

Apport des données SPOT-VEGETATION à la modélisation de la fonte de neige dans le Haut Atlas marocain

A. Boudhar¹, L. Hanich¹, G. Boulet², B. Duchemin², A. Chehbouni²

(1) *Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, av. A. Khattabi, BP 549, Marrakech, Maroc. boudhar22@yahoo.fr*

(2) *IRD, UMR CESBIO, 18 Av. Edouard Belin BPI 2801 Toulouse cedex 4, France.*

RESUME

La chaîne montagneuse du Haut Atlas marocain constitue un véritable château d'eau pour les plaines arides avoisinantes. C'est le cas de la plaine du Haouz dans la région de Marrakech, où les ressources en eau connaissent une exploitation intensive (activités agricoles et tourisme). La gestion durable de ces ressources est ainsi une priorité pour les autorités de la région et du pays. Dans cet objectif, il est nécessaire de bien comprendre les processus et les variables permettant de décrire précisément le cycle hydrologique de la région, et en particulier la contribution respective des précipitations liquides et solides aux débits des principaux sous-bassins de l'oued Tensift. Dans ce contexte, nous avons utilisé une archive de 7 années d'images SPOT-VEGETATION pour cartographier les surfaces enneigées du Haut-Atlas.

Afin d'évaluer les potentialités de l'imagerie satellitaire à prévoir les débits à l'exutoire de deux bassins versants du Haut Atlas, Rheraya et Ourika, on a utilisé le modèle de fonte de neige (SRM). A cet effet, Deux types de surfaces de neige ont été utilisés à l'entrée du modèle : surfaces extraites à l'aide de la télédétection (SPOT-VGT) et surfaces calculées par la méthode degré-jour en se basant sur les précipitations et la température enregistrées dans les deux bassins versants.

Cette étude montre l'intérêt de la télédétection à étudier le régime hydrologique de régions semi-arides. Les premiers résultats de simulation par SRM montrent que les surfaces neigeuses issues des données SPOT-VEGETATION peuvent être utilisées pour simuler et prévoir les débits à l'exutoire des sous bassins du Haut Atlas marocain.

Mots clés : Haut Atlas, neige, télédétection optique, SPOT-VEGETATION, fonte de neige, modélisation hydrologique.

INTRODUCTION

Dans la plupart des régions montagneuses du globe terrestre, l'eau de fonte de neige constitue une ressource en eau importante pour la recharge des barrages et les nappes phréatiques situées en aval. C'est le cas du Haut Atlas marocain qui constitue un véritable château d'eau pour les plaines arides avoisinantes comme la plaine du Haouz dans la région de Marrakech où les ressources en eau connaissent une forte exploitation du fait de l'accroissement démographique et touristique ainsi que le développement des activités agricoles. Devant cette situation, La gestion durable de ces ressources est ainsi une priorité pour les autorités de la région et du pays. Dans cet objectif, il est nécessaire de bien comprendre les processus et les variables permettant de décrire précisément le cycle hydrologique de la région, et en particulier les échelles de temps caractéristiques de la contribution respective des précipitations liquides et solides aux débits des principaux sous-bassins de l'oued Tensift.

Vu le manque de données in-situ représentatives sur l'ensemble des bassins versants montagneux du Haut atlas, La télédétection satellitaire reste une source d'information attractive et complémentaire aux mesures de terrain et en particulier la cartographie de l'enneigement.

L'utilisation des observations de superficie neigeuse pour prévoir les débits a débuté en 1930 par l'usage de photographies aériennes (Potts, 1937). Depuis 1972, les informations issues du capteur NOAA-AVHRR (National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer) ont été utilisées pour modéliser la fonte de neige (Rango, 1986,1996). Parmi les modèles de fonte utilisant la couverture neigeuse en entrée, le modèle conceptuel de fonte de neige « SRM » (Martinec, 1975) est largement utilisé dans le monde, soit pour mieux contraindre les estimations du bilan hydrique du bassin versant pour des chroniques connues (mode « réanalyse ») , Rango et Fourgon Katwijk, 1990, Songweon Lee, 2005, soit pour la prévision des débits (mode « prédiction ») en quasi temps réels (Rango et Martinec, 1979, Shafer et al., 1982, Martinec, 1985, Martinec et Rango, 1995, Rango et Martinec, 1997, Klaus Seidel, 1998, Jesko Schaper 1999 , Gomez Landesa, 2002, Thomas Nagler, 2008).

Dans cette étude, SRM à été utilisé pour évaluer les potentialités de l'imagerie satellitaire en mode « réanalyse ». Les paramètres du modèle sont calés puis validés sur la période de fonte de neige (du 1 janvier au 31 mai) au niveau de deux bassins versants de Rheraya et d'Ourika. Ensuite les débits sont simulés en utilisant deux surfaces neigeuses. MOD1 : avec assimilation des surfaces calculées à partir des images basses résolution SPOT-VGT et MOD2 : sans assimilation de ces données.

SITE D'ETUDE

Les deux bassins versants sélectionnés pour cette étude, le Rheraya (225 Km²) et l'Ourika (506Km²), sont parmi les bassins les plus actifs hydrologiquement dans les versants Nord du Haut Atlas Marocain. Ils se situent à 30 km au Sud de la ville de Marrakech (Figure 1). Les deux bassins versants sont subdivisés en 8 tranches d'altitudes. Les caractéristiques géographiques de chaque tranche altitudinale sont résumées dans le tableau 1.

