuels sont difficiles à interpréter car il est souvent délicat de faire le lien entre leur comportement et les observations de terrain. Du fait de l'approche globale et parcimonieuse qui est la sienne, GR4J semble particulièrement peu indiqué pour prendre en compte le phénomène neigeux. Cette étude a néanmoins établi qu'il était possible d'améliorer légèrement la modélisation d'un grand nombre de bassins versants via un module neige sans pour autant alourdir le modèle. Il est apparu souhaitable de recourir à une description semi-distribuée au moins très grossière pour l'extrapolation des données météorologiques et le suivi de l'évolution du paquet neigeux. Une fonction de production basée sur les degrés-jours a donné des résultats satisfaisants dès lors que les variations d'insolation étaient prises en compte. Mais une formalisation encore plus rudimentaire s'appuyant sur l'énergie disponible sous forme d'ETP s'est montrée tout aussi efficace. La spécificité des couverts temporaires s'est avérée résider dans la nécessité de compter une part de la précipitation neigeuse comme de la pluie et dans le routage sans délais de l'eau de fonte jusqu'au réservoir sol.

Trois modules neiges différents ont pu être validés par des simulations systématiques sur soixante dix bassins versants français. Ces modules sont susceptibles de fonctionner correctement sur un grand nombre de bassins affectés par les couverts temporaires en France et dans des régions où règnent des conditions hydroclimatiques similaires. L'utilisateur peut espérer un gain moyen de un point de Nash environ, à moins de conditions exceptionnelles (fortes chutes de neige...). L'amélioration ainsi obtenue est peu apparente sur les hydrogrammes car souvent diffuse et modérée. La neige reste en effet à l'échelle des bassins versants étudiés un épiphénomène qui n'influence les écoulements que de façon très modeste. Néanmoins l'utilisation de ces modules est sans grands risques puisqu'ils ne sont pas susceptibles d'occasionner de dysfonctionnement du modèle dans son ensemble.

Il semble donc possible d'envisager une utilisation du modèle GR4J sur des bassins où une partie des précipitations se produit sous forme de neige. Dans cette optique une validation des modules construits sur un plus large échantillon de bassins, notamment des bassins froids, semble nécessaire. Un important travail reste également à accomplir sur le problème du critère pluie-neige. Ces travaux ont en effet supposé que la discrimination pluie-neige était toujours faite au moment de la mesure, ce qui est en fait assez rarement le cas. Un module neige doit donc être capable en fonction d'autres données (température, relief...) de décider sous quel état se situe la donnée qu'il traite, ce qui est très loin d'être trivial. Une fois cette étape franchie, il sera possible d'envisager sérieusement des applications opérationnelles concernant notamment les dangereuses crues pluvio-nivales. Des tests du modèle en prévision seront alors sans doute nécessaires.

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement tout les membres du groupe hydrologie du Cemagref Antony pour m'avoir confié cette étude et contribué par leurs remarques et leurs idées à son avancement. Je remercie tout particulièrement Vazken Andréassian et Claude Michel pour tout le temps qu'ils m'ont consacré et pour les connaissances et l'expérience dont ils m'ont fait profiter.

Références

- [1] Abbott, M. B., J. C. Bathurst, et al. (1986). "An introduction to the European Hydrological System -Système Hydrologique Européen, 'SHE', 1: History and philosophy of a physically-based distributed modelling system." Journal of Hydrology **87**: 45-59.
- [2] Anderson, E. A. (1968). "Development and testing of snow pack energy equations." Water Resources Research **4(1)**: 19-37.
- [3] Anderson, E. A. (1976). A point energy and mass balance model of a snow cover. Silver Spring, U.S. Dep. of commerce.
- [4] Andréassian, V., C. Perrin, et al. (2002). "Impact of imperfect potential evapotranspiration knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models." soumis à Journal of hydrology.
- [5] Andréassian, V., C. Perrin, et al. (2001). "Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models." Journal of Hydrology: 206-223.
- [6] Barry, R., M. Prévost, et al. (1990). "Application of a Snow Cover Energy and Mass Balance Model in a balsam fir forest." Water Resources Research **26**: 1079-1092.
- [7] Bergström, S. (1975). "The development of a snow routine for the HBV-2 model." Nordic hydrology **6**: 73-92.
- [8] Bergström, S. (1995). The HBV Model. Computer models in watershed hydrology. V. P. Singh ed. , Water Resources Publications, Colorado, USA: 443-476.
- [9] Beven, K. J. (1989). "Changing ideas in hydrology: the case of physically based models." Journal of Hydrology **105**: 157-172.
- [10] Beven, K. J. and M. J. Kirkby (1979). "A physically based contributing area model of basin hydrology." Hydrological Sciences Bulletin **24(1)**: 43-69.
- [11] Blöschl, G., R. Kirnbauer, et al. (1990). "Modelling snowmelt in a mountainous river basin on an event basis." Journal of Hydrology **113**: 207-229.
- [12] Bras (1978). Air temperature as an index of snowmelt. Introduction to Scientific Hydrology.
- [13] Brubaker, K., A. Rango, et al. (1996). "Incorporating radiation inputs into the Snowmelt Runoff Model." Hydrological processes **10**: 1329-1343.
- [14] Dunn, S. M. and R. J. E. Colohan (1999). "Developing the snow component of a distributed hydrological model: a step-wise approach based on multi-objective analysis." Journal of Hydrology **223**: 1-16.
- [15] Dunn, S. M., E. McAlister, et al. (1998). "Development and application of a distributed catchment-scale hydrological model for the River Ythan, NE Scotland." Hydrological processes **12**: 401-416.
- [16] Edijatno and C. Michel (1989). "Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres." La Houille Blanche **2**.
- [17] Edijatno, N. d. O. Nascimento, et al. (1999). "GR3J: a daily watershed model with three free parameters." Hydrological Sciences **4**.
- [18] Faye, C. (1995). Modélisation pluie-débit dans le bassin de l'Allier, mémoire de DEA, CEMAGREF Antony division hydrologie: 40p.
- [19] Ferguson, R. I. (1999). "Snowmelt runoff models." Progress in Physical Geography **23(2)**: 205-227.
- [20] Fontaine, T. A., T. S. Cruickshank, et al. (2002). "Development of a snowfall-snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT)." Journal of Hydrology, article in press.
- [21] Hanson, C. L. (2001). "Long-term precipitation database, Reynolds Creek Experimental Watershed, Idaho, United States." Water Resources Research **11**: 2831-2834.
- [22] Hinzman, L. D. and D. L. Kane (1991). "Snow hydrology of a headwater arctic basin. Conceptual analysis and computer modelling." Water Resources Research **27**: 1111-1121.
- [23] Hsu, K. L., H. V. Gupta, et al. (1995). "Artificial neural network modelling for the rainfall-runoff process." Water Resources Research **31 (10)**: 2517-2530.

