

CARACTERISATION DE L'ENNEIGEMENT SUR L'ATLAS MAROCAIN PAR LE CAPTEUR MODIS ET RELATION AVEC LE CLIMAT (PÉRIODE 2000-2011)

Ahmed Marchane¹, Lionel Jarlan², Lahoucine Hanich¹, Abdelghani Boudhar³

1 : Laboratoire de Georessources (Unité associée au CNRST ; URAC42)
Faculté des Sciences et Techniques Guéliz, Avenue Abdelkarim Elkhatabi, B.P. 549 - 40000, Marrakech, Maroc
marchane.gat@gmail.com

2 : Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère, Toulouse, France

3 : Université Sultan Moulay Slimane, Béni-Mellal, Maroc

Résumé

Dans le Sud de la Méditerranée, de nombreux bassins versants sont caractérisés par un fonctionnement pluvio-nival où une partie des ressources en eau est stockée en hiver sous forme de neige en montagne alors que la zone de consommation se situe en plaine souvent dominée par l'agriculture irriguée. L'objectif de ce travail est double : (1) évaluer les capacités de la télédétection visible/proche infrarouge pour caractériser la variabilité interannuelle de l'enneigement sur l'Atlas marocain comme alternative aux données in situ éparses sur ces zones difficiles d'accès ; (2) identifier les déterminants climatiques qui gouvernent cette variabilité. Dans cet objectif, nous avons analysé plus de 10 ans d'acquisitions journalières issues du capteur MODIS (produits MOD10A1). Dans un premier temps, nous nous sommes attachés à corriger les produits bruts contaminés par la couverture nuageuse à l'aide de méthodes de filtrage basées sur le voisinage spatial et temporel et nous les avons confrontées à des mesures d'équivalent en eau de la neige mesurée à la station nivale de l'Oukamaïden, près de Marrakech, entre 2009 et 2011. Dans un deuxième temps, nous avons caractérisé la variabilité interannuelle à l'aide d'indicateurs saisonniers : enneigement maximum et moyen, et date des premières neiges. Enfin, nous avons mis en évidence une relation significative entre la valeur de l'oscillation Nord Atlantique (ONA) moyenne sur le mois de mars et l'enneigement maximum. Nous montrons également qu'il existe une relation significative entre les anomalies de températures de surface de l'Atlantique équatorial et tropical à la fin de l'été et l'enneigement maximum rencontré sur l'Atlas marocain l'hiver suivant. Ces résultats ouvrent des perspectives pour la prévision saisonnière de l'enneigement sur la région.

Mots clés : Neige, télédétection, climat, NAO, semi-aride, Haut Atlas.

Abstract

In the Southern Mediterranean, many watersheds are characterized by a rainfall-snowmelt functioning with a significant part of surface water stored as snow in the mountains during winter while the consumption area is located in the plains dominated by irrigated agriculture. The objective of this work is twofold : (1) assess the capacity of the visible / near-infrared remote sensing to characterize the interannual variability of snow covered areas on the Moroccan Atlas as an alternative to in situ data that are often sparse on these regions because of obvious logistic difficulties and (2) identify the factors governing this variability. For this purpose, more than 10 years of daily acquisition from the MODIS sensor (MOD10A1 products) have been analyzed. At first, the raw MODIS products, contaminated by cloud cover, have been corrected using filtering methods based on spatial and temporal neighborhood. The improved products have been compared to measurements of snow water equivalent of the Oukamaïden station near Marrakech (2009-2011) with success. In a second step, we characterized the interannual variability using seasonal indicators : maximum and average snow cover and date of the first snow. Finally, we have demonstrated a significant relationship between the North Atlantic Oscillation (NAO) in March and the maximum snow cover. Stated differently, a negative NAO phase seems to favor the snow cover on the Moroccan Atlas. Although more controversial, a significant relationship between surface temperature anomalies in the equatorial and tropical Atlantic at the end of summer and snow cover during the following winter is highlighted. These results open up prospects for seasonal forecasting of snow covered areas in the region.

Keywords : Snow, remote sensing, climate, NAO, semi-arid, High-Atlas.

1. Introduction

Les régions méditerranéennes semi-arides sont caractérisées par une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations associées à une saisonnalité marquée de la demande évaporative résultant en une période de fort déficit d'eau en été (Bolle, 2002). Pour de nombreux bassins versants, la production d'eau est située en montagne (Viviroli et al., 2007) et la présence de neige agit comme un tampon avec des débits maximum décalés durant le dégel printanier (Chaponnière et al., 2005 ; Rimmer et Salingar, 2006). Le stock d'eau du manteau neigeux est donc crucial pour l'approvisionnement en eau des différents secteurs de consommation parmi lesquels l'agriculture irriguée est souvent le plus important. Boudhar et al. (2009) ont démontré qu'entre 15 et 50% du débit pourrait être attribué à la fonte des neiges sur le bassin versant de Tensift dans la région de Marrakech. De plus, les changements climatiques annoncés dans la région (Giorgi, 2006) pourraient se traduire par un décalage temporel de la saison des neiges (Lopez et al., 2008) qui limiterait fortement le rôle de "château d'eau" joué par la neige dans le Sud Méditerranéen. Il existe donc un réel besoin pour un meilleur suivi du couvert neigeux dans la région et une meilleure compréhension des facteurs qui gouvernent sa variabilité.

Une caractéristique commune de la plupart des régions semi-arides est la faiblesse du réseau météorologique, en particulier en montagne, pour des raisons évidentes d'accessibilité (Shaban et al., 2004), tandis que ces zones présentent une grande variabilité climatique (Schulz et Jong, 2004). Il existe de nos jours une grande diversité de produits permettant de caractériser la surface et l'équivalent en eau du couvert neigeux (Frei et al., 2012 ; Gao et al., 2010) mais le seul produit avec une résolution spatiale (500 m) et un temps de revisite (1 jour) compatible avec le suivi du comportement très dynamique de manteau neigeux dans les régions montagneuses du sud de la Méditerranée est distribué par le National Snow and Ice Data Center (NSIDC) et est dérivé du spectroradiomètre imageur à moyenne résolution MODIS (Hall et al., 2001). Ce produit est déduit du Normalized Difference Snow Index (NDSI ; Hall et al., 1998) qui tire partie du contraste de réflectance entre le domaine visible et le moyen infrarouge : la neige réfléchit fortement dans le visible alors que l'absorption domine dans le moyen infrarouge.

