

**Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut
Atlas marocain à partir des données
SPOT-VEGETATION**

A. Boudhar, Benoît Duchemin, L. Hanich, A. Chaponnière, P. Maisongrande,
Gilles Boulet, J. Stitou, Abdelghani Chehbouni

► **To cite this version:**

A. Boudhar, Benoît Duchemin, L. Hanich, A. Chaponnière, P. Maisongrande, et al.. Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas marocain à partir des données SPOT-VEGETATION. Science et changements planétaires / Sécheresse, John Libbey Eurotext, 2007, 18 (4), pp.278-288. 10.1684/sec.2007.0100 . ird-00389098

HAL Id: ird-00389098

<https://hal.ird.fr/ird-00389098>

Submitted on 28 May 2009

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

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

Abdelghani Boudhar¹
 Benoît Duchemin²
 Lahoucine Hanich¹
 Anne Chaponnière³
 Philippe Maisongrande⁴
 Gilles Boulet²
 Jamal Stitou⁵
 Abdelghani Chehbouni²

¹ Faculté des sciences et techniques de Marrakech, Avenue A. Khattabi, BP 549, Marrakech Maroc
 <boudhar22@yahoo.fr>
 <hanich@fstg-marrakech.ac.ma>

² Institut de recherche pour le développement (IRD), Unité mixte de recherche (UMR) Centre d'études spatiales de la biosphère (Cesbio), 18, avenue Édouard Belin, BPI 2801, Toulouse cedex 4 France

<benoit.duchemin@ird.fr>
 <gilles.boulet@ird.fr>
 <ghani.chehbouni@ird.fr>

³ International Water Management Institute (IWMI)-West Africa, PMB CT 112, Cantonments, Accra Ghana

<anne_chapo@yahoo.fr>
⁴ Centre national d'études spatiales (Cnes), Unité mixte de recherche (UMR) Centre d'études spatiales de la biosphère (Cesbio), 18, avenue Édouard Belin, BPI 2801, Toulouse cedex 4 France

<philippe.maisongrande@cesbio.cnes.fr>
⁵ Faculté des sciences de Tétouan, Mhanech II, BP 2121, Tétouan Maroc

<stitoumessari@yahoo.fr>
 Tirés à part : L. Hanich

Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas marocain à partir des données SPOT-VEGETATION

Résumé

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 eaux 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. Les variations spatiales et temporelles de la couverture neigeuse sont analysées à l'échelle du Haut Atlas, ainsi qu'au niveau des cinq grands bassins-versants qui alimentent la plaine du Haouz. Cette analyse et la confrontation avec les mesures hydrométéorologiques disponibles permettent de conforter les estimations des surfaces enneigées. Cette étude montre l'intérêt de la télédétection pour observer durablement la variabilité intra- et interannuelle de l'enneigement dans des régions peu accessibles où le réseau d'observation climatique est insuffisant. Le potentiel de ces données pour étudier le régime hydrologique de régions semi-arides est également souligné.

Mots clés : bassin-versant, distribution spatio-temporelle, enneigement, hydrologie, imagerie satellitaire et géomatique, Maroc, ressource en eau, télédétection, zone de montagne

Abstract

Analysis of snow cover dynamics in the Moroccan High Atlas using SPOT-VEGETATION data

The Moroccan High-Atlas mountain range represents the most important "water tower" for the neighbouring arid regions, especially the Haouz plain in the surroundings of Marrakech. Water resources are facing enormous pressure and sustainable water management is a priority for the regional authority. Within this framework, a precise understanding of the processes and variables that drive the hydrological cycle is required. The contribution of liquid and solid precipitations to the runoff of the Tensift main sub-basins is of particular interest. In this context, we used a 7-year time series of SPOT-VEGETATION images to map the snow covered areas. The spatial and temporal variations of the snow pack were analysed over the entire High Atlas mountain range as well as over the five main tributary basins of the Haouz plain.

These variations were evaluated against available hydro-climatic data (precipitation, temperature and runoff). This study demonstrates how remote sensing data can be used for long-term observation of the inter- and intra-annual variability of snow covered areas in a region where the meteorological observation network is insufficient. The potential of such data in studying the hydrology of semi-arid regions is also emphasized.

Key words: hydrology, Morocco, mountainous zone, remote sensing, satellite imaging and geomatics, space-time distribution, water resources, watershed, snow cove

L'enneigement est un paramètre fondamental du cycle hydrologique et climatologique de la terre. Le manteau neigeux constitue un stock d'eau pour le printemps et l'été, et son évolution peut être aussi considérée comme un indicateur des changements environnementaux [1]. Par conséquent, la connaissance de sa dynamique spatio-temporelle est nécessaire pour modéliser correctement le cycle hydrologique [2, 3].

Dans les zones arides et semi-arides, les précipitations en montagne sont souvent la principale source d'eau pour les populations vivant en aval. Les régions montagneuses jouent de ce fait un rôle primordial car elles permettent l'alimentation en eau des régions avoisinantes et contribuent d'une manière significative à la recharge de la nappe. Dans certaines régions méditerranéennes, une part importante de l'eau douce est stockée temporairement sous forme de neige avant d'être disponible à travers les écoulements de surface pendant la période de fonte. Au Liban par exemple, l'eau de fonte de neige contribue approximativement aux deux tiers du volume total annuel des débits [4]. Au Maroc, et plus particulièrement dans les régions du pourtour de l'Atlas, la nature irrégulière des précipitations, combinée à une évaporation généralement élevée, rend délicate une gestion prévisionnelle de l'eau [5]. Il est par conséquent important de bien comprendre les processus et les variables contrôlant le cycle hydrologique dans ces régions. Dans ce contexte et dans le cadre du projet SudMed [6]¹, nous avons examiné la possibilité d'utiliser la télédétection spatiale pour quantifier la dynamique spatiale et temporelle du manteau neigeux dans la chaîne montagneuse du Haut Atlas marocain.

L'imagerie satellitaire est un outil particulièrement adapté à l'étude de grandes régions. Elle permet d'obtenir des observations régulièrement distribuées dans le temps et dans l'espace (NOAA-AVHRR depuis 1980, TERRA-MODIS et SPOT-VEGETATION depuis la fin des années 1990). Les propriétés optiques de la neige

(réflectance élevée dans le domaine du visible et du proche infrarouge et absorption élevée dans le domaine du moyen infrarouge) sont contrastées par rapport à la plupart des autres surfaces terrestres. Ces propriétés ont été utilisées pour cartographier l'étendue du manteau neigeux à partir de différents capteurs satellitaires, par exemple Thematic Mapper (TM), SPOT-VEGETATION, NOAA-AVHRR [7-10]. Le suivi de la dynamique du manteau neigeux nécessite l'utilisation de données à haute répétitivité temporelle comme celles issues des capteurs à large champ qui permettent, contrairement aux données à haute résolution spatiale, d'observer quasi quotidiennement la terre. C'est le cas des observations SPOT-VEGETATION utilisées ici. Ce capteur observe la terre depuis avril 1998 dans quatre bandes spectrales dont une située dans le moyen infrarouge (autour de 1,65 μm) particulièrement utile à la détection des surfaces enneigées. Le système SPOT-VEGETATION bénéficie en outre d'une qualité géométrique nettement supérieure à celle de l'AVHRR dont la bande moyen infrarouge (3,7 μm) est plus difficile à exploiter car dans cette région du spectre électromagnétique le rayonnement enregistré provient à la fois des réflexions solaires et des émissions thermiques des surfaces observées.