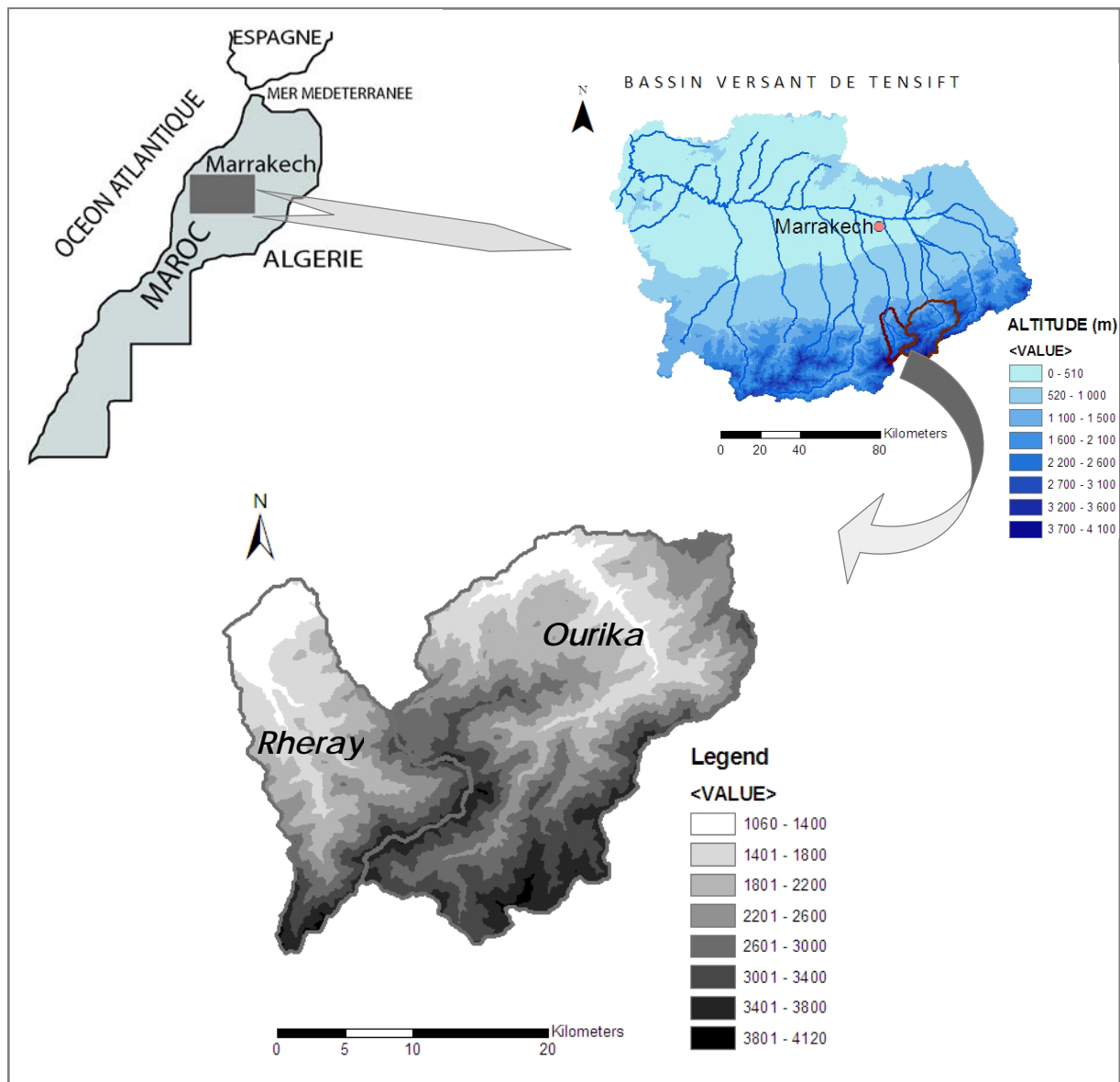


Figure 1 : Situation géographique des deux bassins versants de Rheraya et d'Ourika

Zone	RHERAYA				OURIKA			
	Surface		ALTITUDE(m)		Surface		ALTITUDE(m)	
	Km ²	%	MIN	MAX	Km ²	%	MAX	MIN
1	33	14	1036	1387	28	5	1010	1394
2	51	22	1400	1790	72	14	1406	1790
3	49	22	1803	2193	107	21	1802	2198
4	36	16	2206	2596	90	18	2210	2594
5	23	10	2609	2999	92	18	2606	2990
6	19	8	3012	3389	73	14	3002	3398
7	14	6	3402	3792	43	8	3410	3794
8	2	1	3805	4117	3	1	3806	3974

Tableau 1 : Caractéristiques géographiques des bassins versants de Rheraya et d'Ourika

DONNEES ET METHODOLOGIE

Le modèle SRM

SRM a été appliqué dès 1975 aux petites bassins européens et, jusqu'à maintenant, il a été utilisé avec succès dans environ 80 bassins montagneux dans 25 pays du globe (Martinec, 1975, Martinec et al., 1998).

SRM est un modèle de type degré-jour conçu pour simuler et calculer les débits à l'exutoire des bassins versants montagneux où la fonte de neige contribue significativement au débit (Rango and Martinec, 1981; Martinec et al., 1998; Mitchell and DeWalle, 1998). La méthode degré-jour utilisée par SRM a été employée de différentes manières pendant plus de 60 ans (Clyde, 1931; Collins, 1934), et Rodriguez (1994) précise que SRM et le modèle HBV-2 (Bergstrom, 1975) sont les deux modèles basés sur la méthode degré-jour (Rango et Martinec, 1995) les plus largement répandus.

SRM calcule le débit journalier séparément pour chaque zone comme suit :

$$Q_{n+1} = [c_{Sn}a_n(T_n + \Delta T_n)S_n + c_{Rn}P_n] \frac{A \times 10\,000}{86\,400} (1 - k_{n+1}) + Q_n k_{n+1} \quad (1)$$

Dans l'équation (1) ci dessus, Q_{n+1} (m³/s), le débit moyen journalier au jour n+1, est la somme de trois composantes du jour précédent n :

- (i) La fonte des neiges calculée comme produit du facteur de degré-jour a (cm/°C/j), degré jour zonal $(T + \Delta T)$ (°C j), le rapport S de la couverture neigeuse à la surface totale du bassin A (km²), et le coefficient d'écoulement de fonte de neige C_s .
- (ii) Les précipitations contribuant à l'écoulement, calculé comme produit des précipitations mesurées P et du coefficient d'écoulement des précipitations C_r
- (iii) Une fraction du débit du jour précédent Q_n correspondant au coefficient de récession k .

$T + \Delta T$ représente la température extrapolée à l'altitude hypsométrique moyenne de chaque zone à partir des températures mesurées aux stations météorologiques. Les coefficients d'écoulement de fonte de neige et de pluie C_s et C_r sont donc les fractions de fonte de neige et de pluie qui ruissèlent. Le coefficient de récession au jour n+1, k_{n+1} , est le rapport moyen entre le débit au jour n+1 et le débit au jour n en dehors des épisodes de pluie et de fonte. L'équation (1) est appliquée séparément sur chaque zone et les débits sont additionnés. Si le temps de transfert dans le réseau hydrographique du bassin versant est différent de 18 h, SRM ajuste les données d'entrée. Par exemple, pour un décalage de 6 h, SRM utilise une moyenne de l'apport des données de jours n et n+1, comme 12 h de chaque journée. Dans le cas de nos bassins, le temps de transfert est négligé.