L'impact de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) sur le climat marocain et, en particulier, sur les pluies d'hiver, est bien connu (Knippertz et al., 2003 ; Lamb et Pepler, 1987). L'ONA est considérée comme le phénomène le plus important et récurrent impactant la variabilité atmosphérique dans les latitudes moyennes et élevées du bassin Atlantique. La phase positive de l'ONA (L'intensification de la dépression d'Islande et le renforcement de l'anticyclone des Açores) est associé à un déficit de précipitations au-dessus de l'Europe méridionale et du bassin méditerranéen (Hurrell et al., 2003) à travers un dé-

placement des flux vers l'Atlantique Nord qui éloigne les systèmes synoptiques et les précipitations de l'Afrique du Nord-Ouest (Rogers, 1997). Au cours de la phase négative, les effets sont inversés avec une anomalie positive des précipitations sur l'Afrique du Nord-Ouest et le Sud de l'Europe par le biais de flux d'Ouest affaiblis et une trajectoire plus zonale. Il n'y a jamais eu, à notre connaissance, de caractérisation des liens entre l'ONA et les précipitations solides en Méditerranée du Sud. L'objectif de ce travail est double : (1) évaluer les capacités des produits MODIS pour caractériser la variabilité interannuelle de l'enneigement sur l'Atlas marocain comme alternative aux données in situ éparses sur ces zones difficiles d'accès ; (2) identifier les déterminants climatiques qui gouvernent cette variabilité. Dans cet objectif, nous avons analysé plus de 10 ans d'acquisitions journalières issues du capteur MODIS (produits MOD10A1).

2. Données et méthodes

2.1. Région d'étude

La zone étudiée correspond l'Atlas marocain (Figure 1). Il s'agit d'une chaîne montagneuse d'environ 60 km de large sur 800 km de long orientée NE-SW. Elle culmine à 4167 m d'altitude au jbel Toubkal, le plus haut sommet d'Afrique du Nord. Uniquement la zone correspondante à une élévation supérieure à 1000 m. a été sélectionnée. Cette zone est identifiée grâce au modèle numérique de terrain (MNT) dérivé des données altimétriques du Shuttle Radar Topography Mission. Ce MNT est distribué gratuitement par l'United State Geological Survey (USGS). Cette région qui traverse la partie nord du Maroc de part en part subit l'influence complexe de l'océan Atlantique à l'ouest, la mer Méditerranée au nord et le désert du Sahara au sud.

2.2. Données

Après une rapide présentation des produits journaliers d'enneigement MODIS, les mesures d'équivalent en eau du manteau neigeux mesurées in situ et utilisées pour leur évaluation sont présentées. Enfin, plusieurs indices et variables témoignant de la dynamique atmosphérique et océanique régionale sont également sélectionnés afin de diagnostiquer les déterminants de la variabilité du couvert neigeux.

Le produit "surface enneigée" MODIS

MODIS est un spectro-radiomètre monodirectionnel sensible échantillonnant le spectre électromagnétique du visible à l'infrarouge grâce à 36 bandes spectrales de 250m à 1km de résolution. Pour plus de détail sur le capteur, le lecteur est invité à se référer à <http://modis.gsfc.nasa.gov>. Le Tableau 1 présente les caractéristiques du produit neige MOD10A1 utilisé dans ce travail. Ce produit est distribué au format HDF-EOS et disponible depuis février 2000. La fraction de pixel enneigée

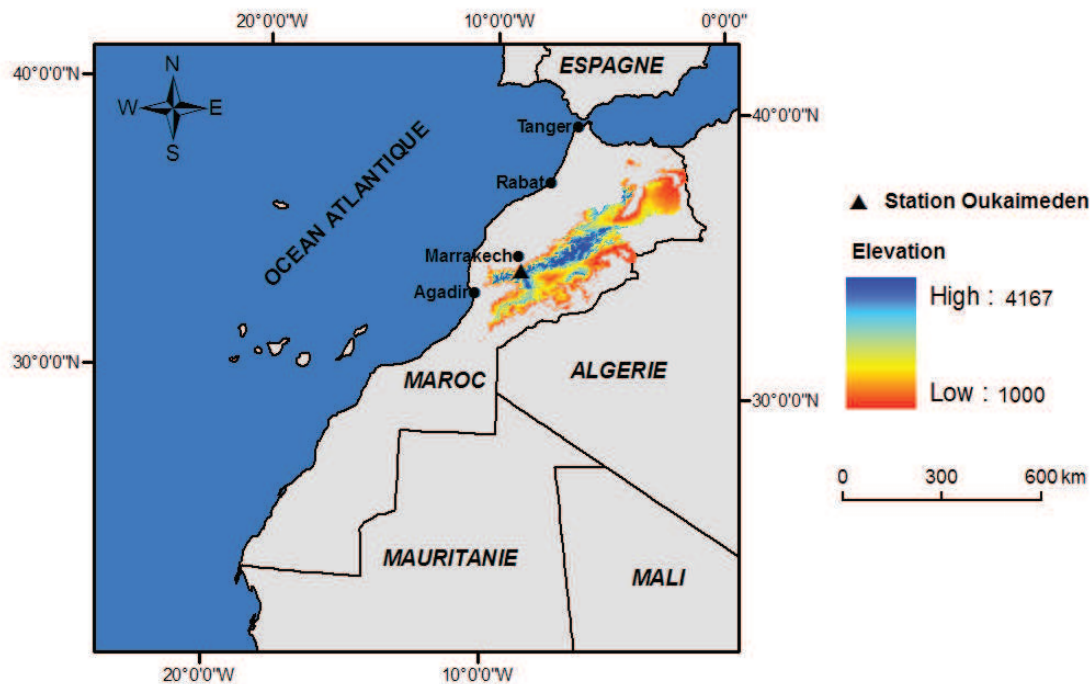


FIGURE 1 : La région d'étude correspond au massif de l'Atlas marocain définie comme la zone du nord Maroc dont l'élévation est supérieure à 1000 m. Ces zones sont identifiées grâce au modèle numérique de terrain STRM (échelle de couleur).