Dans ce contexte, la question abordée dans cette étude est double : i) est-il possible d'utiliser la télédétection basse résolution pour caractériser la distribution spatiale du manteau neigeux du Haut Atlas marocain ? ; ii) comment les longues séries d'observations satellite permettent-elles de restituer la variabilité intra et inter-annuelle de l'enneigement et comment celles-ci sont-elles corrélées avec les autres données hydroclimatiques ? Pour apporter des éléments de réponse à ces questions, nous avons utilisé une archive de sept années de données acquises par le capteur SPOT-VEGETATION (1998-2005). Après avoir décrit la région d'étude, nous présentons la méthodologie utilisée pour cartographier les surfaces enneigées à partir d'un indice de neige construit à partir des images VEGETATION. Les variations spatiales et temporelles de la couverture neigeuse sont ensuite

étudiées à l'échelle du Haut Atlas (par tranche altitudinale et par exposition) ainsi qu'au niveau des cinq grands bassins-versants qui alimentent la plaine de Marrakech (Haouz). Dans la dernière partie de cet article, ces variations sont confrontées avec les mesures météorologiques et hydrologiques disponibles (précipitations, températures et débits) aux échelles saisonnières et interannuelles.

Région d'étude et données *in situ*

Le Haut Atlas marocain est une chaîne montagneuse d'environ 60 km de large sur 800 km de long orientée NE-SW. Elle culmine à 4 167 m d'altitude au Jbel Toubkal, le plus haut sommet d'Afrique du Nord. Du point de vue géologique, le massif atlasique se caractérise par des formations calcaires perméables peu répandues et des formations marno-gréseuses souvent salifères et très peu perméables dans la partie orientale du bassin-versant du Tensift. Dans les parties les plus hautes de la chaîne, les formations métamorphiques et éruptives imperméables prédominent. La végétation est peu abondante, elle est présente principalement sur les piémonts et les fonds de vallées [11]. Cette absence de végétation rend l'identification des surfaces enneigées plus aisée.

La partie centrale du Haut Atlas marocain surplombe les plaines arides du Haouz au nord et du Souss au sud-ouest ainsi que les vallées du Drâa et du Dadès au sud-est. C'est le véritable château d'eau de ces régions : en moyenne annuelle sur la période 1970-2003, les précipitations sont par exemple de 536 mm à la station d'Aghbalou dans le bassin-versant de l'Ourika (en montagne, à 1 018 m d'altitude) contre 223 mm à Marrakech (en plaine, à 450 m d'altitude). Le réseau des oueds prenant naissance au cœur de la chaîne joue par conséquent un rôle primordial dans l'alimentation des barrages et la recharge des nappes phréatiques. C'est le cas pour le bassin-versant du Tensift qui entoure la région de Marrakech, où des demandes (tensions) croissantes s'exercent sur la ressource hydrique

¹ <http://www.irrimed.org/sudmed/presentation>.

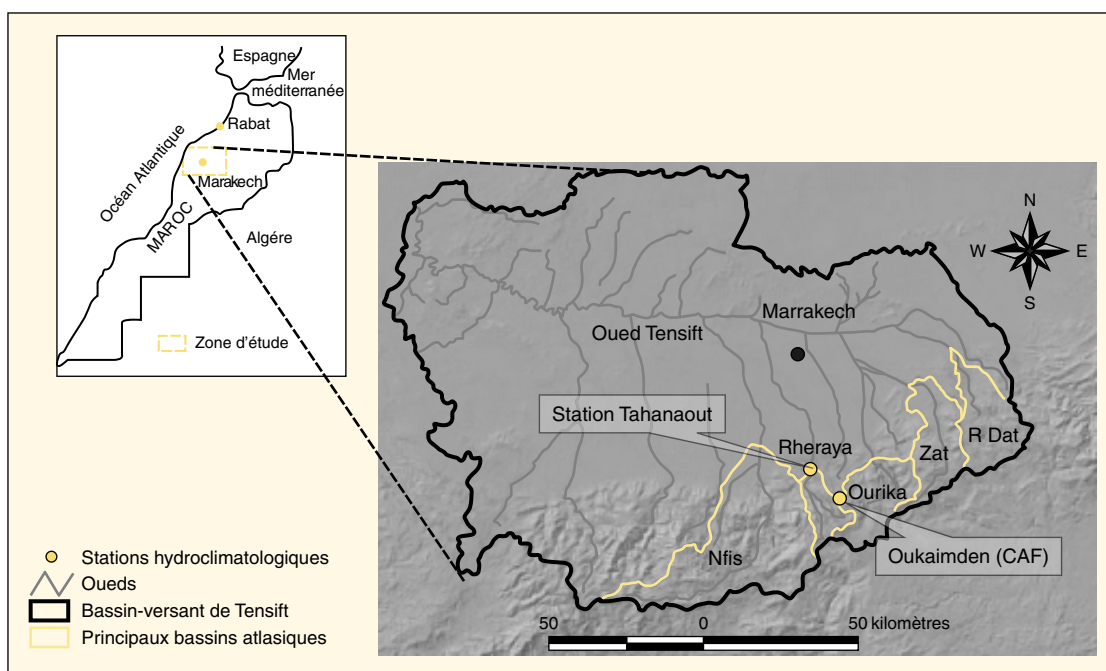


Figure 1. Situation de la zone d'étude.

(accroissement démographique, développement du tourisme et extension de l'agriculture irriguée qui consomme à elle seule plus de 85 % de l'eau mobilisable).

Les bassins-versants étudiés sont les cinq principaux bassins qui alimentent la plaine du Haouz (figure 1). Ils se situent à quelques dizaines de kilomètres au Sud et à l'Est de la ville de Marrakech entre les latitudes 30°87' à 31°66' Nord et les longitudes 7°22' à 8°67' Ouest. Ils constituent la limite sud du bassin-versant de Tensift, avec d'ouest en est, le Nfis, la Rheraya, l'Ourika, le R'Dat et le Zat. Les caractéristiques morphologiques de chaque bassin sont présentées dans le tableau 1 et la figure 2. Le bassin du Nfis est le plus grand (1 700 km²) suivi par les trois bassins de l'Ourika, du Zat et du R'Dat (environ 520 km²), puis celui de la Rheraya (250 km²). Les points culminants des cinq bassins sont tous très élevés (3 875 m pour le Zat à 4 086 m pour l'Ourika) mais les altitudes moyennes varient de 1 730 m (R'Dat) à 2 441 m

(Ourika). En première analyse, on distinguera les bassins de basses (Nfis, Zat et R'Dat) et de hautes altitudes (Ourika et Rheraya). Dans cette étude, nous avons utilisé :

- des relevés journaliers des débits et des précipitations effectués par l'Agence du bassin hydraulique de Tensift (ABHT) à l'exutoire de ces cinq bassins ;
- des données de températures et précipitations journalières mesurées à la station du Club alpin français (CAF) à l'Oukaimeden ;
- des données de températures et précipitations journalières collectées à la station automatique installée à l'Oukaimeden dans le cadre du projet SudMed.

Données spatiales

Données SPOT-VEGETATION

Les capteurs VEGETATION, lancés à bord des satellites Spot 4 et 5, comprennent un système imageur dans quatre bandes

spectrales (bleu : 0,43-0,47 µm, rouge : 0,61-0,68 µm, PIR² : 0,78-0,89 µm et MIR³ : 1,58-1,75 µm). Le champ d'ouverture est de 0 à 55° de part et d'autre de la trace du satellite, permettant l'acquisition de données sur une largeur de bande au sol (fauchée) d'environ 2 200 km. La taille du pixel au nadir est de 1,15 × 1,15 km. VEGETATION est doté d'un système qui compense en partie la perte de résolution spatiale en visée oblique. Les satellites Spot 4 et 5 suivent une orbite héliosynchrone inclinée de 98,72 degrés par rapport à l'équateur à une hauteur d'environ 830 km. Leur durée de révolution est de 101 minutes. Ces caractéristiques techniques et orbitales font que l'instrument VEGETATION voit 90 % de l'équateur chaque jour, les 10 % restant étant vus le lendemain⁴. Depuis le lancement du capteur VEGETATION-1 (1998), deux types de produits sont proposés aux utilisateurs [12] :

- produits P (utilisés dans cette étude) : ils correspondent à une acquisition (quasi instantanée) par le capteur lors du passage du satellite. Les luminances enregistrées sont étalonnées et normalisées par rapport à l'éclairement solaire. Les comptes numériques représentent la réflectance appa-

Tableau 1. Caractéristiques géomorphologiques des bassins-versants atlasiques étudiés.