- [24] Humbert, J. (1986). "Estimation et rôle de la fonte nivale dans l'écoulement de crue des rivières des Hautes Vosges (bassin de la Fecht, Haut-Rhin)." Revue géographique de l'Est: 1-18.
- [25] Jaekeman, A. J., I. G. Littlewood, et al. (1990). "Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flows with application to two small upland catchments." Journal of Hydrology **117**: 275-300.
- [26] Koivusalo, H. and H. Heikinheimo (1999). "Surface energy exchange over a boreal snowpack: comparison of two snow energy balance models." Hydrological processes **13 (14-15)**: 2395-2408.
- [27] Kokkonen, T., H. Koivusalo, et al. (2001). "A semi-distributed approach to rainfall-runoff modelling: a case study in a snow affected catchment." Environmental modelling and software **16**: 481-493.
- [28] Kongoli, C. E. and W. L. Bland (2000). "Long-term snow depth simulations using a modified atmosphere-land exchange model." Agricultural and Forest Meteorology **104**: 273-287.
- [29] Kustas, W. and A. Rango (1994). "A simple energy budget algorithm for the Snowmelt Runoff Model." Water Resources Research **30**: 1515-1527.
- [30] Kuusisto, E. (1980). "On the values and Variability of degree-day melting factor in Finland." Nordic hydrology **11**: 235-242.
- [31] Liden, R. and J. Harlin (2000). "Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates." Journal of Hydrology **238**: 231-247.
- [32] Lindström, G., B. Johansson, et al. (1997). "Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model." Journal of Hydrology **201**: 272-288.
- [33] Llamas, J. (1993). Neige: formation, propriétés et fonte. Hydrologie générale, principe et applications. G. M. Editeur. Québec, Canada: 415-451.
- [34] Makhlouf, Z. (1994). Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres, thèse de doctorat, Université Paris-Sud, CEMAGREF Antony division hydrologie: 343p.
- [35] Makhlouf, Z. and C. Michel (1994). "A two-parameter monthly water balance model for French watersheds." Journal of Hydrology **162**: 299-318.
- [36] Martin, E., Y. Lejeune, et al. (1996). Modélisation hydrométéorologique de l'aléa de crue nivo-pluviale, CEMAGREF, Météo France.
- [37] Martinec, J. (1960). The degree-day factor for snowmelt-runoff forecasting, IUGG General Assembly of Helsinki, IAHS Publ. No 51: 468-477.
- [38] Martinec, J. (1975). "Snowmelt Runoff Model for stream flow forecasts." Nordic hydrology **6,3**: 145-154.
- [39] Martinec, J. and A. Rango (1986). "Parameter values for snowmelt runoff modelling." Journal of Hydrology **84**: 197-219.
- [40] Martinec, J., A. Rango, et al. (1994). The Snowmelt Runoff Model user's manual. Washington, D. C., NASA Reference Publ. No. 1100.
- [41] Micovic, Z. and M. C. Quick (1999). "A rainfall and snowmelt runoff modelling approach to flow estimation at ungauged sites in British Columbia." Journal of Hydrology **226**: 101-120.
- [42] Moore, R. D. (1993). "Application of a conceptual streamflow model in a glacierized drainage basin." Journal of Hydrology **150**: 151-168.
- [43] Nascimento, N. d. O. (1995). Appréciation à l'aide d'un modèle empirique des effets d'action anthropique sur la relation pluie-débit à l'échelle du bassin versant, thèse de doctorat, CERGREN/ENPC, Paris: 550p.
- [44] Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe (1970). "River flow forecasting through conceptual models. Part one: a discussion of principles." Journal of Hydrology **27**: 282-290.
- [45] Oddbjorn, B. and A. Kilingtveit (2002). "An energy balance based HBV-model with application to an arctic watershed on Svalbard, Spitsbergen." Nordic hydrology **33**: 123-144.
- [46] Perrin, C. (2000). Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble: 515p.
- [47] Perrin, C., C. Michel, et al. (2001). "Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments." Journal of Hydrology **242**: 275-301.

- [48] Prévost, M., R. Barry, et al. (1990). "Snowmelt runoff modelling in a balsam fir forest with a Variable Source Area Simulator (VSAS2)." Water Resources Research **26 (5)**: 1066-1070.
- [49] Quick, M. C. (1995). The UBC watershed model. Computer Models of Watershed hydrology. V. P. Singh ed. , Water Resources Publications, Colorado, USA: 233-280.
- [50] Rakem, Y. (1999). Analyse critique et reformulation mathématique d'un modèle empirique pluie-débit (GR4J), Thèse de doctorat, ENPC, Paris: 263p.
- [51] Rango, A. and J. Martinec (1981). "Accuracy of Snowmelt Runoff Simulation." Nordic hydrology **12**: 265-274.
- [52] Rango, A. and J. Martinec (1994). "Model accuracy in snowmelt runoff forecasts extending from 1 to 20 days." Water Resources Bulletin **30 (3)**: 463-470.
- [53] Rango, A. and J. Martinec (1995). "Revisiting the degree-day method for snowmelt computations." Water Resources Bulletin **31**: 657-669.
- [54] Salas, J. D. (1993). Analysis and modelling of hydrologic time series. Chapter 19. Handbook of hydrology. R. D. Maidment ed. , McGraw Hill, 1412p.
- [55] Schreider, S. Y., P. H. Whetton, et al. (2002). "Runoff Modelling for snow-affected catchments in the Australian alpine region, Eastern Victoria." Journal of Hydrology, article in press.
- [56] Servat, E. and A. Dezetter (1992). "Modélisation de la relation pluie-débit et estimation des apports en eau dans le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire." Hydrologie Continentale **7(2)**: 129-142.
- [57] Seyfried, M. S., C. L. Hanson, et al. (2001). "Long-term lysimeter database, Reynolds Creek Experimental Watershed, Idaho, United States." Water Resources Research **11**: 2853-2856.
- [58] Singh, P., N. Kumar, et al. (2000). "Degree-days factors for snow and ice for Dokriani Glacier, Garhwal Himalayas." Journal of Hydrology **235**: 1-11.
- [59] Slaughter, C. W., D. Marks, et al. (2001). "Thirty-five years of research data collection at the Reynolds Creek Experimental Watershed, Idaho, United States." Water Resources Research **37**: 2819-2823.
- [60] Sorteberg, H. K., R. V. Engeset, et al. (2001). "A national network for snow monitoring in Norway: snow pillow verification using observations and models." Phys. Chem. Earth **26**: 723-729.
- [61] Tashner, S., R. Ludwig, et al. (2001). "Multi-scenario flood modelling in a mountain watershed using data from a NWP model, rain Radar and rain gauges." Phys. Chem. Earth **26**: 509-515.
- [62] U.S. Army Corps of Engineers (1956). Snow Hydrology. North Pacific division, Portland, Oregon, USA.
- [63] WMO (1964). Guide for Hydrometeorological Practices, World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland.
- [64] WMO (1986). Intercomparison of models of snowmelt runoff, Operational Hydrology Report No 23, WMO n°646. World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland.
- [65] Yang, X. and C. Michel (2000). "Flood forecasting with a watershed model: a new method of parameter updating." Hydrological Sciences Journal.
- [66] Yang, X., C. Michel, et al. (1991). "Gestion d'un réservoir pour la régularisation des débits." La Houille Blanche **6**: 443-440.

Liste des Figures et des Tableaux

Figure 1: Débit de la rivière Kassakh à Zovouni.....	7
Figure 2: Débit de la Moselotte à Vagnez.....	8
Figure 3: Structure du modèle GR4J, version Perrin 2000.....	15
Figure 4: Distribution des bassins versants selon le nombre de jours de neige annuels.....	18
Figure 5: Carte de situation géographique.....	19
Figure 6: Débit de la Moselotte à Vagnez (2).....	27
Figure 7: Ajustement des paramètres X1 et X2 du module Makhlouf ETP (sans soustraction).....	29
Figure 8: Ajustement des paramètres X3 et X4 du module Makhlouf ETP (sans soustraction).....	30
Figure 9: Ajustement des paramètres X1 et X2 du module Makhlouf ETP (avec soustraction).....	30
Figure 10: Ajustement des paramètres X1 et X2 du module Makhlouf ETP (avec soustraction).....	31
Figure 11: Distribution des critères de Nash, module Makhlouf ETP.....	32
Figure 12: Distribution des critères de Nash pour les bassins enneigés, module Makhlouf ETP.....	32
Figure 13: Introduction d'ETP datées, module Makhlouf ETP.....	33
Figure 14: Ajustement des paramètres X1 et X2 du module Makhlouf dégradé (sans soustraction).....	34
Figure 15: Ajustement des paramètres X1 et X2 du module Makhlouf dégradé (avec soustraction).....	34
Figure 16: Ajustement du paramètre X3 du module Makhlouf dégradé.....	35
Figure 17: Ajustement du facteur de fonte pour le module Makhlouf dégradé.....	36
Figure 18: Ajustement de la Température seuil pour le module Makhlouf dégradé (facteur fixe).....	36
Figure 19: Ajustement du facteur de fonte variable pour le module Makhlouf dégradé.....	37
Figure 20: Ajustement de la Température seuil pour le module Makhlouf dégradé (facteur variable).....	37
Figure 21: Distribution des critères de Nash, module Makhlouf dégradé.....	38
Figure 22: Ajustement du paramètre X1 du module HBV.....	39
Figure 23: Ajustement du paramètre X2 du module HBV.....	39
Figure 24: Ajustement du paramètre X3 du module HBV.....	39
Figure 25: Introduction d'une Température seuil fixe pour le module HBV.....	40
Figure 26: Module HBV, une part de neige est comptée comme pluie.....	41
Figure 27: Distribution des critères de Nash après ajustement du module HBV.....	42
Figure 28: Ajustement du paramètre X1 du module Meslier.....	43
Figure 29: Ajustement du paramètre X2 du module Meslier.....	43
Figure 30: Température seuil fixe pour le module Meslier.....	44
Figure 31: Module Meslier, une part de la neige est comptée comme pluie.....	44
Figure 32: Débit de la Moselotte à Vagnez (3).....	46
Figure 33: Paramètre x1 : impact du module Makhlouf ETP.....	47
Figure 34: Paramètre x1 : impact de la soustraction de l'énergie de fonte.....	47
Figure 35: Débit de la Seine à Bar sur Seine.....	48
Tableau 1: Facteur de fonte selon WMO.....	12
Tableau 2: Valeurs limites du facteur de fonte selon Anderson.....	13
Tableau 3: Liste des stations hydrométriques utilisées.....	22
Tableau 4: Fonctionnement des différents modules dans leur version initiale.....	26
Tableau 5: Fonctionnement des différents modules sur les bassins les plus enneigés.....	27
Tableau 6: Fonctionnement du module Makhlouf ETP dans sa configuration optimale.....	31
Tableau 7: Fonctionnement du module Makhlouf dégradé dans sa configuration optimale.....	38
Tableau 8: Fonctionnement du module HBV dégradé dans sa configuration optimale.....	42
Tableau 9: Efficacité comparée des différents modules neige.....	45
Tableau 10 : Fonctionnement des différents module sur le bassin de la rivière Kassakh.....	50

ANNEXES

Annexe 1 : Description mathématique du modèle GR4J

La description de la version du modèle GR4J proposée par Nascimento (1995) est présentée ici.