Détermination de la Surface de neige

✓ **Surface de neige extraite à l'aide de la télédétection**

La discrimination de la neige des autres surfaces est relativement aisée car neige et glace sont les seuls types de surface qui réfléchissent fortement le rayonnement dans le domaine solaire et absorbent fortement le rayonnement dans le moyen infrarouge (MIR). A partir de ces propriétés, le calcul des proportions de surfaces enneigées est basé sur un indice de neige (SI) qui utilise les réflectances des canaux bleu, rouge et MIR du capteur VEGETATION (Lissens et al. 2000). Cet indice a été retenu après avoir été comparé avec d'autres dans le cas du Haut Atlas marocain (De Solan et al. 2002 ; Hanich et al. 2003), puis amélioré pour réduire

l'influence des variations de signature spectrale du sol par le calcul d'un indice de neige modifié (MSI) (Chaponnière et al., 2005). La surface enneigée a été calculée sur le Haut Atlas Marocain, par bassin versant, par altitude et selon les expositions le long de la période du septembre 1998 au juin 2005 en appliquant une équation exponentielle établie par (Chaponnière et al. 2005) après l'analyse combinée de données basse résolution SPOT-VEGETATION et d'images à haute résolution spatiale Landsat-TM (Boudhar et al. 2007).

✓ **Surfaces générées à partir des données météorologiques**

Les surfaces de neige générées ont été calculées en se basant sur la hauteur d'eau calculée sur chaque zone par la méthode degré jour. Pour cela, on a calculé la fonte par la méthode de Makhoulouf, développée sur les bassins versants de Moselle (France) où la neige et le vent sont significatifs et les températures sont basses (Makhoulouf, 1994): 1) Découpage du bassin versant en 8 zones altitudinales, 2) Différenciation des précipitations en neige ou pluie basée sur deux températures seuils (Ts), Ts (pluie) > 2°C et Ts (neige) < 0°C, 3) Ajout d'une portion X2 de la précipitation considérée comme de la neige au stock éventuellement présent, et 4) Fonte du manteau neigeux: une partie de la fonte correspond à l'apport de chaleur par la pluie (s'il tombe une hauteur de pluie P sur la neige, une quantité d'eau de fonte égale à X3*P est produite), l'autre à la fonte classique calculée par la méthode degré-jour (équation 2):

$$Fonte = X4 * (Tm - T0) \quad (2)$$

Avec :

Tm : température journalière maximale

To : Température seuil

Makhoulouf (1994) a fixé ces paramètres de la façon suivante:

- X2=0.5
- X3=0.3
- X4=2.1 mm/°C/j. Afin de déterminer le facteur de fonte de neige pour le cas du Haut Atlas marocain, un suivi de la variation de la densité de la neige du novembre 2007 au mars 2008 est effectué sur 9 points de mesure repartis sur le site d'Oukaimden (points 1 à 8 sont à 3200 m d'altitude et le point 9 à 2600 m). Le facteur de fonte est obtenu à partir de la relation empirique (3) (Martinec, 1960).

$$a = 1.1 \cdot \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3)$$

Avec :

a = Facteur de fonte (mm/°C/j).

ρ_s = Densité de neige (g/m³).

ρ_w = densité de l'eau (g/m³).

Cette méthode a donné de bons résultats pour la Rheraya (Chaponnière et al., 2008). Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 2. Le facteur de fonte pour les points 1 à 8 varie entre 2,7 à 4 mm/°C/j et du 4,3 à 5 mm/°c /j pour le point 9. Pour la simulation des surfaces de neige, nous avons pris la valeur moyenne entre tout les points, X4= 3,6 mm/°c /j.

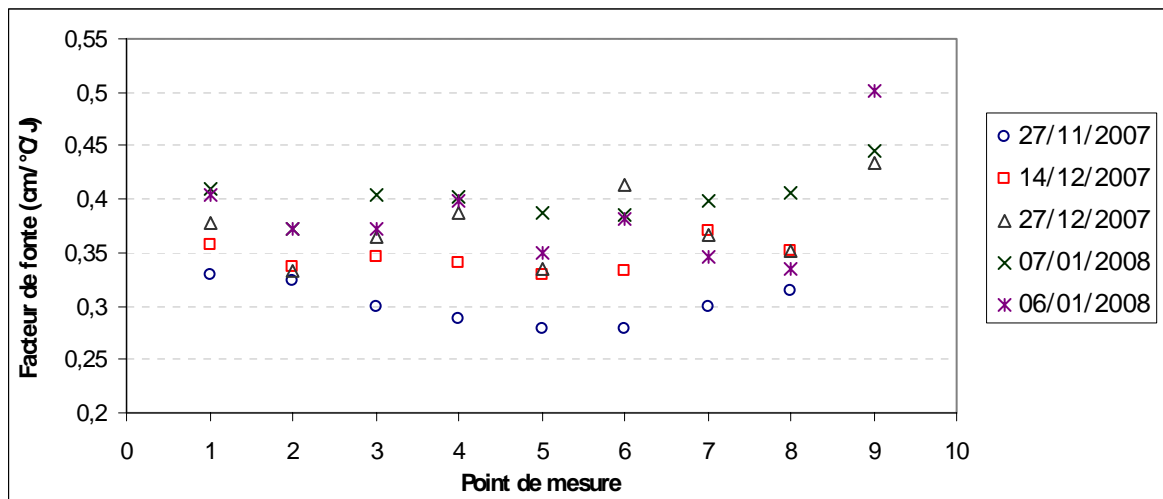


Figure 2 : variation du facteur de fonte au niveau du site d'Oukaimden (2600-3000m) (Haut Atlas Marocain) du Novembre 2007 au janvier 2008.

Ensuite, les surfaces ont été calculées sur chaque tranche d'altitude en se basant sur la hauteur de neige calculée dans le stock. Si la hauteur de neige dans le stock est supérieure à 1 m, toute la tranche est considérée comme couverte par la neige. Alors que dans le cas où la hauteur du stock est inférieure à 1 m, on suppose que la moitié de la tranche est couverte par la neige. Les deux figures 3 & 4 illustrent un exemple de la variation des surfaces enneigées extraite par la télédétection (SPOT-VGT) et calculées par la méthode degré-jour dans les deux bassins versants étudiés.