Bassin-versant	Surface (km ²)	Longueur du cours d'eau principal (km)	Altitudes (m)			
			minimale	maximale	médiane	moyenne
Nfis	1 700	152	597	4 077	1 871	1 867
Rheraya	225	45,6	1 039	4 086	2 023	2 164
Ourika	506	26,2	978	3 981	2 430	2 441
R'Dat	558	61,1	645	3 891	1 711	1 730
Zat	540	27,9	722	3 875	1 786	1 809

² PIR : proche infrarouge.

³ MIR : moyen infrarouge.

⁴ Des compléments d'informations sont disponibles sur les sites suivants : www.spot-vegetation.com, www.vgt.vito.be, www.spoti-mage.fr.

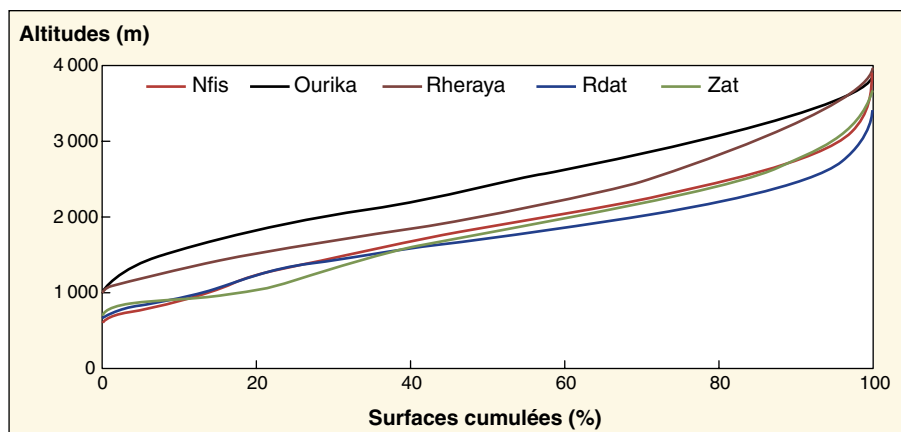


Figure 2. Courbes hypsométriques des cinq sous-bassins atlasiques étudiés.

rente au sommet de l'atmosphère dans les quatre bandes spectrales précitées ;

– produit S : ils sont obtenus en faisant une synthèse de plusieurs images de la même zone acquises sur une période de 10 jours, ceci afin de limiter la présence de nuages. Le procédé de synthèse consiste en la sélection, dans cette période, de la meilleure observation (technique du *Maximum Value Composite* [13, 14]) ou de toutes les observations non nuageuses, qui sont ensuite moyennées après normalisation dans une configuration soleil-cible-capteur fixe (*BiDirectional Compositing* [15]). Ces données ne sont pas adaptées à l'étude des surfaces enneigées dans les régions où la couverture neigeuse présente une forte variabilité spatio-temporelle.

Les deux types de produits sont corrigés des effets géométriques et fournis dans un système de représentation géographique « plate-carrée » où chaque pixel correspond à un « carré » dont le côté mesure 1/112°.

Traitement des images sur le Haut Atlas

L'archive de produits SPOT-VEGETATION P analysée couvre les années hydrologiques 1998-1999 à 2004-2005 (du 1^{er} septembre au 30 juin, soit environ 300 images par saison). Les images acquises de 1998 à 2002 ont été traitées dans des travaux antérieurs [2], alors que les images de 2002 à 2005 ont été collectées et traitées pour cette étude afin d'éliminer les images acquises aux angles de visées les plus obliques et de sélectionner les images non nuageuses. Ces images sont considérées comme superposables : aucun traitement géométrique supplémentaire n'a été opéré.

Le relief très accidenté de la zone d'étude rend difficile l'interprétation des images acquises en visée très oblique. Nous avons retenu les images acquises avec un

angle de visée inférieur à 23°, ce qui permet de conserver environ 8 images sur 26 jours. Cette sélection permet de limiter les effets relatifs aux variations de la géométrie soleil-cible-capteur.

Pour identifier les nuages, nous avons dans un premier temps repéré les images présentant des réflectances bleues supérieures à 20 % sur le piémont atlasique (4 900 pixels en moyenne). Ces réflectances sont caractéristiques des nuages ou de la neige. Le masque utilisé concernant les altitudes inférieures à 1 000 m, nous pouvons attribuer ces fortes réflectances à la présence des nuages. Ce premier tri est relativement grossier mais possède l'avantage d'être automatisable. Il permet d'éliminer un grand nombre d'images nuageuses sur le piémont de l'Atlas, donc très probablement nuageuses sur les sommets de l'Atlas. Dans une deuxième étape, nous avons repéré visuellement les nuages sur les images restantes.

Le nombre d'images retenues après ces deux phases de traitement est respectivement de 36, 34, 23, 24, 35, 37 et 34 pour les saisons 1998-1999, 1999-2000, 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004 et 2004-2005. Cette analyse ramène la fréquence des observations à un ratio d'environ 30 images sur 300, c'est-à-dire 1/10 comme les produits S10, mais, à l'inverse de ces derniers, la distribution temporelle des données sélectionnées à partir du produit P est irrégulière.

Estimation des surfaces enneigées à partir de SPOT-VEGETATION

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 (équation 1), du capteur VEGETATION [16]. Cet indice a été retenu après avoir été comparé avec d'autres dans le cas du Haut Atlas marocain [17, 18], puis amélioré pour réduire l'influence des variations des signatures spectrales du sol par le calcul d'un indice de neige modifié (MSI⁵, équation 2) [2].

$$SI = \frac{BO + B2}{2} - MIR \quad (1)$$

BO, B2 et MIR sont respectivement les réflectances dans le bleu, le rouge et le MIR.

$$MSI = SI - SIO * \frac{SI100 - SI}{SI100 - SIO} \quad (2)$$

SIO est l'indice de neige des pixels sans neige ; il est calculé à partir des données acquises en dehors de la saison hivernale et varie spatialement. SI100 est l'indice de neige d'un pixel « moyen » totalement couvert par la neige ; il est obtenu à partir des plus fortes valeurs observées durant l'hiver.

La surface enneigée dans chaque pixel a été calculée en appliquant l'équation exponentielle (équation 3) établie par Chaponnière *et al.* (2005) après l'analyse combinée de données SPOT-VEGETATION et d'images à haute résolution spatiale Landsat-TM [2] :

$$\text{Surface}(\text{km}^2) = 0,84 * [1 - 0,49 * \text{EXP}(-0,69 * (MSI/100) + 1)]^{20} \quad (3)$$

Cette méthodologie (calcul du MSI par l'équation 2, calcul de la surface par l'équation 3) est appliquée *stricto sensu* dans cette étude. En raison de la projection « plate-carrée », le facteur 0,84 de cette équation permet d'exprimer la surface en km², de chaque pixel à la latitude de la région étudiée (0,84 = cos (latitude)). Sans l'application de ce facteur, l'équation 3 permet d'évaluer le taux d'enneigement de chaque pixel. La figure 3 présente un exemple de trois cartes d'enneigement successives, le 22 février, le 6 et le 21 mars 2005, obtenues par l'application de l'équation 3. On remarque que le nombre de pixels couverts par la neige augmente du 22 février au 6 mars 2005 (épisode de chute) et diminue par la suite jusqu'au 21 mars (épisode de fonte).

⁵ MSI : *Moisture Snow Index*, indice de neige modifié.