Trois ou quatre paramètres sont optimisés :

A ou x4 : capacité maximale du réservoir de production (fixée à 330 mm dans GR3J d'Edijatno *et al.*, 1999)

B ou x2 : capacité maximale du réservoir de routage

C ou x3 : durée de l'hydrogramme unitaire

D ou x1 : paramètre d'échanges souterrains

.

Neutralisation :

La pluie brute subit l'évapotranspiration potentielle ETP. La pluie nette P_n est alors déterminée par :

$$\begin{array}{llll} \text{- si} & P \geq E & \text{alors} & P_n = P - E \quad \text{et} \quad E_n = 0 \\ \text{- si} & P < E & \text{alors} & P_n = 0 \quad \text{et} \quad E_n = E - P \end{array}$$

Réservoir de production :

Lorsqu'il reste une pluie dP_n , la partie allant dans le réservoir sol est dP_s et l'autre partie dP_r transite vers l'exutoire :

$$\begin{aligned} dP_r &= \left(\frac{S}{A} \right)^2 \cdot dP_n \\ dP_s &= \left[1 - \left(\frac{S}{A} \right)^2 \right] \cdot dP_n \end{aligned}$$

où S est le niveau dans le réservoir sol et A la capacité maximale de ce réservoir. Le variation du niveau du réservoir sol est $dS = dP_s$ et le niveau est mis à jour suivant :

$$S_{k+1} = \frac{S_k + A \cdot \tanh(P_n / A)}{1 + (S_k / A) \cdot \tanh(P_n / A)}$$

Dans le cas où toute la pluie est consommée lors de l'interception, le restant E_n d'ETP sert à faire évaporer l'eau contenue dans le réservoir sol, à un taux commandé par une fonction du niveau dans le réservoir sol. La variation du niveau est :

$$\begin{aligned} dS &= -dE_s \\ \text{avec} \quad dE_s &= (S / A) \cdot [2 - (S / A)] \cdot dE_n \end{aligned}$$

Le niveau du réservoir est mis à jour suivant :

$$S_{k+1} = S_k \frac{1 - \tanh(E_n / A)}{1 + [1 - S_k / A] \cdot \tanh(E_n / A)}$$

Séparation des composantes de l'écoulement :

La pluie est séparée en deux composantes. Un écoulement pseudo-direct est routé par un hydrogramme unitaire et représente 10 % de la pluie efficace; L'autre partie de la pluie efficace (90 %) est routée par un hydrogramme unitaire et un réservoir de routage.

Hydrogramme unitaire :

Les deux composantes de l'écoulement subissent tout d'abord un retard progressif par action d'un hydrogramme unitaire qui permet de simuler le temps de montée de l'hydrogramme. Ces hydrogrammes sont caractérisés par

un temps de base C. L'écoulement transitant par le réservoir de routage est retardé par une fonction UH1 de la forme :

$$q(t) = \left(\frac{t}{C}\right)^3 \quad \text{pour } 0 \leq t \leq C$$

et

$$q(t) = 1 \quad \text{pour } t > C$$

où t est le temps. L'écoulement pseudo-direct est retardé par un hydrogramme UH2 du type :

$$q(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{t}{C}\right)^3 \quad \text{pour } 0 \leq t \leq C$$

$$q(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{C}\right)^3 \quad \text{pour } C < t \leq 2C$$

et

$$q(t) = 1 \quad \text{pour } t > 2C$$

Réservoir de routage :

Après avoir été retardé par l'hydrogramme unitaire, la principale composante d'écoulement transite par un réservoir de routage non linéaire qui se vidange suivant une loi :

$$Q_r(t) = K \cdot R(t)^5$$

où K est une constante et R le niveau dans le réservoir de routage. Le niveau du réservoir de routage est donc mis à jour d'après :

$$\frac{1}{R_{k+1}^4} = \frac{1}{R_k^4} + \frac{1}{B^4}$$

où B est la capacité maximale du réservoir de routage. On a posé $\frac{1}{B^4} = 4 \cdot K \cdot \Delta t$, avec $\Delta t = 1$ jour, pas de temps de fonctionnement. Le débit du réservoir est alors :

$$Q_r = R_{k-1} - R_k$$

Écoulement pseudo direct :

Après le retard induit par l'hydrogramme unitaire, l'écoulement pseudo-direct arrive directement à l'exutoire.

Terme d'échanges souterrains :

Un terme T permet de tenir compte des infiltrations profondes ou des échanges d'eau souterrains. Il dépend d'un paramètre D (négatif ou positif).

Si D est négatif, T est exprimé par :

$$T = D \cdot \frac{S}{A}$$

et est soustrait à l'écoulement direct Q_p et au niveau du réservoir de routage suivant (gain en eau pour le système):

$$Q_p = \max(0, Q_p - T)$$

et

$$R = \max(\varepsilon, R - T) \quad \text{où } \varepsilon \text{ a une valeur faible}$$

Si D est positif, on a alors :

$$T = D \cdot \frac{R}{B}$$

qui est appliqué aux deux composantes de l'écoulement comme précédemment (perte en eau pour le système). Dans la version d'Edijatno *et al.* (1999), deux modifications ont été réalisées : au niveau de la fonction de production et de la fonction d'échange. Dans cette version à trois paramètres, la capacité A du réservoir de production a été fixée à 330 mm.

Réservoir de production :

La partie de la pluie nette allant dans le réservoir sol est désormais donnée par :

$$P_s = \frac{P_n \left(1 - \left(\frac{S}{A} \right)^2 \right)}{1 + \left(\frac{P_n}{A} \right) \left(1 + \frac{S}{A} \right)}$$

où S est le niveau dans le réservoir sol et A la capacité maximale de ce réservoir. Cette capacité maximale est fixée à 330 mm. L'évapotranspiration est désormais déterminée par:

$$E_s = \frac{E_n \left(\frac{S}{A} \right) \left(2 - \frac{S}{A} \right)}{1 + \left(\frac{E_n}{A} \right) \left(2 - \frac{S}{A} \right)}$$

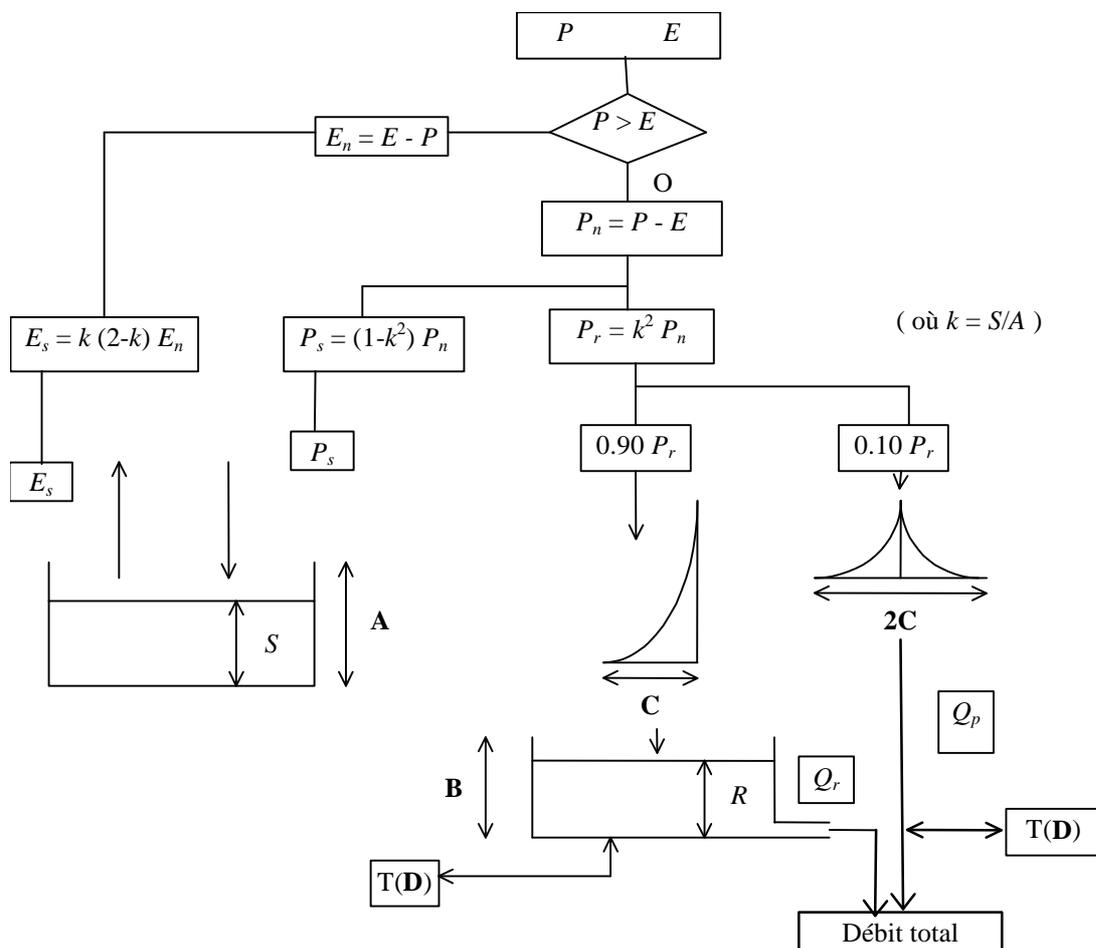
Terme d'échanges souterrains :