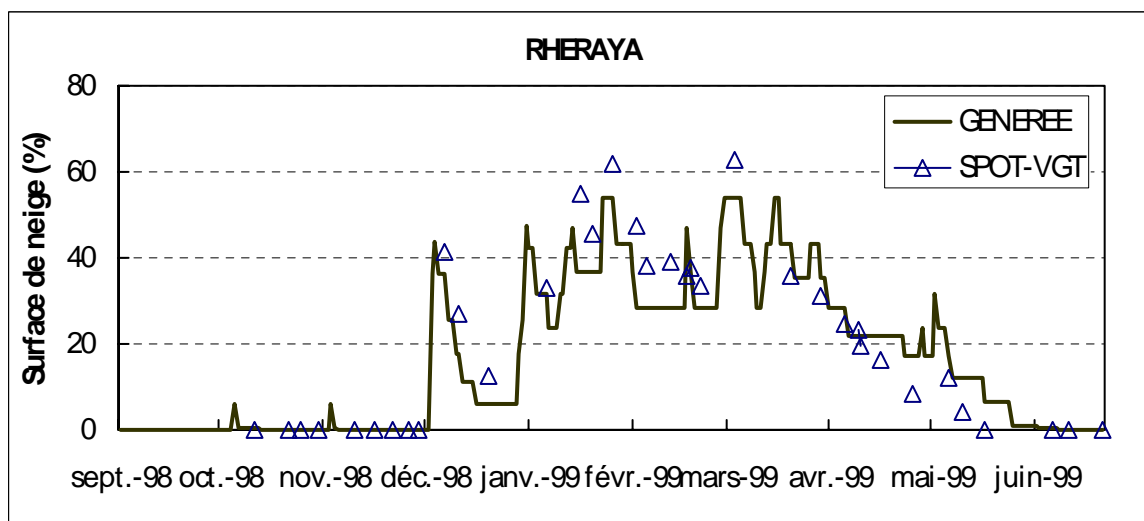


Figure 3 : Surfaces de neige calculées (SPOT-VGT) et surfaces générées (méthode degré-jour) dans le bassin de Rheraya, exemple de la saison (1998-1999).

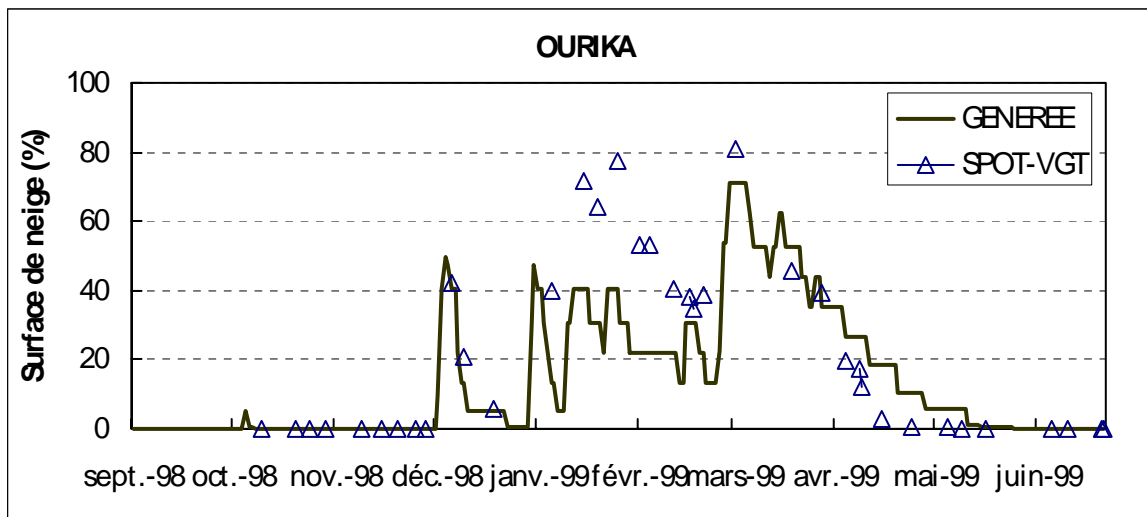


Figure 4 : Surfaces de neige calculées (SPOT-VGT) et surfaces générées (méthode degré-jour) dans le bassin de l'Ourika, exemple de la saison (1998-1999).

Données hydrométéorologiques

Outre les surfaces enneigées, des données zonales journalières de précipitation et de température sont nécessaires pour le modèle SRM. Ces données sont obtenues à partir des stations météorologiques installées dans les deux bassins versants.

Les données des stations météorologiques d'Oukaimden (2760 m d'altitudes) et Saada (411 m) sur la période (1998-2005) ont été utilisées pour déterminer les précipitations et les températures journalières sur les zones dépourvues de station. Le gradient altitudinal de température obtenu est égal à 0,56°C/100m. Pour calculer le gradient moyen des précipitations, les données enregistrées au niveau des deux stations d'Oukaimden (2760 m d'altitudes) et de Marrakech (450 m) sur la période (1998-2005) ont été utilisées. La valeur obtenue est égale à 0,03 mm/100 m.

Les mesures de débits à l'exutoire sont fournies par l'ABHT (Agence du Bassin Hydraulique de Tensift) aux stations de Tahanaout (exutoire du bassin de Rheraya) et d'Aghbalou (exutoire du bassin de l'Ourika). Les débits journaliers sont obtenus à partir du niveau d'eau lu sur l'échelle limnométrique par l'intermédiaire de courbes de tarages empiriques. Le choix de la courbe adaptée se fait au moyen de jaugeages de contrôle effectués idéalement tous les mois ou après un épisode de crue. Or, dans ces bassins semi-arides, et principalement en raison des grosses crues qui changent la section d'écoulement ou des périodes d'étiage pour lesquels l'échelle limnométrique se trouve isolée de la tranche d'eau, le calcul des débits par cette méthode n'est pas toujours efficace. Durant la période d'étude, il existe certaines chroniques pour lesquelles les mesures de débit semblent incorrectes. Pour cela, nous avons repris les points de jaugeage et les débits disponibles afin de corriger empiriquement le décalage entre les débits corrigés et les valeurs obtenues par jaugeage.

Calibration de SRM

Les paramètres du modèle dans ces simulations ont été calibrés sur l'année 2004 en période de fonte de neige (du 1^{er} Janvier à 31 mai) pour les deux bassins versants. Le choix de cette année pour la calibration est conditionné par la disponibilité des données plus fiables que les autres années (Débits, Pluies et surface de neige, ainsi que la présence d'une bonne corrélation entre les surfaces simulées par la méthode degré-jour et les surfaces calculées à

partir des données SPOT-VGT). La calibration des paramètres SRM est réalisée en variant aléatoirement chaque paramètre d'une valeur minimale vers une valeur maximale avec un pas donné. Les bornes inférieures et supérieures choisies pour chaque paramètre sont indiquées dans le *tableau 2*.

Deux critères sont utilisés pour déterminer la précision de la simulation, l'efficacité de Nash et la différence de volume simulé et mesuré D_v :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2} \quad D_v = \frac{V_R - V'_R}{V_R} \times 100$$

Avec :

E : Efficacité de Nash, mesure l'efficacité du modèle ;

Q_i : Débit journalière mesuré ;

Q'_i : Débit journalière simulé ;

\bar{Q} : Moyenne des débits au cours de la période de simulation ;

n : Nombre de valeur des débits journalières ;

D_v : Biais relatif entre les débits mesurés et simulés (%) ;

V_r : Volume des débits mesurés ;

V'_r : Volume des débits simulés.