est calculée pour les terres et les eaux intérieures qui ne sont pas obstruées par les nuages suivant (Salomonson et Appel, 2004) :

$$\text{Fraction de neige} = -0,01 + 1,45 \times \text{NDSI}. \quad (1)$$

Cette relation a été établie sur la base de plusieurs séries d'images satellites à haute résolution acquises sur différentes régions du monde. Un pixel est ensuite identifié comme enneigé si toutes les conditions suivantes sont remplies :

- Le NDSI (calculé comme la différence normalisée des réflectances entre les bandes 4 -0,55 μ m- et 6 -1,6 μ m-) est supérieur ou égal à 0,4 ;
- La réflectance dans le visible est supérieure à 0,11 ;
- La réflectance dans MIR est supérieure à 0,10.

Données in situ

La station nivo-météorologique d'Oukaimeden (31°12' N, 7°51' W) est installée à une altitude de 3200 mètres (Figure 1), celle-ci est équipée d'instruments mesurant la température de l'air, les précipitations liquides, la vitesse du vent, le rayonnement global et l'humidité de l'air. En 2009, la station est complétée par un GEONOR qui permet de mesurer le cumul des précipitations solides et liquides et une sonde de hauteur de neige. Les événements neigeux sont simplement calculés comme la différence entre le cumul solide et liquide et les précipitations liquides mesurées par le pluviographe.

Données climatiques

Température de surface des océans (SST)

Etant donnée la forte inertie des masses d'eau, les températures de surface des océans sont souvent utilisées pour la prévision de phénomènes atmosphériques tel que les précipitations. Knippertz et al. (2003) a notamment montré l'influence de l'océan atlantique équatorial sur les précipitations d'automne au Maroc. Les données de température des océans utilisées ici sont des données issues de capteurs à bord des satellites de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Elles ont une répétitivité mensuelle et une résolution 1° x 1° sur la période 2000-2011.

L'Oscillation Nord Atlantique

L'Oscillation Nord Atlantique (ou North Atlantic Oscillation NAO) est une variation naturelle du climat qui a des impacts importants sur le climat de l'Europe de l'ouest, des environs du nord de l'Afrique et de l'Est de l'Amérique du Nord. Elle a des effets bien plus importants en hiver qu'en été. La NAO consiste en un basculement de la masse atmosphérique entre la dépression d'Islande et l'anticyclone des Açores. L'indice NAO se définit comme la différence normalisée de pression de surface entre ces deux régions (Marshall et al., 2001). L'indice NAO utilisé est distribué par le Climate Prediction Center (CPC) et calculé à partir de la décomposition en fonctions orthogonales empiriques (Preisendorfer et Mobley, 1988) du champ spatio-temporel des géopotentiels à 500 hPa issus des ré-analyses NCEP (Kalnay et al.,

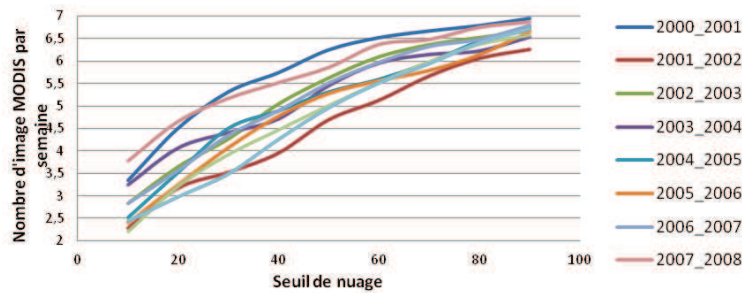


FIGURE 2 : Sensibilité du nombre d'images conservé au seuil de surface nuageuse (produits MOD10A1).

Types de données	Niveau du produit	Dimensions nominales	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Projection
MOD10A1	L3	1200 km par 1200 km	500 m	1 jour	Sinusoïdale

TABLEAU 1 : Caractéristiques du produit journalier de surface enneigée MODIS (MOD10A1).

1996).

2.3. Méthodes

Filtrage spatio-temporel du produit MOD10A1

Les zones montagneuses sont fréquemment sous les nuages, ce qui peut limiter l'intérêt des produits de surface enneigée dérivée des acquisitions dans le domaine visible et infrarouge (Hall et Riggs, 2007) en réduisant sensiblement le nombre d'images claires. Par ailleurs, la neige une signature spectrale voisine des nuages dans le domaine visible (Konig et al., 2001), ce qui complique la discrimination entre nuage et neige. Les produits de surface enneigée MODIS sont donc contaminés par du bruit qui peut avoir plusieurs origines (1) une image en majeure partie nuageuse ; (2) une mauvaise identification des zones enneigées ou nuageuses (nombreux cas où des pixels sont anormalement identifiés comme nuageux alors que les pixels environnants sont enneigés) ; (3) une mauvaise correction des perturbations atmosphériques ; (4) des problèmes d'acquisition (une image entièrement noire entourée d'images claires et montrant un enneigement important). Afin de réduire ce bruit, nous avons appliqué d'une manière successive plusieurs filtres dans l'espace et dans le temps :

1. Élimination des images nuageuses. Si la surface des zones montagneuses (définie comme ayant une altitude supérieure à 1000m) est couverte à plus d'un certain pourcentage de nuages, l'image est éliminée. Une étude de sensibilité à ce seuil est conduite dans la partie suivante.
2. Détection des images noires. Ce traitement permet de détecter les images noires qui ne contiennent pas de données et les éliminer si elles sont entourées (+/- 2 jours) d'images montrant un enneigement important.