Le terme d'échange ici est exprimé par :

$$T = D \cdot \left(\frac{R}{B} \right)^4 \quad \text{pour } D \text{ positif ou négatif}$$

où D est le paramètre d'échange et B la capacité du réservoir de routage

Schéma structurel :



Annexe 2 : Les modules neiges construits

1. Module dérivé de Makhlouf.

```

SUBROUTINE NEJ1(X,XF,P,G,E,TN,TX)
PARAMETER (NPX=9,NH=10,NG=10,NGA=6*NH+NPX+4,NGB=NGA+NG-1)
PARAMETER (NPY=24,NPZ=NPX+NPY)
DIMENSION X(*),XF(*)
COMMON /IOZ/ IO(NPZ),LM(12)
NGC=NGA+NINT(G*NG)-1
TON=0.
FTN=0.
FTNE=0.
TOP=0.
DO 1 I=NGA,NGB
IF(I.LE.NGC)THEN
PI=P*XF(4)
TOP=TOP+PI
X(I)=X(I)+PI*XF(6)
TON=TON+PI*XF(6)
ELSE
TOP=TOP+P
IF(IO(14).EQ.0)FTE=7.4*XF(8)*MAX(0.,E-XF(5))
IF(IO(14).EQ.1)FTE=XF(8)*TX
FTP=XF(7)*P
FTI=FTE+FTP
IF(FTI.GE.X(I))THEN
IF(FTI.GT.0.)THEN
FTE=FTE*X(I)/FTI
FTP=FTP*X(I)/FTI
FTI=X(I)
ENDIF
ELSE
X(I)=X(I)-FTI
ENDIF
FTN=FTN+FTI
FTNE=FTNE+FTE
ENDIF
1 CONTINUE
P=(TOP-TON+FTN)/NG
IF(IO(15).EQ.1)E=MAX(0.,E-FTNE/NG/7.4)
END

```

2. Module dérivé de HBV

```

SUBROUTINE NEJ2(X,XV,XF,P,G,E,TN,TX)
PARAMETER (NPX=9,NH=10,NG=10,NGA=6*NH+NPX+4,NGB=NGA+NG-1)
PARAMETER (NL=NPX*(NPX+2)+6*NH+NG+4)
PARAMETER (NPY=24,NPZ=NPX+NPY)
DIMENSION X(*),XV(*),XF(*)
COMMON /IOZ/ IO(NPZ),LM(12)
NGC=NGA+NINT(G*NG)-1
FTN=0.
TOP=0.
FTT=0.

```

```

DO 1 I=NGA,NGB
K=NL+I-NGA+1
FON=0.
IF(I.LE.NGC)THEN
X(I)=X(I)+P*XF(4)
ELSE
TOP=TOP+P
IF(TX.GT.XV(5))THEN
FTE=MIN(X(I),XV(6)*(TX-XV(5)))
FTT=FTT+FTE
X(K)=X(K)+FTE
X(I)=X(I)-FTE
IF(X(K).GT.X(I)*XF(6))THEN
FON=X(K)-X(I)*XF(6)
X(K)=X(I)*XF(6)
ENDIF
ELSE
GEL=MIN(X(K),XF(5)*XV(6)*(XV(5)-TX))
X(K)=X(K)-GEL
X(I)=X(I)+GEL
ENDIF
FTN=FTN+FON
NDIF
1 CONTINUE
P=(TOP+FTN)/NG
IF(IO(15).EQ.1)E=MAX(0.,E-FTT/NG/7.4)
END

```

3. Module dérivé de Meslier

```

SUBROUTINE NEJ3(X,XV,XF,PN,G,E,TN,TX,PREC,FONT)
PARAMETER (NPX=9,NH=10,NG=10,NGA=6*NH+NPX+4,NGB=NGA+NG-1)
PARAMETER (NL=NPX*(NPX+2)+6*NH+NG+4)
PARAMETER (NPY=24,NPZ=NPX+NPY)
DIMENSION X(*),XV(*),XF(*)
COMMON /IOZ/ IO(NPZ),LM(12)
PREC=PN*(1.-G)
IF(TX.GT.XV(5))THEN
Z=(TX-XV(5))*X(NGA)
FONT=X(NGA)*Z/(Z+XF(5))
X(NGA)=X(NGA)-FONT
ELSE
FONT=0.
TAUX=MIN(1.,(XV(5)-TX)/XF(4))
X(NGA)=X(NGA)+PN*G*TAUX
PREC=PREC+(1.-TAUX)*PN*G
ENDIF
END

```

Annexe 3 : Ajustement des paramètres fixes du module Makhoul ETP

1. Ajustement des paramètres X1 et X2 sans soustraction

X2 \ X1	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
0	80,54	80,65	80,82	80,87	80,83	80,64	80,37	79,83	79,1	78,16	77,17
0.1	80,48	80,7	80,94	80,97	80,92	80,74	80,35	79,74	78,96	77,9	76,75
0.2	80,39	80,66	80,92	81,07	81,05	80,77	80,37	79,68	78,8	77,61	76,25
0.3	80,19	80,57	80,88	81,03	81,04	80,85	80,32	79,57	78,62	77,29	75,81
0.4	79,96	80,39	80,76	80,99	81	80,82	80,3	79,43	78,42	76,97	75,31
0.5	79,67	80,17	80,59	80,89	80,97	80,78	80,23	79,38	78,19	76,64	74,84
0.6	79,35	79,9	80,38	80,73	80,85	80,66	80,08	79,21	77,86	76,17	74,32
0.7	78,92	79,52	80,15	80,55	80,69	80,49	79,92	79	77,66	75,67	73,84
0.8	78,52	79,19	79,8	80,33	80,52	80,33	79,75	78,81	77,4	75,29	73,34
0.9	78,09	78,83	79,5	80,01	80,21	80,12	79,57	78,58	77,07	74,98	72,85
1	77,69	78,44	79,18	79,75	79,97	79,81	79,38	78,39	76,79	74,5	72,33

2. Ajustement des paramètres X3 et X4 sans soustraction

X3 \ X4	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	80,36	80,8	80,59	80,61	80,65	80,62	80,55	80,48	80,44	80,39	80,33
0,1	80,74	80,91	80,9	80,95	80,94	80,91	80,86	80,84	80,81	80,78	80,75
0,2	80,9	80,98	80,99	81,03	81,03	81,01	80,98	80,97	80,95	80,92	80,9
0,3	80,93	81,02	81,04	81,06	81,07	81,05	81,04	81,02	81	80,98	80,97
0,4	80,98	81,05	81,07	81,09	81,08	81,07	81,06	81,04	81,03	81,02	80,99
0,5	81	81,05	81,08	81,09	81,08	81,08	81,07	81,06	81,04	81,03	81,01
0,6	81,03	81,05	81,07	81,09	81,08	81,07	81,07	81,05	81,04	81,02	81,01
0,7	81,04	81,04	81,07	81,08	81,07	81,07	81,05	81,04	81,03	81,01	81
0,8	81,04	81,04	81,06	81,07	81,06	81,06	81,04	81,04	81,02	81	80,98
0,9	81,04	81,04	81,06	81,06	81,05	81,05	81,03	81,03	81	80,999	80,97
1	80,52	81,04	81,05	81,05	81,04	81,04	81,03	81,02	80,99	80,98	80,96