Le *tableau 3* résume les valeurs retenues, qui produisent une efficacité supérieure ou égale à 95% du maximum absolu sur l'espace de recherche. La *figure 5* représente les débits simulés par SRM résultant des deux types de surface de neige : MOD1, surface de neige calculées à partir des images SPOT VGT et MOD2, surface de neige générés par la méthode dégréé jour.

Paramètres		Valeurs		
		MIN	PAS	MAX
Coefficient de récession: k	x	0,1	0,01	1
	y	0,01	0,01	0,1
Coefficient d'écoulement-pluie : Cr		0,01	0,02	0,99
Coefficient d'écoulement-neige : Cs		0,01	0,02	0,99
Facteur de fonte : a (cm/°C/j)		0,05	0,05	1
Température critique : Tc (°C)		0	0,2	6
Température de fonte : Tf (°C)		0	0,2	6

Tableau 2 : intervalle et pas de variation des paramètres SRM ajustés sur l'année 2004.

	K		Cr	Cs	a (cm/j/°C)	Tf (°C)	Tq (°C)
	x	y					
Rheraya	0,97	0,01	0,1-0,3	0,4-0,6	0,2-0,5	2-3,5	0
Ourika	0,98	0,02	0,2-0,4	0,3-0,6	0,2-0,5	2-3,5	0

Tableau 3 : valeurs retenues par calibration pour les deux bassins versants Rheraya et Ourika en 2004

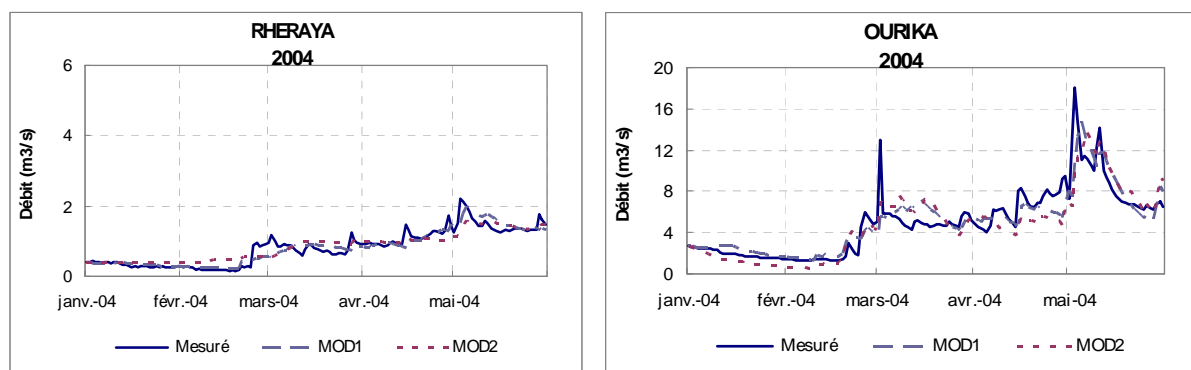


Figure 5 : Résultats de calibration sur les deux bassins versants

RESULTATS ET DISCUSSION

Débts simulés: comparaison

Les débits journaliers sont simulés par SRM pendant la période de fonte (à partir du 1^{er} janvier jusqu'à 31 mars) pour les années 1999 à 2004 sur les deux bassins versants de Rheraya et d'Ourika en utilisant les deux types de surfaces de neige, celles calculées à partir des données SPOT-VGT « MOD1 » et celles obtenues par la méthode degré jour « MOD2 ». Les valeurs des paramètres appliqués sont ceux calibrés sur l'année 2004 (Tableau 3). Les tableaux 4 et 5 et les graphes des figures 6 et 7 récapitulent les résultats de simulation obtenus pour les deux bassins versants. Le Nash et Dv varient fortement d'une année à l'autre et d'un bassin versant à l'autre. Cela est lié aux variations importantes des conditions climatiques dans l'espace et dans le temps au niveau de la région étudiée. Par exemple, en 1999, les surfaces de neige simulées et calculées sont proches dans la Rheraya (Figure 3), ont une bonne dynamique mais une mauvaise amplitude pour l'Ourika (Figure 4).

En comparant les résultats obtenus avec les deux types de surface de neige (Tableau 4 et 5), on constate que les débits simulés par MOD1 sont en général meilleurs que ceux simulés avec MOD2. Par exemple en 2000, 2002, 2003 et 2004 sur le bassin versant de Rheraya et en 1999, 2000, 2002 et 2004 dans le bassin versant de l'Ourika.

Les débits en 2001 sont mal simulés pour les deux bassins versants, à la fois pour MOD1 et pour MOD2. Cette année a connu une sécheresse sur toute la région. Pour cela le niveau d'eau mesuré à l'exutoire est plus bas et parfois même nul. En 2002, de janvier à avril les débits mesurés sont nuls dans le bassin versant de Rheraya et très faibles sur l'Ourika. Un changement rapide de l'hydrogramme au début du mois d'avril 2002 est observé : les débits passent de 0,09 à 5,63 m³/s en deux jours pour le Rheraya et de 1 à 16,36 m³/s en une semaine. SRM avec MOD1 et MOD2 n'arrive pas à bien simuler les débits dans la première période (1^{er} Janvier au fin mars 2002), cela peut être expliqué par les effets des prélèvements d'eau en amont par les séguias. Alors qu'en période du 1^{er} avril au 31 mai de même année (2002), les débits simulés par MOD1 sont plus acceptables que MOD2 pour les deux bassins versants (Figures 6 et 7).

RHERAYA	MOD1		MOD2	
	DV	NASH	DV	NASH
1999	-1,15	0,13	12,00	0,29
2000	-9,59	0,65	-7,85	0,36
2001	-5,68	-1,42	-13,00	-4,10
2002	-23,50	0,67	-2,08	0,54
2003	-6,04	0,53	-36,72	-0,71
2004	-0,18	0,86	-2,93	0,78

Tableau 4 : Variation de Nash et Dv en appliquant SRM sur le bassin versant de Rheraya avec MOD1 et MOD2.

OURIKA	MOD1		MOD2	
	DV	NASH	DV	NASH
1999	-12,20	0,72	9,38	0,57
2000	-8,82	0,63	26,50	0,31
2001	-26,42	-0,62	30,00	0,17
2002	-14,00	0,71	17,80	0,54
2003	-9,3	0,29	7,04	-0,91
2004	0,69	0,79	9,64	0,72

Tableau 5 : Variation de Nash et Dv en appliquant SRM sur le bassin versant d'Ourika avec MOD1 et MOD2.