3. Filtrage temporel. Il s'agit ici de détecter les pixels identifiés comme nuageux et d'explorer sur un voisinage de 5 jours avant et 2 jours après l'image s'il n'existe pas de pixel clair. Si c'est le cas, on remplace la valeur du pixel 'nuageux' par la valeur d'enneigement de son plus proche voisin.
4. Filtrage spatial altitudinal. Ce dernier traitement est effectué dans le but de limiter le problème de discrimination nuage/neige. Il s'agit de comparer l'altitude des pixels identifiés comme nuageux à l'altitude moyenne de tous les pixels où de la neige a été détecté. Si l'altitude de ce pixel est au-dessus de cette moyenne, on lui affecte la valeur de 100

3. Résultats et discussion

3.1. Traitement du produit MODIS

Dans un premier temps, nous avons évalué le nombre d'images éliminées en fonction du seuil sur la surface couverte de nuages.

La Figure 2 montre l'évolution du nombre d'images par semaine en fonction de ce seuil (2000-2011). Nous constatons qu'avec un seuil à 10%, nous éliminons 55% des images en moyenne. Étant donné la forte variabilité temporelle de la dynamique de l'enneigement sur la région, il est capital de conserver une bonne répétitivité temporelle. Un seuil à 50% nous permet notamment de conserver plus de deux tiers des images soit 5,5 images par semaine en moyenne avec une réduction de l'enneigement moyen sur la période significatif qui passe de 22,6% à 14,9%. Par ailleurs, l'ensemble des années étudiées ont un comportement assez similaire avec une dispersion acceptable. En effet, 4,5 images/semaine (soit plus d'une image tous les 2 jours) sont conservées pour l'année 2001-2002 qui est la plus sensible à ce filtrage ; cela reste largement suffisant pour suivre le manteau neigeux malgré sa forte dynamique dans la région

(Boudhar et al., 2010). Il s'agit maintenant de démontrer que les filtrages spatio-temporels appliqués permettent de reproduire une dynamique d'enneigement cohérente.

La Figure 3 montre à titre illustratif le résultat du filtrage spatio-temporel sur une image (7/01/2001) couvrant l'ensemble de la région d'étude. L'élimination des pixels identifiés comme nuageux (due à un problème de discrimination neige-nuage ou réellement obstrués par des nuages) apparaît clairement sur les images et c'est notamment le filtrage temporel qui permet de faire apparaître la région enneigée au nord-est qui était complètement masquée avant filtrage. Le filtre spatial basé sur l'altitude n'intervient que sur quelques pixels en altitude en plein cœur du massif.

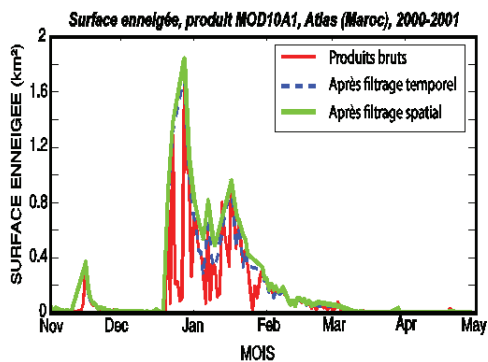


FIGURE 4 : Série temporelle de surface enneigée sur l'Atlas marocain déduite des produits MOD10A1 sur la saison 2000-2001 avant et après application de l'algorithme de correction proposé (voir texte).

La Figure 4 montre, à titre d'exemple, l'impact du filtre spatial et temporel sur la série temporelle d'enneigement sur le Haut Atlas pendant la saison 2000-2001. Nous constatons une forte dispersion du signal temporel avant le traitement avec notamment une chute violente de la surface fin décembre en seulement quelques jours qui paraît très artificielle et qui est vraisemblablement due à une série consécutive d'images obstruées par les nuages. L'élimination des images ennuagées et des images entièrement noires améliore la dynamique mais ce sont vraiment les filtres spatial et temporel qui permettent d'obtenir une dynamique cohérente autorisant la détection d'événements neigeux principaux et la phase de fonte qui les accompagne (courbe verte sur la Figure 4). En moyenne, l'application des filtrages temporel et spatial permet de réduire l'enuagement moyen de 14,9% à 0,9%. Cet ennuagement relativement faible et peu persistant comparé, par exemple, aux 63% relevés sur l'Autriche par Parajka et Blötschl (2006), rend cette méthode de filtrage relativement simple très efficace sur le Sud de la Méditerranée.

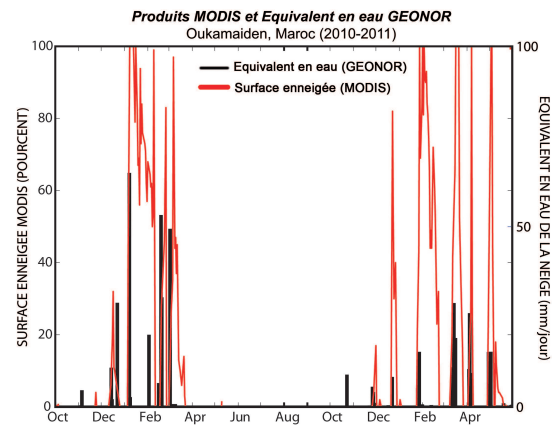


FIGURE 5 : Comparaison entre la série temporelle MODIS corrigée en % d'enneigement du pixel correspondant à la station de l'Oukaimeden et l'équivalent en eau journalier des précipitations solides mesuré à la station pour la période octobre 2009 à mai 2011.