3. Ajustement des paramètres X1 et X2 avec soustraction

X2 \ X1	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
0	80,54	80,47	80,37	80,19	79,96	79,67	79,35	78,91	78,52	78,07	77,7
0,1	80,66	80,72	80,67	80,57	80,4	80,17	79,9	79,52	79,18	78,82	78,41
0,2	80,85	80,96	80,94	80,89	80,77	80,59	80,37	80,13	79,77	78,46	79,14
0,3	80,92	81,01	81,1	81,03	80,99	80,87	80,71	80,49	80,19	79,93	79,63
0,4	80,88	80,96	81,05	81,03	81,01	80,91	80,71	80,56	80,37	80,04	79,86
0,5	80,66	80,74	80,75	80,8	80,72	80,63	80,47	80,27	80,06	79,74	79,46
0,6	80,29	80,32	80,28	80,18	80,11	79,99	79,78	79,57	79,37	79,1	78,76
0,7	79,79	79,66	79,51	79,34	79,25	79,02	78,78	78,53	78,26	77,97	77,57
0,8	78,99	78,78	78,56	78,28	77,95	77,71	77,38	77,02	77,66	76,27	75,82
0,9	78	77,64	77,28	76,91	76,42	75,87	75,4	75,04	74,49	73,99	73,48
1	76,92	76,38	75,85	75,3	74,72	74,17	73,53	73,06	72,46	71,85	71,31

4. Ajustement des paramètres X3 et X4 avec soustraction

X3 \ X4	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	80,36	80,48	80,54	80,63	80,58	80,5	80,4	80,33	80,27	80,21	80,16
0,1	80,74	80,8	80,89	80,94	80,92	80,86	80,81	80,77	80,75	80,71	80,67
0,2	80,9	80,93	81,03	81,05	81,04	81	80,99	80,94	80,93	80,9	80,87
0,3	80,93	81,01	81,08	81,1	81,09	81,06	81,03	81	80,99	80,97	80,96
0,4	80,99	81,06	81,11	81,11	81,1	81,07	81,06	81,05	81,03	81,02	81
0,5	81,01	81,07	81,12	81,12	81,11	81,1	81,08	81,07	81,05	81,03	81,02
0,6	81,03	81,07	81,11	81,12	81,11	81,09	81,08	81,06	81,04	81,03	81,01
0,7	81,03	81,07	81,11	81,11	81,09	81,09	81,07	81,05	81,04	81,02	81
0,8	81,04	81,07	81,1	81,1	81,08	81,07	81,06	81,04	81,02	81,01	80,99
0,9	81,04	81,08	81,1	81,09	81,08	81,07	81,05	81,03	81,01	81	80,98
1	81,04	81,07	81,09	81,08	81,07	81,06	81,04	81,02	81,01	80,99	80,97

Annexe 4 : Ajustement des paramètres fixes du module Makhlouf degré

1. Ajustement des paramètres X1 et X2 sans impact de la fonte sur l'ETP

X2 \ X1	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
0	80,16	80,09	79,96	79,88	79,56	79,27	78,96	78,52	78,14	77,72	77,34
0,1	80,21	80,24	80,17	80,02	79,82	79,57	79,3	78,9	78,55	78,18	78,18
0,2	80,24	80,32	80,27	80,17	80,01	79,79	79,55	79,26	78,86	78,53	78,2
0,3	80,28	80,39	80,36	80,27	80,13	79,94	79,73	79,47	79,09	78,78	78,5
0,4	80,26	80,4	80,38	80,29	80,16	79,99	79,79	79,55	79,21	78,92	78,64
0,5	80,2	80,34	80,31	80,24	80,1	79,95	79,76	79,54	79,21	78,93	78,65
0,6	80,1	80,22	80,19	80,01	79,97	79,8	79,61	79,38	79,05	78,76	78,49
0,7	79,93	79,93	79,97	79,87	79,73	79,56	79,35	79,1	78,74	78,47	78,17
0,8	79,71	79,65	79,67	79,54	79,39	79,18	78,95	78,68	78,31	78,01	77,66
0,9	79,43	79,36	79,3	79,14	78,93	78,7	78,43	78,12	77,69	77,35	77,003
1	79,12	79,01	78,92	78,7	78,43	78,13	77,74	77,36	76,96	76,54	76,18

2. Ajustement des paramètres X1 et X2 avec fonte soustraite à l'ETP

X2 \ X1	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
0	80,15	80,09	79,96	79,78	79,56	79,28	78,96	78,53	78,14	77,73	77,35
0,1	80,27	80,24	80,16	80	79,81	79,56	79,28	78,88	78,52	78,14	77,73
0,2	80,27	80,32	80,28	80,15	79,97	79,76	79,5	79,13	78,8	78,45	78,12
0,3	80,28	80,38	80,34	80,24	80,08	79,88	79,64	79,29	78,98	78,69	78,33
0,4	80,27	80,38	80,34	80,24	80,09	79,9	79,67	79,33	79,05	78,77	78,44
0,5	80,21	80,31	80,27	80,16	80,02	79,82	79,6	79,27	78,98	78,71	78,47
0,6	80,1	80,18	80,12	80	79,84	79,64	79,41	79,07	78,78	78,48	78,24
0,7	79,9	79,98	79,89	79,76	79,58	79,35	79,1	78,74	78,43	78,1	77,87
0,8	79,68	79,7	79,58	79,41	79,19	78,93	78,57	78,27	77,93	77,65	77,32
0,9	79,38	79,36	79,18	78,96	78,69	78,32	78,01	77,65	77,26	76,92	76,47
1	79,09	78,99	78,76	78,47	78,15	77,69	77,33	76,9	76,46	76,05	75,58

3. Ajustement du paramètre X3

X3	avec soustraction	sans soustraction
0	80,37	80,36
0,1	80,38	80,37
0,2	80,39	80,38
0,3	80,39	80,38
0,4	80,38	80,37
0,5	80,36	80,36
0,6	80,35	80,34
0,7	80,33	80,32
0,8	80,32	80,31
0,9	80,31	80,3
1	80,3	80,29

Annexe 5 : Ajustement de la fonction de production du module Makhoulouf degré

1. Coefficient de fonte fixe

Coefficient de fonte	Sans soustraction	Avec soustraction	Coefficient de fonte	Sans soustraction	Avec soustraction
0,1	80,91	81	4,1	79,11	79,17
0,2	81,06	81,16	4,2	79,02	79,1
0,3	81,17	81,19	4,3	78,93	79,02
0,4	81,19	81,2	4,4	78,85	78,94
0,5	81,18	81,16	4,5	78,76	78,86
0,6	81,14	81,12	4,6	78,68	78,77
0,7	81,09	81,07	4,7	78,58	78,69
0,8	81,05	81,03	4,8	78,49	78,6
0,9	81,02	80,99	4,9	78,4	78,52
1	80,98	80,95	5	78,3	78,42
1,1	80,94	80,89	5,1	78,19	78,33
1,2	80,89	80,85	5,2	78,09	78,24
1,3	80,85	80,81	5,3	77,97	78,14
1,4	80,8	80,79	5,4	77,86	78,04
1,5	80,79	80,74	5,5	77,75	77,94
1,6	80,74	80,69	5,6	77,65	77,84
1,7	80,69	80,65	5,7	77,54	77,73
1,8	80,64	80,59	5,8	77,43	77,62
1,9	80,58	80,54	5,9	77,32	77,53
2	80,54	80,49	6	77,21	77,42
2,1	80,48	80,45	6,1	77,09	77,31
2,2	80,43	80,4	6,2	76,98	77,21
2,3	80,38	80,34	6,3	76,87	77,09
2,4	80,32	80,29	6,4	76,76	76,98
2,5	80,26	80,24	6,5	76,64	76,87
2,6	80,2	80,17	6,6	76,52	76,76
2,7	80,14	80,11	6,7	76,41	76,65
2,8	80,06	80,05	6,8	76,29	76,54
2,9	80	79,99	6,9	76,17	76,44
3	79,94	79,92	7	76,03	76,32
3,1	79,87	79,87	7,1	75,9	76,2
3,2	79,8	79,8	7,2	75,78	76,1
3,3	79,73	79,74	7,3	75,66	75,97
3,4	79,66	79,69	7,4	75,54	75,86
3,5	79,59	79,61	7,5	75,42	75,73
3,6	79,51	79,54	7,6	75,29	75,59
3,7	79,43	79,47	7,7	75,16	75,5
3,8	79,35	79,4	7,8	75,03	75,37
3,9	79,27	79,32	7,9	74,89	75,25
4	79,19	79,24	8	74,78	75,14