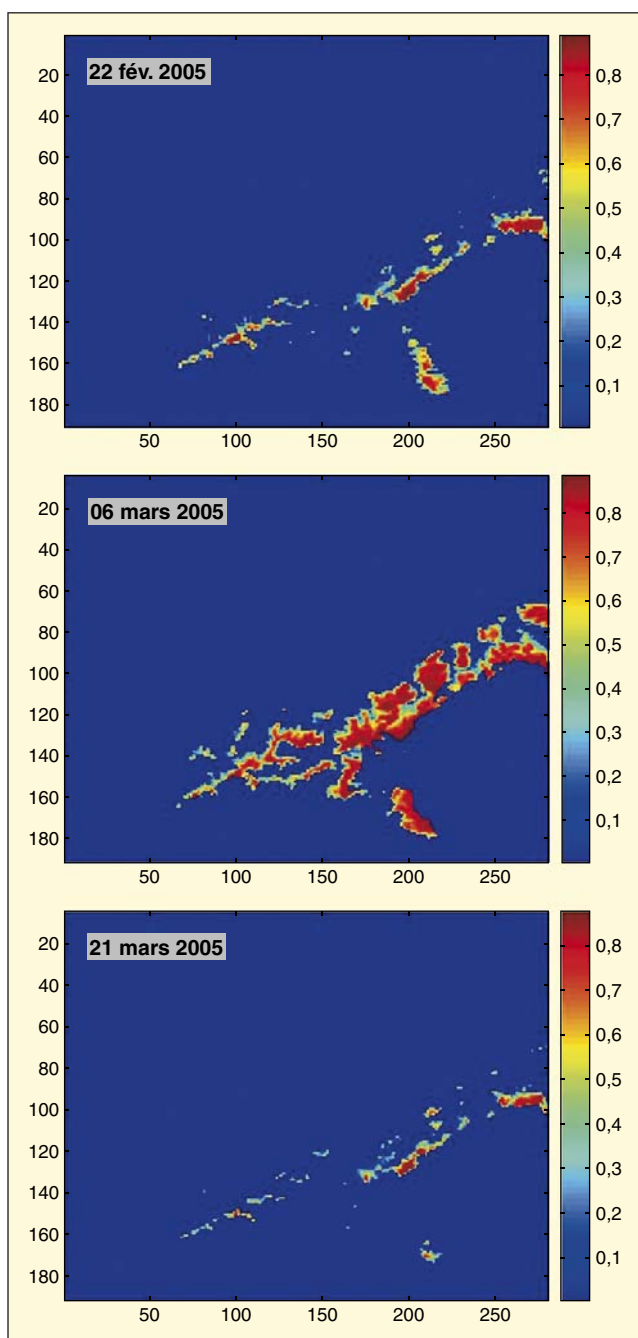


Figure 3. Exemple d'images de proportions de surfaces enneigées au niveau du Haut Atlas obtenues avant, au cours, et après un épisode de chute de neige à partir des données VEGETATION.

Chaque pixel couvre une surface de 0,84 km².

Modèle numérique de terrain (MNT), correction des surfaces enneigées

Le modèle numérique de terrain utilisé dans cette étude provient des données altimétriques recueillies au cours de la mission d'une dizaine de jours de la navette spatiale Endeavour en utilisant l'interférométrie radar (STS 1999). Dispo-

nible à la résolution de 80 m (environ 3 arc-secondes), il a été tout d'abord utilisé pour corriger les estimations 2D des surfaces enneigées. Cette correction est opérée par application de l'équation 4 après extraction de la pente moyenne correspondant à chacun des pixels de l'image. Cette pente moyenne provient du produit pente fabriqué à la résolution nominale du MNT

(environ 80 m ou 3,2 secondes) puis dégradé à la résolution de SPOT-VEGETATION à l'aide du logiciel ENVI.

$$\text{Surface réelle} = \frac{\text{Surface vue du ciel}}{\cos(\text{pente})} \quad (4)$$

Où :

la surface vue du ciel en km² pour chaque pixel est celle calculée par l'équation 3.

Ce MNT a également été utilisé pour dériver des produits utiles à l'interprétation des variations spatiales des estimations des surfaces enneigées. Ainsi les caractéristiques altitudinales des bassins-versants (tableau 1 et figure 2) ont été extraites, et la région d'étude a été segmentée en termes d'altitude (tranches altitudinales de 400 mètres) ou d'exposition (pixel de versant sud ou nord). Cette dernière segmentation a été opérée en calculant la valeur maximale et la valeur minimale des expositions au sein de chaque pixel kilométrique : si le maximum est supérieur à 315° et le minimum est inférieur à 45°, le pixel est sélectionné nord ; si le maximum est inférieur à 225° et le minimum supérieur à 135°, le pixel est sélectionné sud (angles exprimés en considérant le nord comme azimut d'origine 0°).

Variabilité spatiale et temporelle de l'enneigement

Haut Atlas

La figure 4 présente la variation saisonnière des surfaces enneigées calculées pour tout le Haut Atlas sur la période de 1998 à 2005, et le tableau 2 dresse les principales caractéristiques de l'enneigement à partir de ces variations. Cette figure permet de mettre en évidence la forte variabilité saisonnière et interannuelle des précipitations solides. Les épisodes de chute de neige sont marqués par des pics des surfaces calculées, alors que les forts épisodes de fontes y compris en plein cœur de l'hiver, sont marqués par une diminution importante de la surface neigeuse calculée (exemple : surface passant de 2 600 km² à 350 km² entre le 17 et le 27 janvier 2003). L'analyse du tableau 2 permet de conclure que :

- la présence de surfaces enneigées est toujours détectée en hiver, mais avec des recouvrements très variables (2 512 km² le 20 janvier 2001 contre 4 620 km² le 28 décembre 2005) ;
- la période d'enneigement (calculée depuis la date d'apparition des surfaces neigeuses jusqu'à sa disparition) est également très variable : la date du 1er épisode neigeux détecté fluctue entre fin septembre (1998-1999) et fin décembre