3.2. Confrontation du produits corrigés aux données *in situ*

Afin d'évaluer la qualité des produits MODIS corrigés, nous les avons confrontés aux mesures d'équivalent en eau de la station de l'Oukaimeden acquises sur les saisons 2009-10 et 2010-11 (Figure 5). Même si les deux grandeurs ne sont pas directement comparables (mesure de la surface enneigée sur un pixel de 500 m pour MODIS et mesure locale de l'équivalent en eau pour le GEONOR), les événements neigeux détectés *in situ* devraient être observables par le produit satellite. Malgré un peu de bruit résiduel qui pourrait être filtré assez aisément, l'accord entre les surfaces enneigées MODIS et les mesures sur le terrain sont très bons. La plupart des événements détectés par le GEONOR s'accompagne d'une augmentation des surfaces enneigées MODIS suivis par une période de diminution correspondant à la fonte (15 événements sur 18 détectés soit 83%). Ces chiffres sont en accord avec les nombreuses études de la littérature qui soulignent une précision de l'ordre de 90% (Hall et Riggs, 2007 ; Klein et Barnett, 2003 ; Parajka et Blötschl, 2006) sur ces produits. Les premiers événements neigeux (début novembre en 2009 et fin octobre 2010) sont les seuls à ne pas être « vus » par le capteur MODIS. Plusieurs auteurs (Hall et Riggs, 2007 ; Parajka et al., 2012 ; Rittger et al., 2013) ont montré les problèmes de détection des produits MODIS dans le cas de couvert neigeux fins et hétérogènes comme c'est le cas en début saison. Il est également intéressant de noter la dynamique extrêmement forte de l'enneigement sur le Haut Atlas avec des périodes d'ablation complète même au cœur de l'hiver (fin février-début mars 2011 notamment). En complément des nombreuses validations existantes des produits MODIS dans la littérature, cette étude montre que les produits MODIS, à quelques bémols près (début de saison), semblent parfaitement ex-

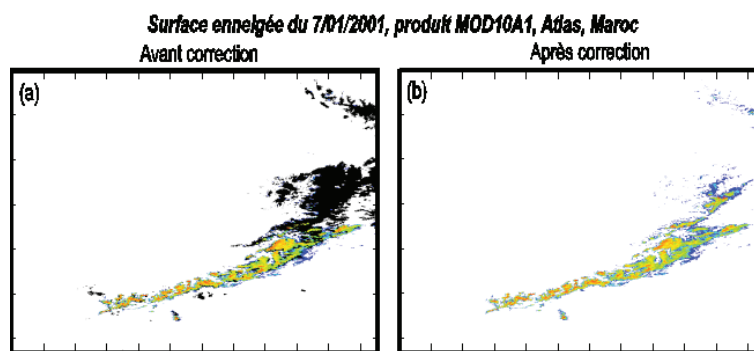


FIGURE 3 : Effet du filtrage spatio-temporel appliqué sur le produit d'enneigement MOD10A1 : images avant et après correction du haut atlas marocain (7/01/2001), l'échelle de couleur va du bleu clair (enneigement à 0 à l'orange enneigement à 100%). Les nuages apparaissent en noir.

exploitables sur les montagnes de la Méditerranée du Sud.

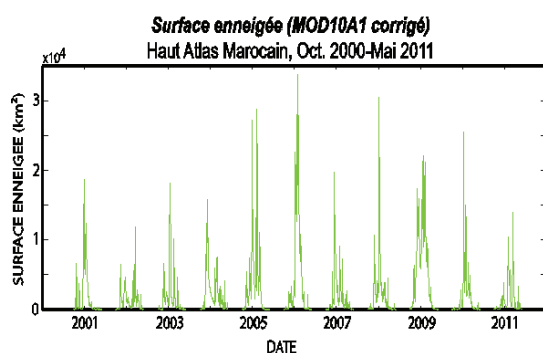


FIGURE 6 : Evolution de la surface enneigée sur l'Atlas marocain d'Octobre 2000 à mai 2011 par les produits MOD10A1 corrigés.

3.3. Variabilité intra- et inter-annuelle de l'enneigement

Dans l'objectif d'analyser les déterminants climatiques de la variabilité inter-annuelle de l'enneigement sur l'Atlas marocain, les séries journalières de surface enneigée sont synthétisées par des indicateurs saisonniers : la surface enneigée maximum (SCAmax), la somme des surfaces enneigées totale (SCAsum), la moyenne des surfaces enneigées (SCAmean) et les dates d'enneigement maximum. Ces indicateurs sont répertoriés au Tableau 2. La Figure 6 représente l'évolution temporelle de la surface enneigée à partir des produits d'enneigement MODIS corrigés.

Les variabilités inter et intra-annuelle sont extrêmement fortes à la fois en terme de surface enneigée maximum et totale qu'en terme de distribution des événements et de durée de la saison. La Figure 6 montre notamment la forte dynamique saisonnière de l'enneigement sur l'Atlas marocain. Par ailleurs, le nombre d'événements neigeux est limité et il existe des périodes d'ablation quasi-complète même à l'échelle de tout le massif et au cœur

de l'hiver (saison 2002-2003 notamment). En termes de variabilité interannuelle (Tableau 2), l'enneigement maximum varie de 11882 km² pour la saison 2001-2002 à quasiment le triple (33600km²) pour la saison 2005-2006 avec des conséquences probablement très importantes sur la disponibilité en eau au printemps. De même, la date d'enneigement maximum saisonnier présente également une forte variabilité d'une année à l'autre avec une occurrence mi-décembre pour la saison 2006-2007 et jusqu'à mi-mars pour les saisons 2001-2002 et 2010-2011. Les conclusions sont identiques pour les dates de premières neiges (non montré).

3.4. Relation avec le climat régional

La dernière partie de cette étude a pour objectif de tenter d'identifier les déterminants climatiques qui gouvernent la variabilité interannuelle de ces indicateurs saisonniers.