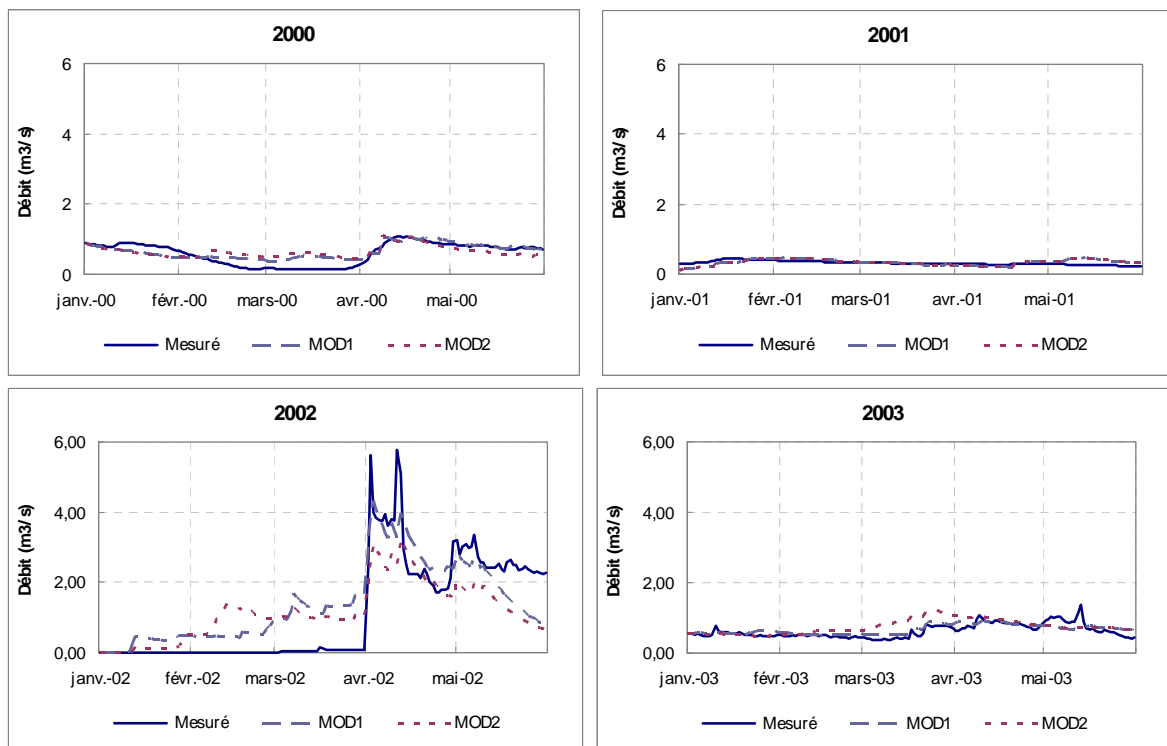


Figure 6 : Comparaison des débits mesurés, simulés MOD1 et simulés MOD2 dans le bassin versant de Rheraya

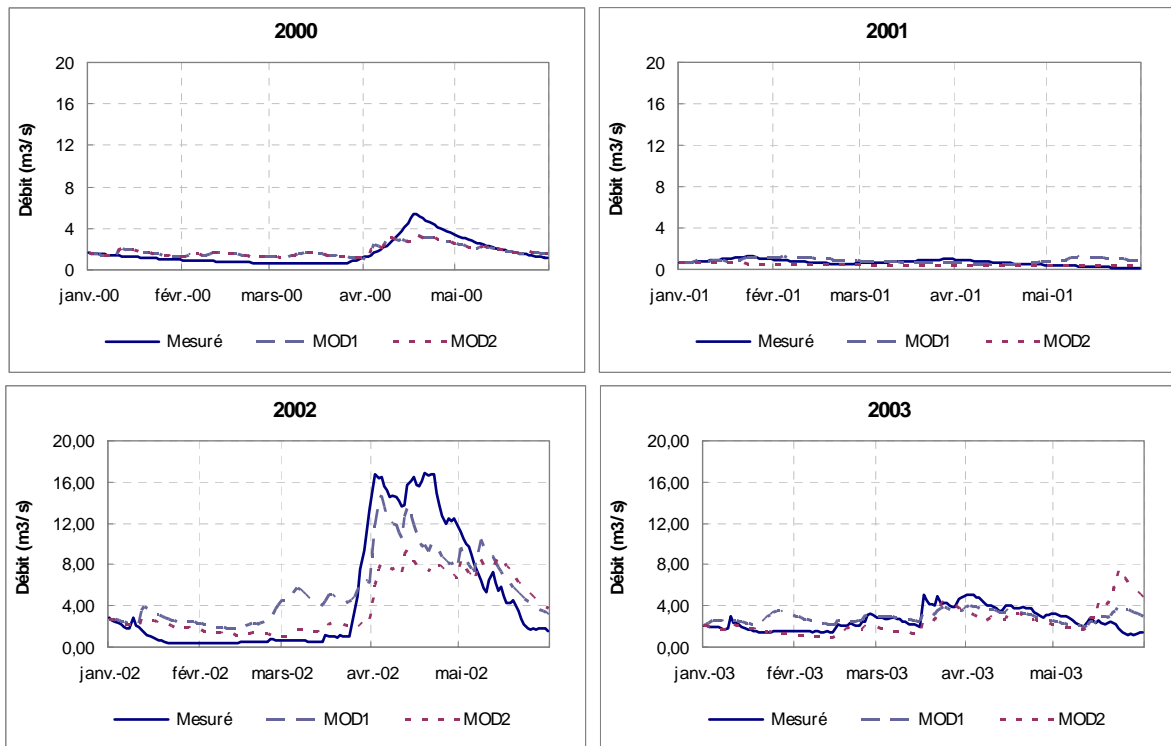


Figure 7 : Comparaison des Débits mesurés, simulés MOD1 et simulés MOD2 dans le bassin versant de l'Ourika

Les simulations des débits par MOD2 sont conditionnées par les précipitations qui sont mal réparties sur toutes les zones altitudinales. Par contre en MOD1, les surfaces de neige calculées par télédétection peuvent compenser partiellement quelques erreurs d'enregistrement des pluies. L'exemple (rectangles en rouge) dans la *figure 8* illustre le grand décalage entre les surfaces générées et les surfaces calculées à partir des données Spot-VGT. Pendant les périodes comprises du 1^{er} janvier au 17 février 2002, du 24 février au 2 mars 2002 et du 24 mars au 27 mars 2002), les surfaces de neige calculées à partir des données Spot-VGT sont respectivement de 10, 40 et 30 %. Par contre les surfaces de neige calculées à partir des données météorologiques (Température et précipitations) aux mêmes périodes sont nulles. Cette différence entre les deux types de surfaces de neige a un impact important sur les débits simulés. Par exemple en mois d'avril 2002, on note une sous-estimation des débits calculés par MOD2 que MOD1, la différence entre le volume d'eau observé et calculé par MOD1 est de 27%, et par MOD2 est de 49%.