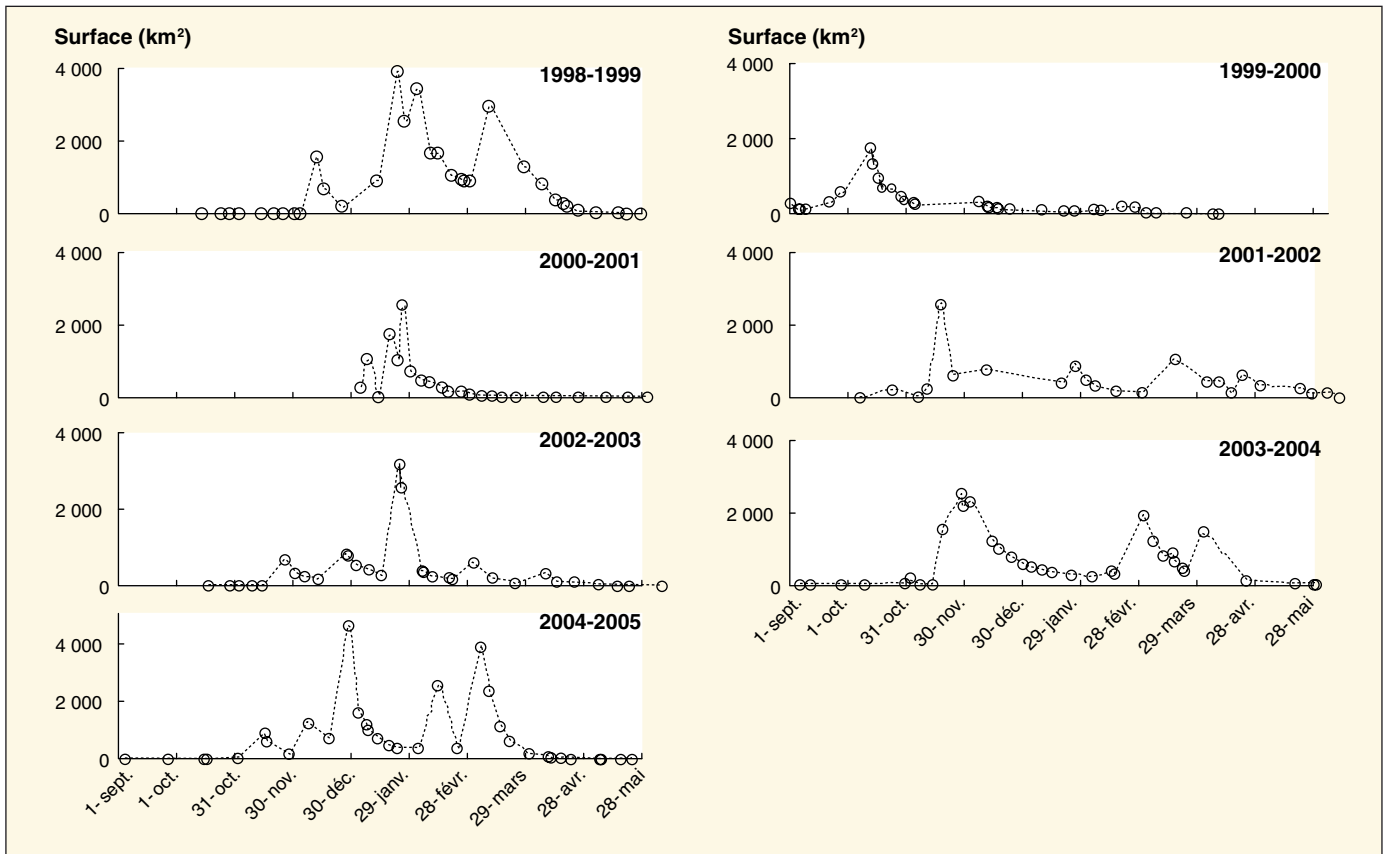


Figure 4. Variation saisonnière des surfaces enneigées sur le Haut Atlas de 1998 à 2005.

Tableau II. Principales caractéristiques de l'enneigement du Haut Atlas cartographié par SPOT-VEGETATION de 1998 à 2005.

Saison	Début de chute	Nombre d'événements	Période de présence de neige	Max		Surface moyenne (km ²)	Observations
				Surface (km ²)	Date		
1998-1999	07 décembre	4	07 décembre-10 avril	3 900	16 janvier	779	Surface très faible à partir du 1 ^{er} novembre (moins de 300 km ²) Images indisponibles avant le 30 décembre Surface inférieure à 200 km ² entre 27 janvier et 8 février Surface inférieure à 100 km ² du 3 au 14 mars
1999-2000	20 septembre	2	20 septembre-18 février	1 745	11 octobre	312	
2000-2001	30 décembre	3	30 décembre-19 février	2 512	20 janvier	385	
2001-2002	16 octobre	4	16 octobre-22 avril	2 518	07 novembre	431	
2002-2003	21 novembre	5	21 novembre-29 mars	3 168	16 janvier	379	
2003-2004	02 novembre	3	02 novembre-23 avril	2 564	28 novembre	671	
2004-2005	15 novembre	5	15 novembre-11 avril	4 620	28 décembre	750	

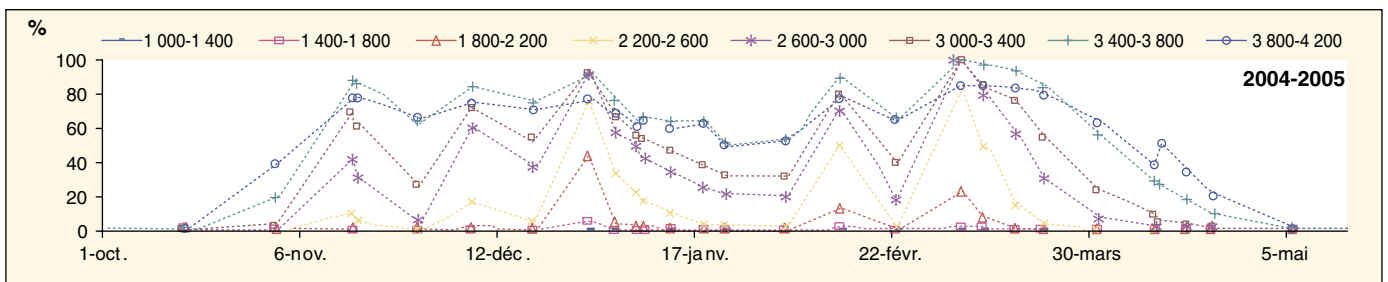


Figure 5. Variation du taux d'enneigement par tranche d'altitude sur le Haut Atlas (saison 2004-2005).

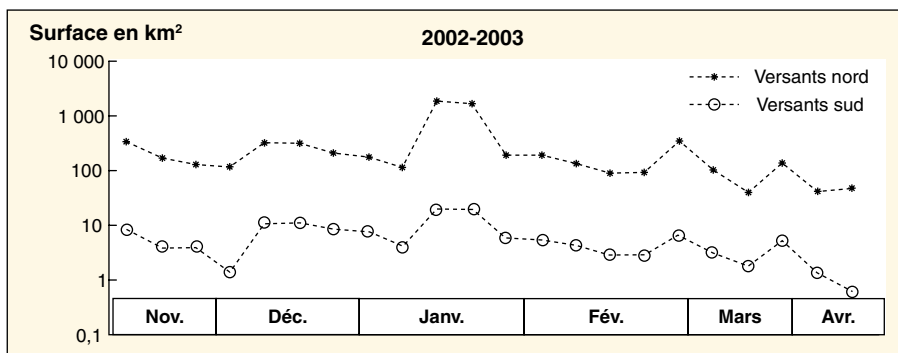


Figure 6. Surfaces enneigées des versants nord et sud du Haut Atlas (saison 2002-2003).

(2000-2001), tandis que les dernières chutes de neige sont enregistrées entre fin janvier (2000-2001) et début avril (2003-2004) ;

– le nombre d'épisodes neigeux détectés par saison varie de un (1999-2000) à cinq (2002-2003 et 2004-2005).

À partir de cette analyse on distingue deux groupes de saisons : trois saisons humides (1998-1999, 2003-2004 et 2004-2005), marquées par une superficie moyenne de la couverture neigeuse de l'ordre de 670 km², contre quatre saisons sèches (1999-2000, 2000-2001, 2001-2002 et 2002-2003) caractérisées par une superficie plus faible (environ 430 km²). Les altitudes d'enneigement minimales, de l'ordre de 1 400 m pour les saisons humides contre 1 800 m pour les saisons sèches, sont également cohérentes avec le régime climatique. Cependant, ces résultats sont à relativiser car ils dépendent en partie de la disponibilité des données non nuageuses (en moyenne quatre données par mois, mais avec de longues périodes sans observations, par exemple de septembre à décembre 2000). Ainsi, étant donné que les épisodes de fonte peuvent être relativement courts, il est possible que certains événements de précipitations solides ne soient pas détectés par manque de données. D'autre part, ceux-ci ne sont détectés que s'ils correspondent à une augmentation de la superficie des surfaces enneigées, ce qui n'est pas le cas lorsqu'il neige sur le manteau neigeux déjà installé. Néanmoins, cette classification en saison sèche ou humide est cohérente avec le régime climatique de la région : pour les saisons humides, la pluviométrie cumulée enregistrée à la station de Tahanaoute, bassin-versant de Rheraya, est de 500 mm/an, tandis que lors des saisons sèches elle ne dépasse pas 280 mm/an. La moyenne des températures maximales mesurée à la station d'Oukaimden entre 1^{er} septembre et 30 juin de chaque saison varie entre 11 et 11,4 °C pour les saisons humides et de 11,4 à 12,2 °C pour les saisons sèches. Les débits moyens enregistrés à l'exutoire du bassin-versant de Rhe-

raya sont de 0,60 m³/s lors des saisons humides et de 0,40 m³/s lors des saisons sèches. On notera enfin que le rapport des débits (0,4/0,6) correspond exactement au rapport des superficies d'enneigement du Haut Atlas (430 km²/670 km²).