3.4.1. Relation avec l'Oscillation Nord Atlantique

La Figure 7a présente la corrélation r entre la NAO mensuelle d'octobre à mars et l'enneigement maximum déterminé à partir des produits d'enneigement MODIS pour la période 2000-2011. La corrélation la plus élevée est observée avec la NAO de mars ($r=-0,63$, significative à 95% selon le test de student). Cette corrélation est du même ordre de grandeur que les relations trouvés avec les précipitations liquides (Knippertz et al., 2003; Lamb et Pepler, 1987). Même si cette corrélation est relativement faible, son signe est cohérent dans la mesure où il a déjà été démontré que les phases négatives de la NAO entraînent un excédent de précipitations sur le Nord de l'Afrique grâce aux flux d'ouest Atlantique qui sont déviés vers le Sud de l'Europe et l'Afrique du Nord. C'est la première fois, à notre connaissance, que cette relation est mise en évidence à l'aide d'observation de surfaces enneigées. La Figure 7b montre le scatter plot entre la surface enneigée maximum sur le Haut Atlas et l'ONA du mois de Mars qui présente la plus forte corrélation rencontrée. Si de nombreuses années s'alignent sur la

Saisons	SCAmax (km ²)	SCAmean (km ²)	SCAsum (km ²)	Date d'enneigement maximum
2000-2001	18586	2028	324501	28/12/2000
2001-2002	11882	1430	171582	17/03/2002
2002-2003	18057	2198	316555	15/01/2003
2003-2004	15678	2711	379605	03/12/2003
2004-2005	28746	4030	548102	09/02/2005
2005-2006	33699	4946	667699	31/01/2006
2006-2007	19714	2477	349276	13/12/2006
2007-2008	30405	2855	431069	05/01/2008
2008-2009	21420	6770	866609	22/01/2009
2009-2010	25484	1819	231047	09/01/2010
2010-2011	13969	1747	244587	17/03/2011

TABLEAU 2 : Indicateurs annuels d'enneigement sur l'Atlas marocain estimés à partir des données MODIS sur la période 2000-2011.

relation moyenne trouvée, plusieurs s'en écartent sensiblement : la saison 2007-2008 montre un enneigement très important (le 2ème de la décade après 2005-2006) malgré une NAO dominante neutre alors qu'inversement l'année 2000-2001 présente un enneigement modéré à faible alors que les phases de NAO négative dominent en mars. L'explication peut provenir du double impact de la NAO sur les précipitations et les températures. En effet, une NAO négative entraîne des anomalies positives de précipitations sur le Maroc comme souligné précédemment mais aussi une tendance à la hausse des températures par rapport à la moyenne (Wang et al., 2005). Ces anomalies de température, défavorables à l'enneigement, pourraient être responsables de la forte variabilité des comportements observés. Néanmoins, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

3.4.2. Relation avec les températures de surface des océans

Aucune relation entre les températures de surface des océans et l'enneigement à l'échelle de l'ensemble de l'Atlas n'a pu être mise en évidence. La Figure 8 présente les cartes de corrélations entre les données mensuelles de température de surface des océans et l'enneigement maximum sur le bassin versant du Tensift pour la période 2000-2011.

On remarque des corrélations significatives à 90% (test de Student) entre l'enneigement maximum et les SST très tôt dans l'année. En effet, les anomalies de température de surface des océans apparaissent positivement corrélées à l'enneigement dès le mois d'août sur une région homogène à cheval entre l'Atlantique Tropical et Equatorial. Cette corrélation semble ensuite s'estomper petit à petit pour disparaître complètement à partir de novembre (non montré). En d'autres termes, le réchauffement de cette région de l'océan Atlantique durant la fin de l'été peut être favorable pour l'enneigement sur l'Atlas durant l'hiver suivant. Bien qu'il soit encore l'objet d'un débat en cours (Çayan, 1992 ; Cassou et Terray, 2002 ; Hurrell et al, 2003), certaines études ont mis en

évidence un lien potentiel entre l'océan Atlantique dans les régions équatoriales et la variabilité atmosphérique de l'hémisphère nord, y compris la NAO en hiver (Fletcher et Saunders, 2006 ; Robertson et al., 1998). Cassou et Terray (2001) ont émis l'hypothèse que ce lien proviendrait de la perturbation de la cellule de Hadley engendrée par le réchauffement de l'océan dans cette région. Knippertz (2003) a également mis en évidence qu'un réchauffement de l'océan atlantique tropical en fin d'été était favorable aux précipitations sur le Sud du Maroc (jusqu'à la chaîne du Haut Atlas) au début de l'automne. Cela pourrait expliquer pourquoi un lien est mis en évidence avec la surface enneigée du seul bassin versant du Tensift située au Sud de la région d'étude alors qu'aucune corrélation significative n'est présente pour la surface enneigée sur l'ensemble de la région. Enfin, Jarlan et al. (2013) ont également mis en évidence le lien existant entre l'Atlantique tropical et la variabilité du couvert végétal sur le Nord du Maroc.

4. Conclusion et perspectives

Dans le Sud de la Méditerranée, de nombreux bassins versants sont caractérisés par un fonctionnement pluvio-nival où une partie des ressources en eau est stockée en hiver sous forme de neige en montagne alors que la zone de consommation se situe en plaine souvent dominée par l'agriculture irriguée. Cette étude démontre l'intérêt de l'utilisation des données de télédétection pour caractériser les surfaces enneigées en montagne semi aride où les mesures in situ sont rares. Après l'implémentation de plusieurs méthodes de filtrage basées sur le voisinage spatial et temporel qui améliorent la cohérence spatio-temporelle de l'enneigement observé sur l'Atlas marocain, les produits d'enneigement MODIS utilisés sont confrontés avec succès aux observations d'équivalent en eau du manteau neigeux mesuré à la station de l'Oukameïden. Dans un deuxième temps, une série d'indicateurs saisonniers d'enneigement sont déduits des séries temporelles de surface enneigée obtenues et mis en relation avec l'Oscillation Nord Atlantique