2. Coefficient de fonte variable au cours de la saison

Coefficient de fonte	Sans soustraction	Avec soustraction	Coefficient de fonte	Sans soustraction	Avec soustraction
1	80,69	80,65	3,8	80,09	80,06
1,1	80,72	80,69	3,9	80,03	80
1,2	80,8	80,74	4	79,95	79,93
1,3	80,85	80,8	4,1	79,9	79,88
1,4	80,88	80,84	4,2	79,83	79,82
1,5	80,9	80,88	4,3	79,77	79,77
1,6	80,89	80,86	4,4	79,71	79,71
1,7	80,87	80,85	4,5	79,65	79,65
1,8	80,86	80,82	4,6	79,57	79,59

1,9	80,83	80,83	4,7	79,51	79,53
2	80,84	80,79	4,8	79,43	79,47
2,1	80,8	80,76	4,9	79,36	79,4
2,2	80,77	80,73	5	79,29	79,33
2,3	80,75	80,69	5,1	79,21	79,26
2,4	80,71	80,66	5,2	79,14	79,19
2,5	80,68	80,62	5,3	79,06	79,13
2,6	80,64	80,58	5,4	78,98	79,05
2,7	80,6	80,55	5,5	78,91	78,97
2,8	80,56	80,51	5,6	78,82	78,9
2,9	80,52	80,47	5,7	78,74	78,83
3	80,48	80,43	5,8	78,65	78,75
3,1	80,43	80,38	5,9	78,57	78,66
3,2	80,39	80,34	6	78,49	78,58
3,3	80,34	80,3	6,1	78,39	78,51
3,4	80,29	80,25	6,2	78,3	78,41
3,5	80,24	80,2	6,3	78,2	78,31
3,6	80,2	80,15	6,4	78,11	78,23
3,7	80,14	80,11	6,5	78,01	78,14

3. Température seuil pour coefficient de fonte fixe

Température	sans	avec	Température	sans	avec
seuil	soustraction	soustraction	seuil	soustraction	soustraction
-25	80,49	80,44	-4,9	80,53	80,53
-24,8	80,49	80,44	-4,8	80,53	80,53
-24,6	80,49	80,44	-4,7	80,53	80,53
-24,4	80,5	80,45	4,6	80,53	80,53
-24,2	80,5	80,45	-4,5	80,52	80,52
-24	80,5	80,45	-4,4	80,52	80,52
-23,8	80,5	80,45	-4,3	80,52	80,52
-23,6	80,5	80,45	-4,2	80,52	80,52
-23,4	80,5	80,45	-4,1	80,53	80,52
-23,2	80,5	80,45	-4	80,52	80,52
-23	80,5	80,45	-3,9	80,52	80,51
-22,8	80,5	80,47	-3,8	80,52	80,51
-22,6	80,5	80,47	-3,7	80,52	80,51
-22,4	80,5	80,46	-3,6	80,52	80,51
-22,2	80,5	80,47	-3,5	80,52	80,51
-22	80,5	80,45	-3,4	80,52	80,52
-21,8	80,5	80,47	-3,3	80,51	80,51
-21,6	80,5	80,47	-3,2	80,52	80,52
-21,4	80,5	80,47	-3,1	80,52	80,52
-21,2	80,5	80,47	-3	80,52	80,52
-21	80,5	80,45	-2,9	80,52	80,52
-20,8	80,5	80,46	-2,8	80,52	80,52
-20,6	80,5	80,46	-2,7	80,52	80,51
-20,4	80,5	80,46	-2,6	80,51	80,51
-20,2	80,5	80,46	-2,5	80,51	80,51
-20	80,5	80,46	-2,4	80,51	80,51
-19,8	80,5	80,46	-2,3	80,5	80,5
-19,6	80,5	80,46	-2,2	80,5	80,5
-19,4	80,51	80,46	-2,1	80,5	80,5
-19,2	80,51	80,46	-2	80,5	80,5
-19	80,51	80,46	-1,9	80,49	80,49
-18,8	80,51	80,46	-1,8	80,52	80,49
-18,6	80,51	80,47	-1,7	80,51	80,49
-18,4	80,51	80,47	-1,6	80,5	80,49
-20	80,51	80,47	-1,5	80,5	80,48
-18	80,51	80,48	-1,4	80,49	80,47
-17,8	80,51	80,46	-1,3	80,48	80,45
-17,6	80,51	80,46	-1,2	80,47	80,45

-17,4	80,51	80,46	-1,1	80,46	80,43
-17,2	80,51	80,48	-1	80,46	80,42
-17	80,51	80,48	-0,9	80,44	80,41
-16,8	80,51	80,46	-0,8	80,43	80,4
-16,4	80,51	80,48	-0,7	80,42	80,39
-16,2	80,51	80,48	-0,6	80,42	80,39
-16	80,51	80,48	-0,5	80,41	80,38
-15,8	80,51	80,48	-0,4	80,41	80,38
-15,6	80,51	80,48	-0,3	80,41	80,38
-15,4	80,51	80,48	-0,2	80,4	80,37
-15,2	80,51	80,49	-0,1	80,39	80,36
-15	80,51	80,48	0	80,38	80,34
-14,8	80,51	80,49	0,1	80,36	80,33
-14,6	80,51	80,49	0,2	80,34	80,31
-14,4	80,51	80,49	0,3	80,32	80,29
-14,2	80,51	80,49	0,4	80,29	80,27
-14	80,51	80,5	0,5	80,27	80,23
-13,8	80,51	80,49	0,6	80,24	80,21
-13,6	80,51	80,5	0,7	80,21	80,18
-13,4	80,51	80,5	0,8	80,18	80,15
-13,2	80,49	80,5	0,9	80,14	80,11
-13	80,49	80,5	1	80,1	80,05
-12,8	80,49	80,5	1,1	80,04	80
-12,6	80,49	80,49	1,2	80	79,95
-12,4	80,5	80,5	1,3	79,95	79,89
-12,2	80,5	80,48	1,4	79,88	79,82
-12	80,5	80,5	1,5	79,82	79,75
-11,8	80,5	80,5	1,6	79,75	79,68
-11,6	80,5	80,51	1,7	79,66	79,59
-11,4	80,5	80,51	1,8	79,59	79,51
-11,2	80,5	80,51	1,9	79,52	79,42
-11	80,51	80,5	2	79,43	79,34
-10,8	80,51	80,51	2,1	79,35	79,24
-10,6	80,51	80,52	2,2	79,26	79,15
-10,4	80,51	80,5	2,3	79,17	79,05
-10,2	80,52	80,52	2,4	79,07	78,95
-10	80,52	80,52	2,5	78,97	78,85
-9,8	80,52	80,52	2,6	78,87	78,72
-9,6	80,52	80,52	2,7	78,75	78,6
-9,4	80,53	80,5	2,8	78,65	78,49
-9,2	80,53	80,51	2,9	78,55	78,36
-9	80,53	80,51	3	78,44	78,23
-8,8	80,51	80,51	3,1	78,31	78,1
-8,6	80,51	80,52	3,2	78,19	77,97
-8,4	80,52	80,52	3,3	78,06	77,81
-8,2	80,52	80,52	3,4	77,92	77,65
-8	80,52	80,51	3,5	77,77	77,47
-7,8	80,52	80,52	3,6	77,6	77,28
-7,6	80,52	80,52	3,7	77,43	77,08
-7,4	80,52	80,52	3,8	77,26	76,89
-7,2	80,52	80,52	3,9	77,09	76,69
-7	80,52	80,52	4	76,9	76,48
-6,8	80,52	80,52	4,1	76,7	76,24
-6,6	80,54	80,52	4,2	76,49	75,99
-6,4	80,54	80,52	4,3	76,24	75,73
-6,2	80,54	80,52	4,4	75,97	75,46
-6	80,54	80,52	4,5	75,68	75,15
-5,8	80,54	80,52	4,6	75,38	74,8
-5,6	80,54	80,52	4,7	75,04	74,44
-5,4	80,54	80,53	4,8	74,7	74,07
-5,2	80,54	80,53	4,9	74,35	73,69
-5	80,54	80,53	5	73,99	73,31

4. Température seuil pour coefficient de fonte variable

Température seuil	sans soustraction	Avec Soustraction
-5	80,78	80,74
-4,5	80,79	80,75
-4	80,81	80,77
-3,5	80,81	80,78
-3	80,83	80,79
-2,5	80,84	80,8
-2	80,85	80,82
-1,5	80,86	80,84
-1	80,87	80,85
-0,5	80,89	80,86
0	80,9	80,88
0,5	80,93	80,89
1	80,91	80,88
1,5	80,9	80,86
2	80,9	80,85
2,5	80,87	80,85
3	80,86	80,83
3,5	80,84	80,81
4	80,83	80,79
4,5	80,79	80,76
5	80,76	80,74