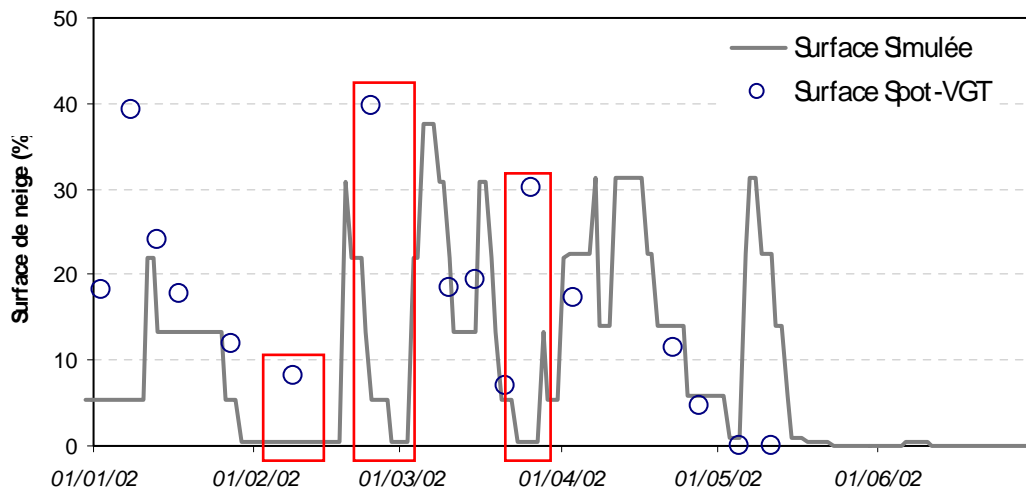


Figure 8 : Exemple de décalage (cadres rouges) entre la surface de neige générée et calculée à partir de Spot-VGT en 2002 dans le bassin versant de l'Ourika.

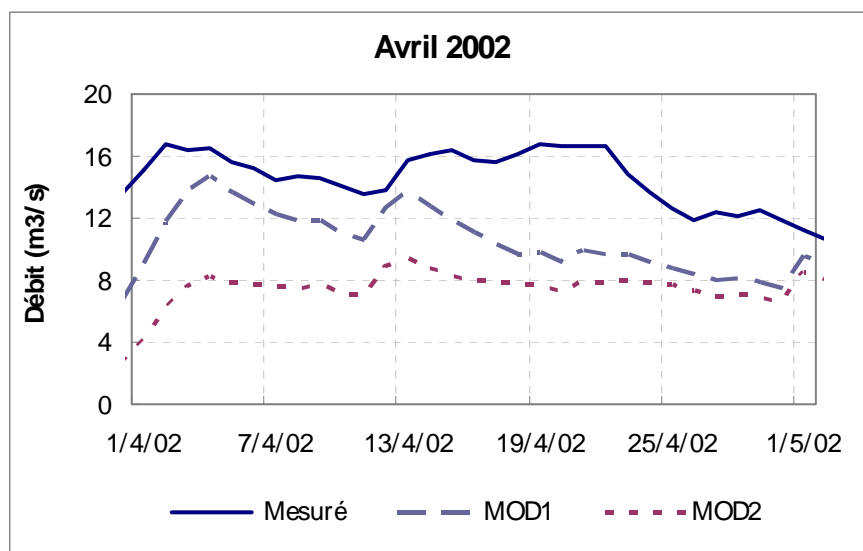


Figure 9 : Comparaison des débits calculés par MOD1 et MOD2 en Avril 2002.

Enfin, le contraste des résultats de simulation des débits dans les deux bassins versants peut être expliqué par :

- i. **La fiabilité des données mesurées** : on ne dispose pas des données de précipitations et de température bien spatialisées sur toutes les altitudes. Les débits mesurés ne sont pas toujours correctes ;
- ii. L'effet sur les débits réels des **prélèvements d'eau par les séguia**, surtout en période de sécheresse et en été. Cette eau est utilisée pour l'agriculture au niveau des petites parcelles au bord des oueds et aussi pour l'alimentation en eau des populations dans le piémont.
- iii. **Les conditions climatiques de la région**. Caractérisée par une très forte variabilité des précipitations d'une année à l'autre, en quantité et en distribution spatio-temporelle.

Les pluies convectives caractérisant la région sont ainsi responsables de changements importants de la section de l'oued après les crues et ne sont pas suivies systématiquement. Les pertes d'eau par l'évaporation et la sublimation sont également deux facteurs majeurs dans cette région. Sur le sud du Haut Atlas, Shultz et Dejong 2004 ont observé une importante sublimation de la neige. Ces deux derniers facteurs, ne sont pas pris en compte lors des simulations des débits par un modèle simple tel que SRM. Il serait souhaitable de pouvoir quantifier ces deux flux par une modélisation physique associée à un dispositif instrumental dédié au suivi du couvert neigeux en quelques localisations clefs du bassin.

CONCLUSION

Cette étude a permis d'évaluer l'apport de l'assimilation de chroniques des surfaces de neige obtenues à partir des données SPOT-VGT tout au long de la période 1999-2004. Elle a permis de montrer que l'ajout de cette information permet d'améliorer les prévisions des débits par le modèle SRM dans des zones où les données météorologiques ne sont pas toujours disponibles, ce qui est largement le cas du Haut Atlas marocain. La prévision des débits dans les régions montagneuses des milieux arides et semi arides par un modèle simple tel que SRM présente un certain nombre de limites et n'est pas toujours efficace. Cela est accentué pour les années où les débits sont plus faibles pour une longue période ainsi que dans les saisons qui connaissent un contraste élevé des conditions climatiques (précipitations et température). Afin de bien comprendre les processus entrant en jeu dans l'hydrologie de ces régions, comme la quantité d'eau évaporée, sublimée et les infiltrations au niveau du sol, un modèle à base physique doit être testé.