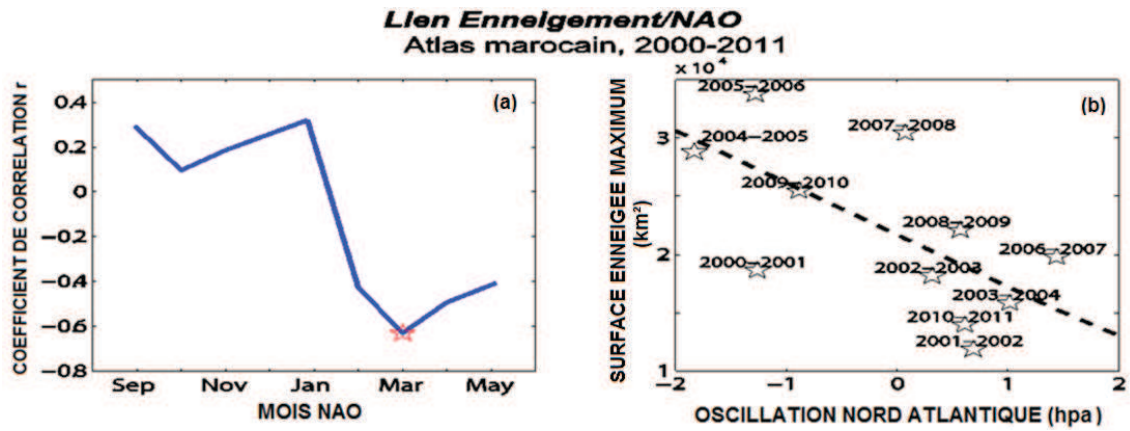


FIGURE 7 : Relation entre l'enneigement maximum et l'Oscillation Nord Atlantique sur l'Atlas marocain. (a) Evolution du coefficient de corrélation en fonction de la NAO mensuelle, l'étoile rouge correspond à une corrélation significative à 95% ; (b) relation entre l'enneigement maximum et la NAO du mois de mars.

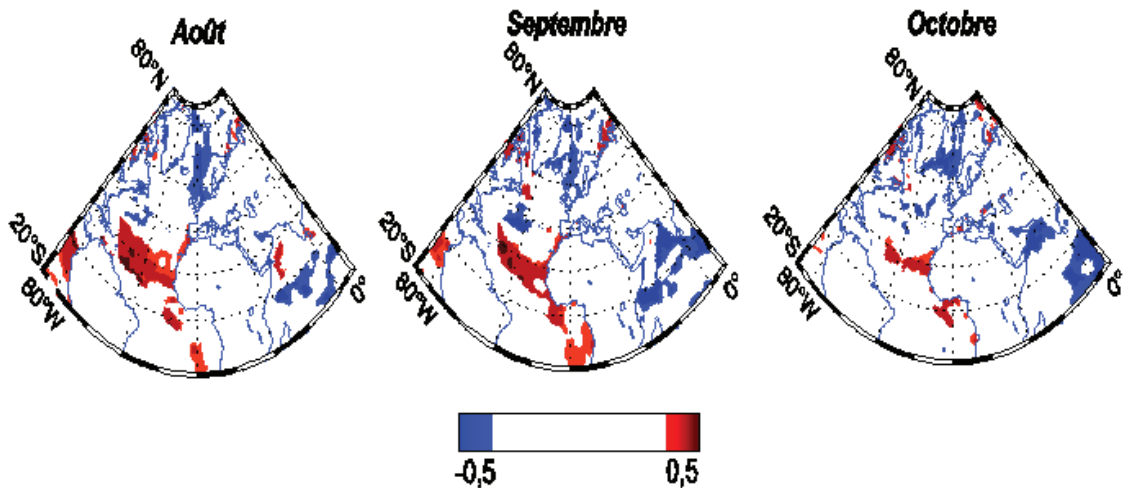


FIGURE 8 : Cartes de corrélation retardée entre les températures de surface des océans et l'enneigement maximum pour la période 2000-2011 sur le bassin versant du Tensift. Seules les corrélations significatives à 90% (test de Student) sont représentées.

et les températures de surface des océans. Les résultats montrent notamment qu'une NAO en phase négative durant le mois de mars est favorable à l'enneigement sur l'Atlas. Cette relation bien que faible est significative à 95% malgré la période d'étude relativement courte. Par ailleurs, si cette relation a déjà été montrée avec les précipitations liquides, c'est la première fois, à notre connaissance qu'un lien similaire est mis en évidence grâce aux observations satellites de surfaces enneigées. Enfin, bien que plus controversé, nous avons montré une relation entre les anomalies de température de surface des océans dans les régions tropicales et équatoriales à la fin de l'été et l'enneigement sur le bassin du Tensift. Ces résultats corroborent notamment de précédentes études et font des SST dans cette région de l'Atlantique un candidat potentiel intéressant pour la prévision précoce du couvert neigeux sur le Haut Atlas. Cette relation n'est pourtant pas robuste sur l'ensemble du Massif de l'Atlas marocain. Nos travaux en cours concernent la poursuite de l'évaluation des produits sur de nouveaux sites de mesures de l'Atlas marocain afin d'appuyer les résultats préliminaires obtenus sur la station de l'Oukamaiden. Par ailleurs, les relations mises en évidence avec les indices climatiques demandent à être confirmées par des analyses complémentaires. Il s'agira notamment d'étudier plus finement la double influence de la NAO sur les précipitations et les températures et l'impact potentiel sur l'enneigement dans la région. Il serait de plus particulièrement intéressant de caractériser ces relations par bassin versant, échelle de travail du gestionnaire de la ressource en eau, en fonction de leur position géographique.

Remerciements

Ce travail a été conduit dans le cadre du Laboratoire Mixte International TREMA (<http://trema.ucam.ac.ma>) et financé par l'IRD, le programme MISTRALS-SICMED, le CNRS et l'ANR AMETHYST (ANR-12-TMED-0006-01).

Références

Bolle, H.J., 2002. *Mediterranean Climate : Variability and Trends*. Springer-Verlag, 320p.

Boudhar, A., Duchemin, B., Hanich, L., Jarlan, L., Chaponnière, A., Maisongrande, P., Boulet, G., et al., 2010. Long-term analysis of snow-covered area in the Moroccan High-Atlas through remote sensing. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12 :S109-S115.

Boudhar, A., Hanich, L., Boulet, G., Duchemin, B., Berjamy, B. and Chehbouni, A., 2009. Impact of the snow cover estimation method on the Snowmelt Runoff Model performance in the Moroccan High Atlas Mountains. *Hydrological Sciences Journal* 54(6) :1094-1112.

Cassou, C. and Terray, L., 2001. Dual Influence of Atlantic and Pacific SST on the North Atlantic/Europe

Winter Climate. *October* 28(16) :3195-3198.