La figure 5 montre la variation des surfaces enneigées par tranche d'altitude sur l'ensemble du Haut Atlas de Marrakech, durant la saison 2004-2005. Les premières précipitations solides tombent sur les points culminants (altitudes supérieures à 3 400 m) et le taux d'enneigement croît avec l'altitude, tout comme le caractère permanent du manteau neigeux : pendant la période hivernale, le taux d'enneigement est toujours supérieur à 50 % pour les altitudes supérieures à 3 000 m, alors qu'aucune neige pérenne n'est observée en dessous de 2 600 m. La période de fonte peut être très courte, surtout aux faibles altitudes mais également à des altitudes moyennes, y compris au cœur de l'hiver. On notera par exemple en figure 5 les variations consécutives des surfaces enneigées en janvier (3 460 km² le 28 décembre contre 60 km² le 22 janvier pour les altitudes inférieures à 2 600 m) et mi-février (baisse de 2 450 km² à 300 km² entre le 12 et le 22 février pour les altitudes inférieures à 3 400 m), ces évolutions étant à comparer avec le niveau relativement stable et élevé de l'enneigement pour les altitudes supérieures à 3 400 m entre les premières chutes de

neige, début et mi-novembre, et le début du dernier épisode de fonte printanière à la mi-mars.

La figure 6 montre que l'extension de la couverture neigeuse dépend aussi fortement de l'exposition des versants. Les images VEGETATION mettent bien en évidence que les versants orientés vers le nord reçoivent plus de neige par rapport à ceux orientés vers le sud. Les versants nord du Haut Atlas sont exposés aux perturbations pluvieuses provenant de l'océan atlantique avec une direction nord-ouest. Ces perturbations sont en partie arrêtées par les sommets centraux du Haut Atlas et donc moins actives sur les versants sud qui par ailleurs connaissent également une influence saharienne plus prononcée. De plus, l'ensoleillement est plus important sur les versants exposés au sud.

Cinq principaux bassins-versants

La figure 7 présente les profils de surfaces enneigées calculées en pourcentage sur les cinq bassins-versants pendant la saison 2004-2005. Ces profils sont comparables car il s'agit de l'enneigement sur les versants nord du Haut Atlas. Le taux moyen d'enneigement sur chaque bassin-versant a été calculé sur la période de présence de neige pour les sept saisons étudiées (figure 8). Les deux bassins-versants Rheraya et Ourika ont les taux d'enneigement moyen les plus élevés, 11 à 30 % en moyenne sur la Rheraya et 13 à 32 % sur l'Ourika. Les trois autres bassins présentent des taux moyens d'enneigement qui varient entre 4 à 20 % pour le Zat, de 2 à 18 % pour le R'Dat, et de 4 à 10 % pour le N'Fis. Le taux maximal de couverture neigeuse lors des sept saisons varie de 30 % (1999-2000) à plus de 80 % (1998-1999) sur le premier groupe, alors que pour le deuxième groupe le taux maximal d'enneigement varie de 13 % (2000-2001) à 62 % (1998-1999). Cette classification des cinq bassins-versants sur le critère d'enneigement est cohérente avec les caractéristiques topographiques : les bassins de hautes altitudes (Ourika et

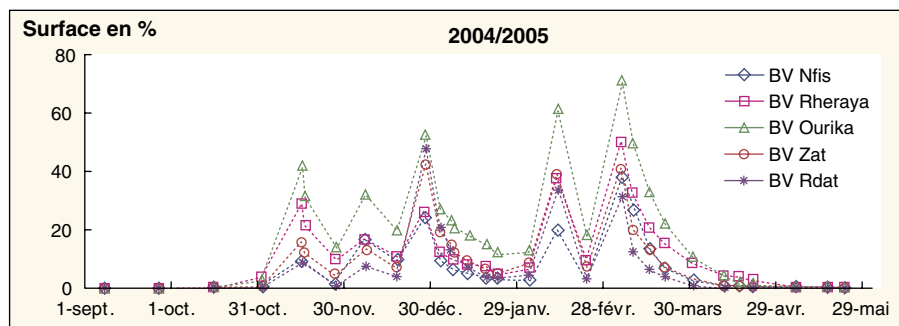


Figure 7. Profils des taux d'enneigement des cinq bassins-versants (BV) atlasiques étudiés (saison 2004-2005).

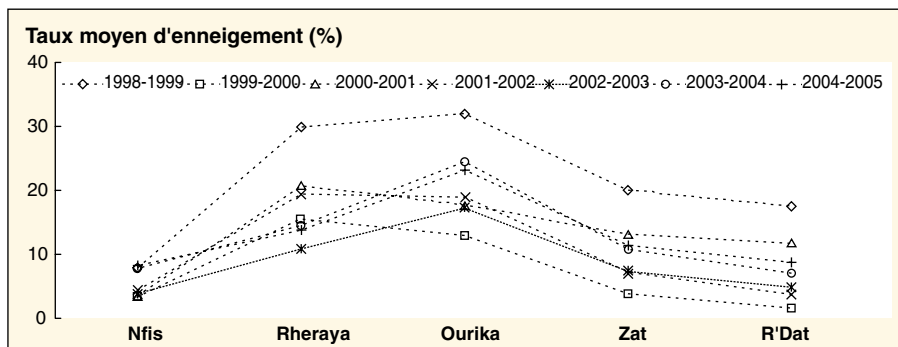


Figure 8. Taux moyen d'enneigement des cinq bassins-versants atlasiques étudiés pour les sept saisons (1998 à 2005).

Rheraya) sont plus enneigés que les bassins de basses altitudes (N'Fis, Zat et R'Dat).

Comparaison avec les données hydroclimatiques

Dans cette section, nous confrontons les données de surfaces enneigées estimées avec SPOT-VEGETATION aux mesures hydroclimatiques disponibles sur les cinq bassins-versants étudiés : pluviométrie, hauteur de neige, température et débit. Les séries temporelles de surfaces enneigées calculées sur le bassin-versant de Rheraya sont comparées avec les précipitations mesurées à la station de Tahanaout (exutoire du bassin de Rheraya), les hauteurs de neige et les températures mesurées à la station d'Oukaimden (CAF) localisée à 2760 m à la limite des bassins de la Rheraya et de l'Ourika. Les figures 9 et 10 présentent le cas de deux saisons particulièrement contrastées (1998-1999 et 2001-2002). On confirme la forte corrélation entre les pluies, les hauteurs de neige mesurées et les variations de surfaces enneigées calculées (exemple des événements enregistrés en 7 décembre, 16 janvier, 26 janvier et 3 mars au cours de la saison 1998-1999 et en 10 novembre, 12 janvier et 17 mars de la saison 2001-2002). On remarque que cette relation disparaît logiquement lors de la période de fonte (exemple des précipitations enregistrées du 11 au 19 mars 1999). En revanche, d'importantes chutes de neige enregistrées début janvier 2002 ne correspondent à aucune pluie à Tahanaoute. La croissance des surfaces enneigées permet donc parfois de pallier la faiblesse du réseau d'observations pluviométriques de la région. La variation de surfaces enneigées est également cohérente avec celle des températures : les pics de surfaces enneigées coïncident avec des minima de températures (exemple du 7 décembre 1998 et du 7 janvier 2002), tandis que les périodes de fontes hivernales correspondent à

des épisodes de réchauffement temporaire (cas du 2 à 5 février 1999 : la température passe de -2 à 8 °C et la surface enneigée diminue de 106 à 86 km²).

Les débits mesurés aux exutoires des cinq bassins-versants ont été comparés avec les surfaces enneigées calculées le long de la période de 1998 à 2005. Dans le cas de la Rheraya illustré ici (figures 9D et 10D), le contraste pluviométrique se retrouve sur l'amplitude des débits de base et sur celle des surfaces enneigées. Pour l'année 1998-1999, on note également le rôle joué par le manteau en tant que stock d'eau (décalage entre le maximum de surface enneigée et le maximum de débit de base d'environ deux mois). Le caractère nival du régime hydrologique du Haut Atlas, ainsi que l'utilité du suivi de l'enneigement pour la prévision des ressources en eau estivales, sont ici mis en évidence.