Remerciement

Les auteurs remercient les organismes qui ont participé à la collecte des données hydroclimatiques utilisées dans cette étude (Agence de Bassin Hydraulique du Tensift et Club Alpin Français). Les auteurs remercient le programme VEGETATION pour la mise à disposition des images SPOT-VGT. Les auteurs ont bénéficié d'un financement du Ministère des Affaires Etrangères français et du Ministère marocain de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche Scientifique et de la Formation des Cadres (Programme d'Action Intégrée Volubilis « Gestion durable des ressources en eau dans le bassin versant de Tensift (région de Marrakech, n°MA/148/06) »).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Boudhar A. et al.(2007). Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas Marocain à partir des données SPOT-VEGETATION. *Sécheresse*2007, 18, (4) :1-11.
- Bergstrom S. 1975. The development of a snow routine for the HBV-2 model. *Nordic Hydrology* **6**: 73–92.
- Chaponnière A et al. (2005). A combined high and low spatial resolution approach for mapping snow. *International Journal of Remote Sensing*; **26** : 2755 – 2777.
- Chaponnière A., G. Boulet G., A. Chehbouni A. et Aresmouk M (2008). Understanding hydrological processes with scarce data in a mountain environment. *Hydrological Processes*, DOI: 10.1002/hyp.6775.
- Collins EH. 1934. Relationship of degree-days above freezing to runoff. *Transactions of the American Geophysical Union, Reports and Papers, Hydrology*: 624–629.
- Clyde GD. 1931. *Snow melting characteristics*. Utah Agricultural Experiment Station, Bulletin No. 231.
- De Solan et al. (2002). Cartographie de l'enneigement par télédétection à partir d'images SPOT-VEGETATION et Landsat-TM: application a` l'Atlas marocain. Séminaire international, Hydrologie nivale en méditerrané, Décembre 2002, Beyrouth, Lebanon.
- Hanich et al. (2003). Snow cover mapping using SPOT-VEGETATION with high resolution data: application in the Moroccan Atlas Mountains. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 21–25 July 2003, Toulouse, France.
- Ferguson RI. 1999. Snowmelt runoff models. *Progress in Physical Geography* **23**: 205–227.
- Gomez L. and Rango A., 2002, Operational snowmelt runoff forecasting in the Spanish Pyrenees using the snowmelt runoff model. *Hydrological Processes*. 16, 1583–1591.
- Jesko Schaper, Jaroslav Martinec and Klaus Seidel (1999) Distributed mapping of snow and glaciers for improved runoff modelling. *Hydrological Processes*. 13, 2023-2031.

Klaus Seidel (1998). Effects of climate change on water resources and runoff in an Alpine basin, *Hydrological Processes*. 12, 1659-1669.

Lissens, G., Kempeneers P, Fierens F (2000). Development of a cloud, snow and cloud shadow mask for VEGETATION imagery. Proceedings of VEGETATION. Symposium, 3–6 April 2000, Lake Maggiore, Italy.

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.

Martinec, J., 1960. The degree-day factor for snowmelt runoff" forecasting. IUGG General Assembly of Helsinki, IAHS Commission of Surface Waters, IAHS Publ. No. 5 I, pp. 468—477.

Martinec J. 1975. Snowmelt-runoff model for stream flow forecasts. *Nordic Hydrology* **6**: 145–154.

Martinec J. 1985. Snowmelt runoff models for operational forecasts. *Nordic Hydrology* **16**: 129–136.

Martinec J, Rango A. 1981. Areal distribution of snow water equivalent evaluated by snow cover monitoring. *Water Resources Research* **17**: 1480–1488.

Martinec J, Rango A. 1986. Parameter values for snowmelt runoff modeling. *Journal of Hydrology* **84**: 197–219.

Martinec J, Rango A. 1987. Interpretation and utilization of areal snow-cover data from satellites. *Annals of Glaciology* **9**: 166–169.

Martinec J. 1991. Areal modeling of snow water equivalent based on remote sensing techniques. In *Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas*, Bergmann H, Lang H, Frey W, Issler D, Salm B (eds). IAHS Publication No. 205. IAHS Press: Wallingford; 121–129.

- Martinec J, Rango A. 1995. Seasonal runoff forecasts for hydropower based on remote sensing. In *Proceedings of the 63rd Western Snow Conference*, Reno, NV, USA; 10–20.
- Martinec J, Rango A, Robert R. 1998. *Snow Runoff Model (SRM) User's Manual*. <http://hydrolab.arsusda.gov/cgi-bin/srmhome> [13 July 2003].
- Mitchell KM, DeWalle DR. 1998. Application of the snowmelt runoff model using multiple-parameter landscape zones on the Towanda Creek basin, Pennsylvania. *Journal of the American Water Resources Association* **34**: 335-346.
- Potts HL. 1937. Snow surveys and runoff forecasting from photographs. *Transactions of the American Geophysical Union, South Continental Divide Snow-Survey Conference*: 658–660.
- Rango A, Martinec J. 1979. Application of a snowmelt-runoff model using Landsat data. *Nordic Hydrology* **10**: 225–238.
- Rango A, Martinec J. 1981. Accuracy of snowmelt runoff simulation. *Nordic Hydrology* **12**: 265–274.
- Rango A. 1986. Progress in snow hydrology remote-sensing research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **24**: 47–53.
- Rango A, van Katwijk V. 1990. Development and testing of a snowmelt-runoff forecasting technique. *Water Resources Bulletin* **26**: 135–144.
- Rango A. 1996. Spaceborne remote sensing for snow hydrology applications. *Hydrological Science Journal* **41**: 477–494.
- Rango A, Martinec J. 1997. Water storage in mountain basins from satellite snow cover mapping. In *Remote Sensing and Geographical Information Systems for Design and Operation for Water Resources System*, Baumgartner MF, Schultz GA, Johnson AI (eds). IAHS Publication No. 242. IAHS Press: Wallingford; 83–91.
- Rodriguez JY. 1994. An operational forecasting snowmelt model with objective calibration. *Nordic Hydrology* **25**: 79–100.

Shafer BA, Jones EB, Frick DM. 1982. *Snowmelt runoff simulation using the Martinec–Rango model on the South Fork Rio Grande and Conejos River in Colorado*. AgRISTARS Report. CP-G1-04072, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA.

Schulz O. and Jong C (2004). Snowmelt and sublimation: field experiments and modelling in the High Atlas Mountain of Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), 1076–1089.

Songweon Lee (2005). A comparison of MODIS and NOHRSC snow-cover products for simulating streamflow using the Snowmelt Runoff Model. *Hydrol. Process.* 19, 2951–2972.

Thomas Nagler et al. (2008), Assimilation of meteorological and remote sensing data for snowmelt runoff forecasting, *Remote Sensing of Environment*, 112(4): 1408-1420.