Chaponnière, A., Maisongrande, P., Duchemin, B., Hanich, L., Boulet, G., Escadafal, R. and Elouaddat, S., 2005. A combined high and low spatial resolution approach for mapping snow covered area in the Atlas Moutain. *International Journal of Remote Sensing* 26 :2755-2777.

Fletcher, C.G. and Saunders, M.A., 2006. Winter North Atlantic Oscillation Hindcast Skill : 1900-2001. *Journal of Climate* 19(2002) :5762-5776.

Frei, A., Tedesco, M., Lee, S., Foster, J., Hall, D.K., Kelly, R. and Robinson, D.A., 2012. A review of global satellite-derived snow products. *Advances in Space Research* 50(8) :1007-1029.

Gao, Y., Xie, H., Lu, N., Yao, T. and Liang, T. (2010). Toward advanced daily cloud-free snow cover and snow water equivalent products from Terra-Aqua MODIS and Aqua AMSR-E measurements. *Journal of Hydrology* 385(1) :23-35.

Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33(8) :1-4.

Hall, D.K. and Riggs, G.A., 2007. Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrological Processes* 21 :1534-1547.

Hall, D.K., Riggs, G.A. and Salomonson, V., 1998. Development of Methods for Mapping Global Snow Cover Using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer Data. *Remote Sensing of Environment* 4257(95) :127-140.

Hall, D.K., Riggs, G.A. and Salomonson, V.V., 2001. Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for the MODIS Snow and Sea Ice-Mapping Algorithms (p. 83).

Hurrell, J.W., Kushnir, Y., Ottensen, G. and Visbeck, M., 2003. An Overview of the North Atlantic Oscillation (pp. 1-35).

Jarlan, L., Driouech, F., Duchemin, B., Tourre, Y., Abaoui, J., Kharrou, H., et al., 2013. Seasonal and interannual vegetation dynamics over Morocco through the NDVI / AVHRR from 1982 to 2008 : linkages with climate signals and potential for seasonal prediction. *International Journal of Climatology*.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society* 77(3) :437-471.

Klein, A.G. and Barnett, A. C. (2003). Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000 - 2001 snow year. *Remote Sensing of Environment* 86 :162-176.

Knippertz P, 2003. Tropical – Extratropical Interactions Causing Precipitation in Northwest Africa ? : Statistical Analysis and Seasonal Variations. *Monthly Weather Review* 131 :3069-3076.

Knippertz, P., Christoph, M. and Speth, P., 2003. Long-term precipitation variability in Morocco and the link to the large-scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and Atmospheric Physics* 83(1-2) :67-88.

Knippertz, P., Fink, A.H., Reiner, A. and Speth, P., 2003.

- Three Late Summer / Early Autumn Cases of Tropical – Extratropical Interactions Causing Precipitation in Northwest Africa. *Monthly Weather Review* 131 :116-135.
- Konig, M., Winter, J.G. and Isaksson, E., 2001. Measuring Snow and Glacier properties from satellite. *Review of Geophysics* 39(1).
- Lamb, P.J. and Pepler, R.A., 1987. North Atlantic Oscillation : Concept and an Application. *Bulletin of the American Meteorological Society* 68(10) :1218-1225.
- Lopez, P., Sirguey, P., Arnaud, Y., Pouyaud, B. and Chevallier, P., 2008. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000-2006). *Global and Planetary Change* 61(3-4) :103-116.
- Marshall, J., Kushnir, Y., Battisti, D., Chang, P., Czaja, A., Dickson, R., Hurrell, J., et al., 2001. North Atlantic climate variability : phenomena, impacts and mechanisms. *International Journal of Climatology* 21(15).
- Parajka, J., and Blötschl, G., 2006. Validation of MODIS snow cover images over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 10 :679-689.
- Parajka, J., Holko, L., Kostka, Z. and Bl, G., 2012. MODIS snow cover mapping accuracy in a small mountain catchment - comparison between open and forest sites. *Hydrology and Earth System Sciences* 2004 :2365-2377.
- Preisendorfer, R.W. and Mobley, C.D., 1988. *Principal Component Analysis in Meteorology and oceanography* (Elsevier., p. 425). Amsterdam and New York.
- Rimmer, A. and Salingar, Y., 2006. Modelling precipitation-streamflow processes in karst basin : The case of the Jordan River sources, Israel. *Journal of Hydrology* 331(3-4) :524-542.
- Rittger, K., Painter, T.H., and Dozier, J., 2013. Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS. *Advances in Water Resources* 51 :367-380.
- Robertson, A.W., Mechoso, C.R. and Kim, Y., 1998. The Influence of Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies on the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate* 310 :1-28.
- Rogers, J.C., 1997. North Atlantic Storm Track Variability and Its Association to the North Atlantic Oscillation and Climate Variability of Northern Europe. *Journal of Climate* 10(1991) :1635-1647.
- Salomonson, V.V. and Appel, I., 2004. Estimating Fractional Snow Cover from MODIS using the Normalized Difference Snow Index (NDSI). *Remote Sensing of Environment* 89 :351-360.
- Schulz, O. and Jong, C.D., 2004. Snowmelt and sublimation : field experiments and modelling in the High Atlas Mountains of Morocco. *Hydrology and Earth System Sciences* 8(6) :1076-1089.
- Shaban, A., Faour, G., Khawlie, M. and Abdallah, C., 2004. Remote sensing application to estimate the volume of water in the form of snow on Mount Lebanon / Application de la télédétection à l'estimation du volume d'eau sous forme de neige sur le Mont Liban. *Hydrological Sciences Journal* 49(4).
- Viviroli, D., Dürr, H.H., Messerli, B., Meybeck, M. and Weingartner, R., 2007. Mountains of the world, water towers for humanity : Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research* 43(7) :1-13.
- Wang, D., Wang, C., Yang, X. and Lu, J., 2005. Winter Northern Hemisphere surface air temperature variability associated with the Arctic Oscillation and North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters* 32(L16706) :4-7.