Annexe 6 : Ajustement des paramètres fixes du module HBV

1. Paramètre X1

majoration de la précipitation	sans soustraction	avec soustraction	majoration de la précipitation	sans soustraction	avec soustraction
0,1	76,08	75,94	1,1	79,43	79,37
0,2	77	77,01		79,22	79,02
0,3	77,69	77,93	1,3	78,96	78,75
0,4	78,33	78,36	1,4	78,67	78,5
0,5	78,89	78,93	1,5	78,4	78,16
0,6	79,21	79,3	1,6	77,82	77,57
0,7	79,38	79,4	1,7	77,41	77,09
0,8	79,55	79,43	1,8	77,03	76,85
0,9	79,58	79,44	1,9	76,7	76,39
1	79,58	79,55	2	76,35	75,87

2. Paramètre X2

facteur de regel	sans soustraction	avec soustraction	facteur de regel	sans soustraction	avec soustraction
0	79,57	79,57	0,11	79,59	79,54
0,01	79,56	79,56	0,12	79,6	79,54
0,02	79,57	79,57	0,13	79,61	79,54
0,03	79,57	79,56	0,14	79,61	79,54
0,04	79,58	79,56	0,15	79,6	79,54
0,05	79,58	79,55	0,16	79,6	79,55
0,06	79,56	79,54	0,17	79,6	79,54
0,07	79,56	79,54	0,18	79,61	79,54
0,08	79,56	79,54	0,19	79,61	79,54
0,9	79,6	79,54	0,2	79,61	79,54
0,1	79,59	79,54			

3. Paramètre X3

fraction liquide	sans soustraction	avec soustraction	fraction liquide	sans soustraction	avec soustraction
0	79,71	79,69	0,55	79,25	79,24
0,05	79,65	79,6	0,6	79,23	79,17
0,1	79,58	79,55	0,65	79,21	79,19
0,15	79,57	79,48	0,7	79,19	79,16
0,2	79,55	79,46	0,75	79,19	79,16
0,25	79,49	79,41	0,8	79,14	79,13
0,3	79,45	79,34	0,85	79,15	79,15
0,35	79,41	79,34	0,9	79,12	79,13
0,4	79,38	79,33	0,95	79,11	79,11
0,45	79,34	79,33	1	79,12	79,12
0,5	79,32	79,23			

Annexe 7 : Ajustement des paramètres Majoration (X1) et Part de pluie (X4) pour le module HBV

1. Sans soustraction

X4X1	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
0	79,58	79,42	79,17	78,94	78,58	78,36	77,78	77,42	76,98	76,64	76,26
0,1	79,89	79,79	79,55	79,31	78,99	78,73	78,19	77,89	77,46	77	76,64
0,2	80,2	80,07	79,96	79,72	79,43	79,11	78,62	78,42	77,96	77,55	77,21
0,3	80,48	80,38	80,27	80,06	79,8	79,4	79,16	78,85	78,43	78,08	77,75
0,4	80,69	80,7	80,55	80,4	80,11	79,81	79,58	79,27	78,84	78,59	78,27
0,5	80,9	80,86	80,76	80,56	80,39	80,17	79,9	79,63	79,24	78,97	78,67
0,6	80,96	80,94	80,9	80,76	80,63	80,43	80,23	79,97	79,65	79,32	79
0,7	80,86	81,04	81,02	80,89	80,82	80,63	80,49	80,15	79,93	79,71	79,4
0,8	80,82	81	81,04	81	80,94	80,79	80,66	80,42	80,13	79,95	79,68
0,9	80,65	80,89	80,99	80,98	80,98	80,93	80,76	80,54	80,32	80,15	79,9
1	80,54	80,71	80,84	80,95	80,93	80,87	80,76	80,66	80,44	80,29	80,04
1,1	80,46	80,46	80,68	80,74	80,81	80,78	80,7	80,57	80,45	80,31	80,15
1,2	80,37	80,37	80,37	80,5	80,58	80,63	80,58	80,56	80,4	80,27	80,14
1,3	80,19	80,19	80,19	80,19	80,3	80,36	80,38	80,39	80,22	80,13	80,13
1,4	79,95	79,95	79,95	79,95	79,95	80,03	80,09	80,13	80	79,96	79,84
1,5	79,68	79,68	79,68	79,68	79,68	79,68	79,67	79,71	79,7	79,73	79,65

2. Avec soustraction

X4X1	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2
0	79,34	79,16	78,87	78,59	78,39	78,03	77,45	76,97	76,67	76,3	75,74
0,1	79,56	79,56	79,32	78,96	78,71	78,37	78,05	77,38	76,96	76,67	76,29
0,2	79,98	79,78	79,62	79,34	79,04	78,71	78,36	77,86	77,41	77,18	76,73
0,3	80,34	80,12	79,97	79,59	79,38	79,15	78,8	78,32	77,85	77,52	77,18
0,4	80,58	80,44	80,17	80,09	79,79	79,61	79,22	78,78	78,37	78,08	77,64
0,5	80,78	80,68	80,49	80,29	80,05	79,85	79,57	79,26	78,77	78,54	78,02
0,6	80,86	80,76	80,65	80,51	80,35	80,18	79,79	79,65	79,25	78,88	78,46
0,7	80,84	80,95	80,86	80,75	80,57	80,4	80,15	79,91	79,6	79,3	78,86
0,8	80,76	80,97	80,92	80,81	80,72	80,57	80,3	80,05	79,82	79,61	79,23
0,9	80,69	80,87	80,91	80,85	80,85	80,7	80,49	80,21	80,08	79,89	79,54
1	80,12	80,68	80,78	80,82	80,81	80,69	80,58	80,28	80,26	80,11	79,65
1,1	80,11	80,22	80,61	80,67	80,69	80,48	80,4	80,57	80,45	80,3	80,16
1,2	79,71	80,03	79,9	80,42	80,51	80,33	80,28	80,56	80,41	80,29	80,14
1,3	79,33	79,59	79,86	79,98	80,26	80,16	80,18	80,4	80,25	80,15	80,13
1,4	78,88	79,16	79,43	79,63	79,98	79,95	80,09	80,11	80	79,95	79,86
1,5	78,29	78,63	78,82	79,05	79,59	79,68	79,67	79,71	79,71	79,74	79,67

Annexe 8 : Température seuil fixe pour le module HBV

Température seuil	Sans soustraction	Avec soustraction	Température seuil	Sans soustraction	Avec soustraction
-5	79,47	79,25	0,1	79,59	79,53
-4,9	79,48	79,24	0,2	79,54	79,49
-4,8	79,48	79,24	0,3	79,54	79,49
-4,7	79,48	79,25	0,4	79,52	79,5
4,6	79,47	79,27	0,5	79,57	79,5
-4,5	79,48	79,27	0,6	79,57	79,46
-4,4	79,48	79,28	0,7	79,56	79,46
-4,3	79,52	79,28	0,8	79,55	79,44
-4,2	79,5	79,26	0,9	79,55	79,36
-4,1	79,52	79,29	1	79,55	79,33
-4	79,5	79,29	1,1	79,57	79,37
-3,9	79,5	79,28	1,2	79,54	79,3
-3,8	79,52	79,29	1,3	79,5	79,48
-3,7	79,52	79,28	1,4	79,47	79,48
-3,6	79,51	79,28	1,5	79,38	79,47
-3,5	79,51	79,29	1,6	79,37	79,37
-3,4	79,51	79,27	1,7	79,37	79,32
-3,3	79,51	79,24	1,8	79,35	79,27
-3,2	79,54	79,25	1,9	79,27	79,28
-3,1	79,52	79,25	2	79,26	79,21
-3	79,49	79,25	2,1	79,2	79,26
-2,9	79,5	79,25	2,2	79,18	79,17
-2,8	79,52	79,25	2,3	79,17	79,1
-2,7	79,5	79,24	2,4	79,17	79,18
-2,6	79,47	79,26	2,5	79,15	79,01
-2,5	79,49	79,29	2,6	79,09	78,95
-2,4	79,48	79,33	2,7	79,07	78,88
-2,3	79,49	79,35	2,8	79,12	78,89
-2,2	79,49	79,38	2,9	79,07	78,9
-2,1	79,52	79,34	3	79,05	78,91
-2	79,52	79,34	3,1	79,06	79,05
-1,9	79,56	79,38	3,2	79,02	78,95
-1,8	79,56	79,38	3,3	79,04	78,84
-1,7	79,59	79,39	3,4	79,04	78,81
-1,6	79,6	79,4	3,5	79,02	78,72
-1,5	79,58	79,39	3,6	78,87	78,66
-1,4	79,57	79,4	3,7	78,84	78,58
-1,3	79,6	79,41	3,8	78,82	78,59
-1,2	79,6	79,42	3,9	78,73	78,49
-1,1	79,58	79,4	4	78,7	78,36
-1	79,56	79,39	4,1	78,63	78,21
-0,9	79,56	79,41	4,2	78,59	78,2
-0,8	79,55	79,4	4,3	78,51	78,08
-0,7	79,52	79,42	4,4	78,37	77,97
-0,6	79,53	79,43	4,5	78,26	77,83
-0,5	79,53	79,43	4,6	78,12	77,72
-0,4	79,55	79,46	4,7	78,03	77,61
-0,3	79,54	79,51	4,8	77,93	77,49
-0,2	79,56	79,52	4,9	77,9	77,38
-0,1	79,55	79,52	5	77,85	77,06
0	79,56	79,53			