Conclusion

Cette étude a permis de souligner qu'il est possible d'observer à partir de longues séries d'images satellitales (SPOT-VEGETATION, 1998 à 2005) la dynamique de l'enneigement dans le Haut Atlas et en particulier sur les cinq bassins-versants les plus actifs hydrologiquement dans la région de Marrakech (Nfis, Rheraya, Ourika, Zat et R'Dat). L'intérêt de la télédétection est d'autant plus grand que la variabilité spatiale et temporelle du manteau neigeux est particulièrement importante. La production de cartes d'enneigement a permis de quantifier les variations temporelles du taux d'enneigement d'un bassin-versant à un autre, selon l'exposition et par tranche d'altitude. Les taux de variations de l'enneigement sont cohérents avec les données hydroclimatiques disponibles sur la région. Ces informations peuvent renforcer de manière significative les réseaux d'observation hydroclimatiques et peuvent aider à la spatialisation des précipitations en haute montagne semi-aride. Ces résultats montrent l'intérêt des données de télédétection

à haute répétitivité temporelle dans un contexte de planification opérationnelle de l'utilisation des ressources en eau (aide à la spatialisation des précipitations, caractérisation/identification des années sèches et humides, relation entre variation du taux d'enneigement et stock d'eau).

D'autre part, les chroniques d'enneigement dérivées des données VEGETATION rendent bien compte de la variabilité intra et interannuelle de l'enneigement du Haut Atlas marocain. Dans le cadre d'observation à long terme, ces chroniques devraient faciliter la sélection de certaines années typiquement sèche ou typiquement humide pour des études de processus fins. On pourra notamment analyser les chroniques en hiver et au printemps pour relier les vitesses de fonte à des capacités de fonte « climatiques » déduites d'observations météorologiques à partir de modèles simplifiés (degré-jour) ou à base physique comme CROCUS [19]. L'utilisation de ces modèles combinés à des données climatiques spatialisées et des évolutions de surface enneigées par tranche altitudinale devraient permettre de mieux évaluer les volumes d'eau stockés dans et relâchés par le manteau neigeux. On pourra ensuite envisager d'assimiler les estimations de surfaces enneigées dans un modèle hydrologique afin d'affiner notre compréhension et d'améliorer les capacités de prédiction du cycle hydrologique de ces régions (prévision des étiages, support à l'étude des risques de crue...). Ceci permettra de rendre opérationnel le dispositif et son extension. Enfin, le suivi à long terme, aussi bien des épaisseurs que des surfaces enneigées prend également son importance pour évaluer l'impact des changements climatiques sur la ressource en eau (évolution et variations de la distribution des précipitations sous forme liquide et solide). ■

Remerciements

Ces travaux sont menés dans le cadre du projet Sudmed⁶. Outre l'appui de l'Institut de recherche pour le développement (IRD), notamment par le biais du soutien à la jeune équipe associée à l'IRD (Cremas), les auteurs ont bénéficié d'un financement du ministère des Affaires étrangères français et du ministère marocain de l'Éducation 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) ». Les auteurs tiennent à remercier 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.

⁶ www.irrmed.org/sudmed/presentation.

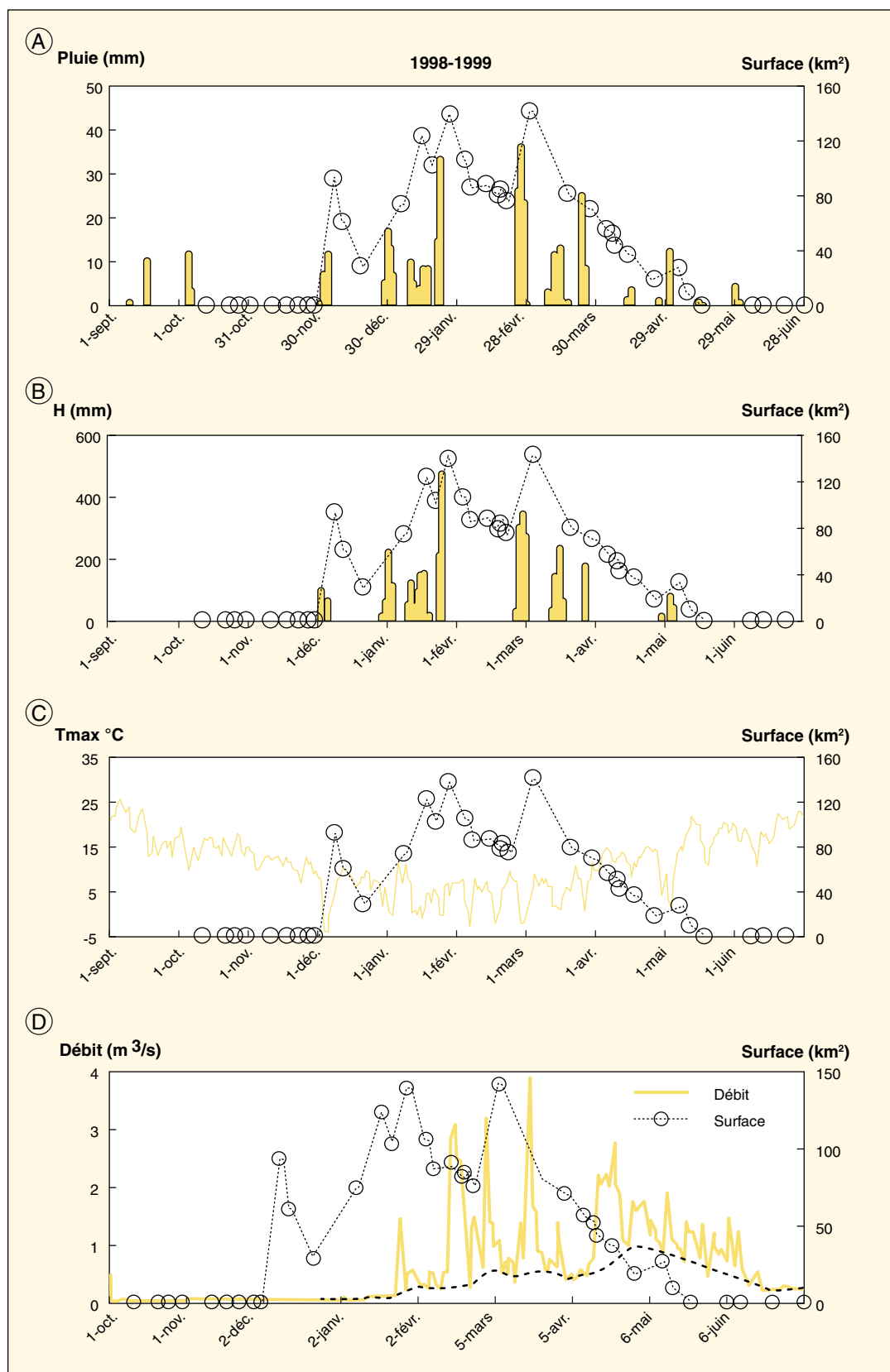


Figure 9. Comparaison des surfaces enneigées calculées à partir des données SPOT-VEGETATION sur le bassin-versant de Rheraya avec les données hydroclimatiques (saison 1998-1999).

A) précipitations journalières (mm) mesurées à la station de Tahanaout, exutoire du bassin de Rheraya ; B) hauteur de neige (mm) mesurée à la station d'Oukaimden (CAF) ; C) températures moyennes journalières (°C) mesurées à la station d'Oukaimden (CAF) ; D) débits mesurés à la station de Tahanaout.