Annexe 9 : ajustement des paramètres fixes pour le module Meslier

1. Ajustement simultané de X1 et X2

X2\X1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	65,12	77,15	77,33	77,49	77,61	77,75	77,88	77,98	78,02	78,19	78,3
20	65,25	77,2	77,51	77,63	77,8	77,9	78,06	78,06	78,24	78,36	78,43
30	65,24	77,39	77,58	77,77	77,92	77,97	78,05	78,14	78,32	78,41	78,59
40	65,06	77,46	77,63	77,75	77,94	78,01	78,12	78,18	78,37	78,58	78,64
50	65,46	77,52	77,73	77,8	78,02	78,03	78,19	78,29	78,52	78,64	78,68
60	65,49	77,53	77,77	77,93	78,06	78,12	78,23	78,38	78,59	78,66	78,76
70	65,53	77,58	77,73	77,95	78,12	78,12	78,29	78,51	78,55	78,66	78,76
80	65,55	77,59	77,78	77,97	78,25	78,12	78,4	78,6	78,57	78,69	78,79
90	65,36	77,62	77,85	77,97	78,24	78,28	78,47	78,56	78,59	78,7	78,76
100	65,58	77,65	77,83	78,04	78,22	78,29	78,48	78,58	78,6	78,7	78,78
110	65,55	77,68	77,92	78,1	78,22	78,34	78,52	78,59	78,63	78,69	78,78
120	65,57	77,65	77,94	78,09	78,24	78,36	78,53	78,56	78,67	78,74	78,81
130	65,6	77,72	77,96	78,1	78,26	78,35	78,52	78,58	78,67	78,76	78,81
140	65,61	77,73	77,97	78,14	78,31	78,37	78,56	78,57	78,66	78,74	78,81
150	65,61	77,72	78	78,14	78,26	78,43	78,58	78,58	78,66	78,78	78,81
160	65,64	77,74	78,03	78,11	78,3	78,42	78,56	78,59	78,68	78,77	78,81
170	65,65	77,73	78,04	78,12	78,33	78,47	78,59	78,65	78,67	78,75	78,8
180	65,68	77,77	78	78,12	78,31	78,44	78,58	78,67	78,65	78,79	78,8
190	65,7	77,76	78,02	78,09	78,32	78,47	78,59	78,69	78,64	78,78	78,81
200	65,7	77,76	78,03	78,11	78,38	78,49	78,61	78,67	78,65	78,79	78,81
210	65,71	77,73	78,04	78,12	78,34	78,5	78,64	78,7	78,66	78,79	78,8
220	65,66	77,78	78,04	78,15	78,38	78,49	78,62	78,72	78,67	78,75	78,81
230	65,67	77,78	78,04	78,14	78,39	78,52	78,64	78,68	78,67	78,75	78,78
240	65,65	77,81	78,01	78,17	78,4	78,5	78,63	78,68	78,65	78,73	78,79
250	65,69	77,81	78,01	78,16	78,38	78,53	78,64	78,66	78,67	78,73	78,78
260	65,69	77,85	78,02	78,22	78,38	78,52	78,63	78,68	78,65	78,72	78,79
270	65,76	77,84	78,05	78,22	78,37	78,58	78,63	78,69	78,64	78,72	78,78
280	65,79	77,86	78,1	78,26	78,39	78,53	78,61	78,66	78,64	78,72	78,79
290	65,75	77,89	78,06	78,23	78,37	78,53	78,62	78,65	78,64	78,75	78,79
300	65,8	77,92	78,09	78,26	78,4	78,54	78,62	78,67	78,64	78,75	78,76
310	65,79	77,91	78,12	78,26	78,41	78,57	78,65	78,65	78,67	78,73	78,78
320	65,82	77,92	78,12	78,29	78,42	78,53	78,63	78,66	78,64	78,72	78,73
330	65,81	77,89	78,11	78,31	78,39	78,53	78,65	78,64	78,67	78,7	78,77
340	65,82	77,88	78,12	78,33	78,4	78,54	78,62	78,66	78,66	78,69	78,76
350	65,85	77,9	78,13	78,3	78,39	78,53	78,62	78,65	78,64	78,7	78,74
360	65,84	77,91	78,16	78,33	78,41	78,57	78,65	78,64	78,62	78,69	78,74
370	65,84	77,89	78,17	78,3	78,42	78,56	78,62	78,62	78,65	78,7	78,78
380	65,94	77,89	78,17	78,34	78,45	78,56	78,62	78,66	78,61	78,71	78,71
390	65,9	77,92	78,19	78,34	78,41	78,57	78,65	78,65	78,61	78,68	78,73
400	65,92	77,96	78,17	78,3	78,4	78,54	78,64	78,65	78,61	78,71	78,74
410	65,93	77,98	78,16	78,31	78,41	78,53	78,65	78,65	78,62	78,7	78,73
420	65,93	77,94	78,16	78,31	78,41	78,54	78,62	78,63	78,66	78,73	78,77
430	65,93	77,96	78,16	78,34	78,4	78,53	78,62	78,66	78,63	78,72	78,74
440	65,94	77,94	78,19	78,28	78,43	78,56	78,63	78,64	78,62	78,74	78,77
450	65,95	77,96	78,16	78,29	78,4	78,52	78,63	78,65	78,63	78,71	78,74
460	65,92	77,93	78,19	78,32	78,42	78,55	78,62	78,68	78,64	78,69	78,77
470	65,92	77,95	78,13	78,32	78,4	78,52	78,62	78,65	78,61	78,7	78,77
480	65,91	77,95	78,14	78,3	78,38	78,53	78,64	78,65	78,61	78,7	78,73
490	65,95	77,96	78,16	78,32	78,39	78,53	78,61	78,67	78,62	78,67	78,75
500	65,93	77,95	78,14	78,32	78,38	78,53	78,63	78,67	78,6	78,66	78,72

2. Recherche d'un optimum pour X1 au delà de 10

X1	Critère de Nash	X1	Critère de Nash
1	77,91	56	79,34
2	78,16	57	79,37
3	78,33	58	79,39
4	78,41	59	79,4
5	78,57	60	79,38
6	78,65	61	79,44
7	78,64	62	79,42
8	78,62	63	79,42
9	78,69	64	79,44
10	78,74	65	79,44
11	78,81	66	79,43
12	78,87	67	79,41
13	78,83	68	79,44
14	78,86	69	79,41
15	78,87	70	79,44
16	78,88	71	79,43
17	78,91	72	79,46
18	78,92	73	79,46
19	78,99	74	79,45
20	79,02	75	79,47
21	79,06	76	79,47
22	79,07	77	79,48
23	79,1	78	79,51
24	79,1	79	79,51
25	79,11	80	79,54
26	79,12	81	79,51
27	79,12	82	79,52
28	79,13	83	79,51
29	79,13	84	79,53
30	79,14	85	79,53
31	79,15	86	79,54
32	79,15	87	79,54
33	79,15	88	79,56
34	79,18	89	79,57
35	79,16	90	79,58
36	79,16	91	79,58
37	79,19	92	79,57
38	79,17	93	79,57
39	79,16	94	79,56
40	79,2	95	79,55
41	79,21	96	79,55
42	79,17	97	79,54
43	79,23	98	79,52
44	79,22	99	79,53
45	79,21	100	79,49
46	79,22	101	79,49
47	79,22	102	79,48
48	79,24	103	79,47
49	79,25	104	79,48
50	79,27	105	79,48
51	79,28	106	79,47
52	79,28	107	79,47
53	79,32	108	79,47
54	79,35	109	79,46
55	79,33	110	79,45