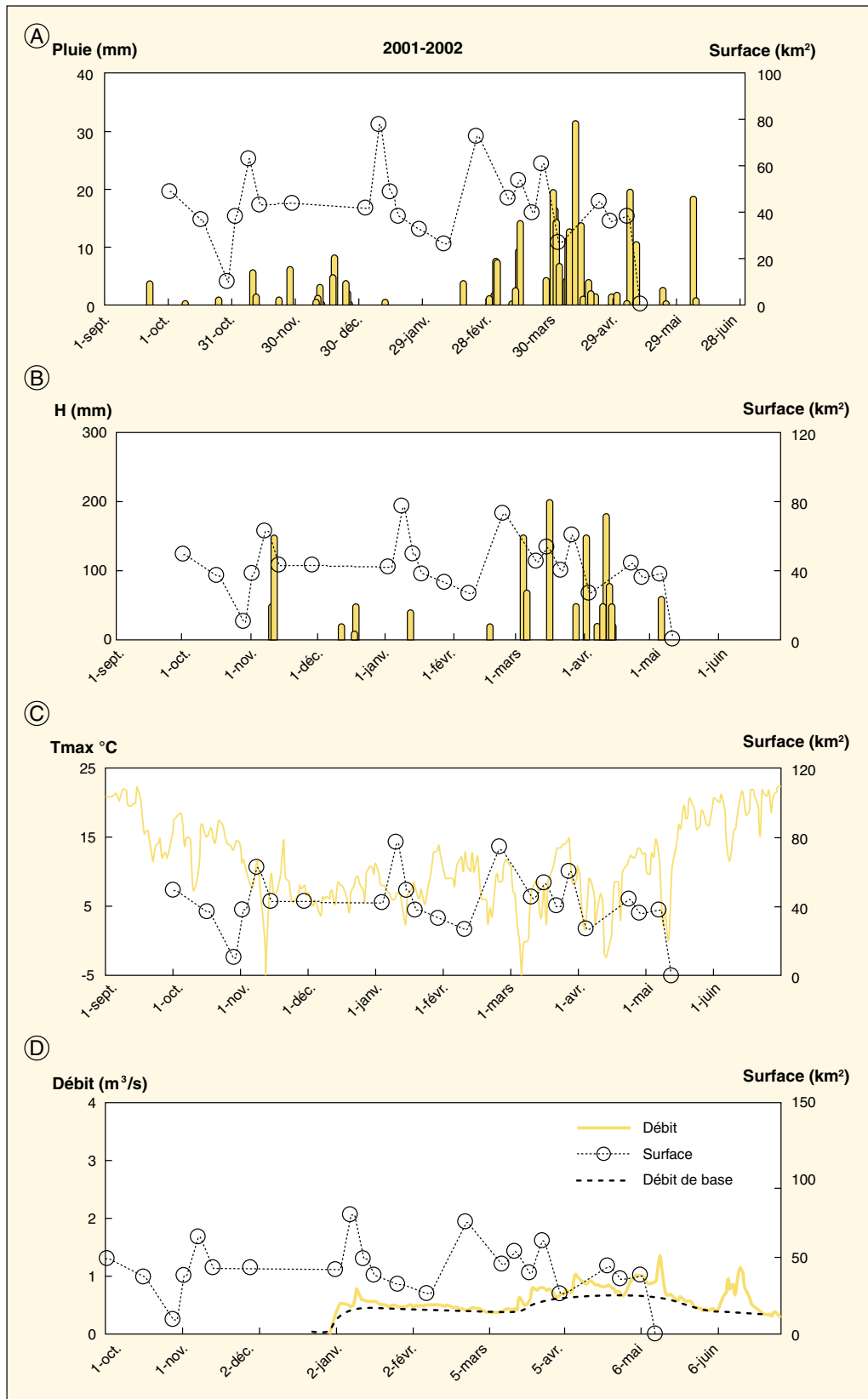


Figure 10. Comparaison des surfaces enneigées calculées à partir des données SPOT-VEGETATION sur le bassin-versant de Rheraya avec les données hydroclimatiques (saison 2001-2002).

A) précipitations journalières (mm) mesurées à la station de Tahanaout, exutoire du bassin de Rheraya ; B) hauteur de neige (mm) mesurées à la station d'Oukaimden (CAF) ; C) températures moyennes journalières (°C) mesurées à la station d'Oukaimden (CAF) ; D) débits mesurés à la station de Tahanaout.

Références

1. Bloschl G. Scaling issues in snow hydrology. *Hydrol Process* 1999 ; 13 : 2149-75.
2. Chaponnière A, et al. A combined high and low spatial resolution approach for mapping snow. *Int J Remote Sens* 2005 ; 26 : 2755-77.
3. Schulz O, De Jong C. Snowmelt and sublimation : field experiments and modelling in the High Atlas Mountains of Morocco. *Hydrol Earth Sys Sci* 2004 ; 8 : 1076-89.
4. Shaban A, Faour G, Khawlie M, Abdallah C. Remote sensing application to estimate the volume of water in the form of snow on Mount Lebanon. *Hydrol Sci J Sci Hydrol* 2004 ; 49 : 611-21.
5. World Bank. *Kingdom of Morocco, a water sector review*. Report No. 14750-MOR. Washington : World Bank, 1995.
6. Chehbouni A, et al. *Integrated modelling and remote sensing approach : toward a sustainable management of water resources in a semi-arid region*. International Conference on Remote Sensing and Geo-information Processing, September 7th to 9th, 2005, Trier (Germany).
7. Rosenthal W, Dozier J. Automated mapping of montane snow cover at subpixel resolution from the Landsat Thematic Mapper. *Water Resour Res* 1996 ; 32 : 115-30.
8. Simpson J, Stitt J, Sienko M. Improved estimates of the areal extent of snow cover from AVHRR data. *J Hydrol* 1998 ; 204 : 1-23.
9. Akyürek Z, Sorman A. Monitoring snow-covered areas using NOAAAVHRR data in the eastern part of Turkey. *Hydrol Sci J Sci Hydrol* 2002 ; 47 : 243-52.
10. Fortin F, Bernier M, Battay A, Gauthier Y, Turcotte R. *Estimation of surface variables at the sub-pixel level for use as input to climate and hydrological models*. Proceedings of VEGETATION 2000 Symposium, 3-6 April 2000, Lake Maggiore, Italy.
11. Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (Orstom). *Hydrologie du bassin du Tensift*. Rabat : ministère des Travaux publics et Communications, Direction de l'Hydraulique, Division des Ressources en Eau, 1976.
12. Maisongrande P, Duchemin B, Dedieu G. VEGETATION/SPOT : an operational mission for the Earth monitoring ; presentation of new standard products. *Int J Remote Sens* 2004 ; 25 : 9-14.
13. Holben BN. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int J Remote Sens* 1986 ; 7 : 1417-34.
14. Tarpley JP, Schneider SR, Money RL. Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. *J Clim App Meteorol* 1984 ; 23 : 491-4.
15. Duchemin B, Berthelot B, Dedieu G, Leroy M, Maisongrande P. Normalisation of directional effects in 10-day global syntheses derived from VEGETATION/SPOT : II. Validation of an operational method on actual data sets. *Rem Sen Env* 2002 ; 81 : 101-13.
16. Lissens G, Kempeneers P, Fierens F. *Development of a cloud, snow and cloud shadow mask for VEGETATION imagery*. Proceedings of VEGETATION 2000 Symposium, 3-6 April 2000, Lake Maggiore, Italy.
17. Hanich L, De Solan B, Duchemin B, et al. *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.
18. De Solan B, Chaponnière A, Maisongrande P, et al. *Cartographie de l'enneigement par télé-détection à partir d'images SPOT-VEGETATION et Landsat-TM : application à l'Atlas marocain*. Séminaire international, Hydrologie nivale en Méditerranée, Beyrouth, Liban, 17 décembre 2002.
19. Boone A, Etchevers P. An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land surface model : local-scale evaluation at an Alpine site. *J Hydrometeorol* 2001 ; 2 : 374-94.