

Université Cadi Ayyad  
Faculté des Sciences et Techniques  
Marrakech



Département des Sciences de la Terre  
Laboratoire de Géoressources  
Unité associée au CNRST (URAC 42)

## Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Master Sciences et Techniques  
Eau et Environnement



### Etude de la relation entre enneigement et climat à grande échelle sur le Haut Atlas de Marrakech à l'aide des images MODIS (Période 2000-2010)

Par :

**Ahmed MARCHANE**

Sous la direction de :

Lahoucine HANICH (PES, FSTM, Université Cadi Ayyad, Marrakech)

Lionel JARLAN (CR, IRD, CESBIO, Toulouse)

Abdelghani BOUDHAR (PA, FSTBM, Université Sultan Moulay Slimane, Beni -mellal)

Soutenu le 29 juin 2011 devant la commission d'examen composée de :

A. BACHNOU Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

H. IBOUH Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

L.HANICH Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech

L. JARLAN Chargé de Recherche, Institut de Recherche pour le Développement, CESBIO,  
Toulouse (France)

2010/2011



## Remerciements

Je tiens tout particulièrement à remercier plusieurs personnes qui m'ont aidé à passer un excellent moment en leur compagnie par leurs conseils et leur contact agréable :

Mr **Lionel Jarlan** (CESBIO-IRD) pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son encadrement tout au long de ce stage. Ses connaissances techniques, son expérience dans ce domaine m'ont été d'une grande utilité pour mener à terme ce projet

Mr **Lahoucine Hanich** (FSTG-Marrakech) pour son encadrement et sa disponibilité, pour son appui technique et logistique tout au long du stage.

Mr **Abdelghani Boudhar** (FST-Beni Mellal), pour avoir accepté le co-encadrement de ce travail.

Mr **Michel le page**, (IRD-Marrakech) pour son aide et ses conseils.

L'ensemble de **l'équipe du projet SudMed** à Marrakech, les thésards et les fonctionnaires pour leur gentillesse et leur bonne humeur.

Mes **collègues du Master** pour tous les bons moments que nous avons partagés ensemble pendant toute la période de formation.

Enfin, je ne pouvais pas finir mes remerciements sans remercier mes parents, mon frère et toute ma famille. Malgré la distance, ils ont toujours été à mes côtés, dans les moments difficiles et moins difficiles, durant mes études. Grâce à eux je peux dire qu'aujourd'hui j'ai atteint les objectifs que je m'étais fixé il y a longtemps.

## Table de matières

Table de matières .....	4
Liste des figures .....	6
Liste des tableaux .....	8
Liste des abréviations .....	9
Introduction générale.....	10
Chapitre I : Contexte et méthodologie .....	12
I.1 Contexte institutionnel : .....	12
I.2 Région d'étude : .....	12
I.2.1 Présentation de la zone d'étude .....	12
I.2.2 Climat du Haut Atlas : .....	14
I.2.3 Caractéristiques physiographiques des sous bassins versants atlasique : .....	15
I.3 Notions de télédétection spatiale : .....	16
I.3.1 Définition de la télédétection spatiale : .....	16
I.3.2 Le processus de télédétection : .....	16
I.3.3 Interaction de la lumière avec la surface : .....	17
I.3.4 Orbitographie : .....	18
I.4 Télédétection des surfaces enneigées : .....	20
I.5 Les outils utilisés: .....	20
I.6 Les données utilisées: .....	21
I.6.1 Les Données satellitaires : .....	21
I.6.1.1 Le système VEGETATION : .....	21
I.6.1.2 Le système et les produits neiges MODIS : .....	24
I.6.2 Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) : .....	26
I.6.3 Les Données terrain : (station de l'Oukaimeden) .....	27
I.6.4 Les données atmosphériques et océaniques : .....	29
I.6.4.1 Température de surface des océans (SST) : .....	29
I.6.4.2 NAO (North Atlantic Oscillation): .....	30
I.7 Méthodologie .....	32
I.7.1 Prétraitement des données : .....	32
I.7.2 Statistiques : .....	33
I.7.2.1 Corrélation : .....	33
I.7.2.1 RMSE : .....	34

Chapitre II : Evaluation des produits MODIS.....	35
II.1 Introduction :.....	35
II.2 Comparaison à l'échelle du Haut Atlas : .....	35
II.3 Comparaison par bassin versant : .....	39
II.4 Comparaison par tranche d'altitude :.....	41
II.5 Comparaison avec les données de la station de l'Oukaimeden : .....	42
Chapitre III : Caractérisation de la variabilité de la surface neigeuse et lien avec le climat..	45
III.1 Caractérisation de la variabilité interannuelle de la surface neigeuse :.....	45
III.1.1 Variabilité interannuelle de l'enneigement sur le Haut Atlas : .....	45
III.2 Lien entre le climat à grande échelle et la variabilité du couvert enneigé sur le Haut Atlas:.....	50
III.2.1 Comparaison entre la surface de la neige et NAO : .....	50
III.2.2 Comparaison entre la surface de la neige et SST :.....	54
Conclusion.....	58
Bibliographie.....	60
Annexes.....	63
• Annexe 1 .....	63
• Annexe 2 .....	64
• Annexe 3 .....	66
• Annexe 4 .....	68
• Annexe 5 .....	72
• Annexe 6 .....	73

## Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude .....	14
Figure 2: Le processus de la télédétection (©CCRS/ CCT).....	16
Figure 3: Spectres typiques de réflectances de la neige, de l'eau, du sable et de la végétation. Les bandes spectrales correspondent aux capteurs embarqués sur SPOT : B1=Bleu, B2=rouge, B3=Proche Infrarouge, MIR=Moyen Infrarouge. ( <a href="http://vegetation.cnes.fr">http://vegetation.cnes.fr</a> ). .....	18
Figure 4: Orbite quasi polaire (©CCRS/ CCT).....	19
Figure 5: Fauchée d'un capteur (©CCRS/ CCT).....	20
Figure 6: classification du produit MODIS par niveau de distribution (traitement).....	25
Figure 7: MNT des sous bassins atlasique étudier .....	27
Figure 8: Station météorologique d'Oukaimeden installée à une altitude de 3200 m (Google Earth).....	28
Figure 9: Anomalies de température journalière minimale (A) et maximale (B) de la station d'Oukaimeden au pas de temps mensuel (Octobre 2000- Mai 2009) .....	29
Figure 10: Schéma de NAO <sup>+</sup> ( <a href="http://www.laterredufutur.com">http://www.laterredufutur.com</a> ).....	30
Figure 11: schéma de NAO <sup>-</sup> ( <a href="http://www.laterredufutur.com">http://www.laterredufutur.com</a> ) .....	31
Figure 12: Variation de l'Oscillation Nord Atlantique mensuelle pour la période 2000-2010. 31	
Figure 13: Exemple d'extraction et de reprojection des produits enneigées MODIS journaliers (01/01/2001) : (A) image brutes ; (B) extraction sur la fenêtre d'étude (coordonnées) et délimitation des 5 sous-bassins versants .....	32
Figure 14: Corrélacion entre les surfaces enneigées issus des images VEGETATION et MODIS dans le Haut Atlas durant la période (2001-2005) .....	36
Figure 15: Exemples d'images qui présentent une différence de surface enneigée entre MODIS (à gauche) et VEGETATION (à droite) .....	37
Figure 16: Exemple de Différence entre VEGETATION (à gauche) et MODIS (à droite) ....	38
Figure 17: Exemple de corrélation entre les surface d'enneigement issus des images VEGETATION et MODIS dans le bassin d'Ourika durant la période (2001-2005).....	40
Figure 18: Corrélacion entre les surface d'enneigement issu des images VEGETATION et MODIS par tranche d'altitude pour bassin d'Ourika durant la période (2001-2005).....	41
Figure 19 : Comparaison entre la série temporelle d'enneigement MODIS (%) d'enneigement du pixel de la station de l'Oukaimeden et l'équivalent en eau journaliers des précipitations solides mesuré à la station d'Oukaimeden pour la saison 2009-2010.....	43
Figure 20: Comparaison entre la série temporelle d'enneigement MODIS (%) d'enneigement moyenne des 9 pixels autour de la station de l'Oukaimeden et l'équivalent en eau journaliers des précipitations solides mesuré à la station d'Oukaimeden pour la saison 2009-2010.....	43
Figure 21: Cycles annuels d'enneigement (moyen de 15 jours) sur le Haut Atlas pour la période estimés 2000-2010.....	46
Figure 22: Variation de la somme d'enneigement sur le Haut Atlas pour la période 2000-2010 .....	47
Figure 23: Carte des dates de première neige pour les différentes années hydrologiques étudiées.....	48
Figure 24 : L'enneigement moyen sur le Haut Atlas .....	49

Figure 25: Corrélation entre NAO mensuelle et données d'enneigement , enneigement maximum(A) et dates des premières neige(B) pour la période 2000-2010 ..... 51

Figure 26: Relation entre enneigement maximum du Haut Atlas et NAO du mois de Février pour la période 2001-2010 ..... 52

Figure 27 : corrélation entre la température maximale journalière (moyenne mensuelle) enregistré à l'Oukaimeden de Novembre à Avril et la valeur mensuelle de la NAO simultanée et des 5 mois précédents (1988-2009). Les étoiles rouges correspondent aux valeurs significatives à 90% (test de Student) ..... 53

Figure 28: Cartes de corrélations globales entre les données SST et enneigement maximum pour la période 2000-2010 ..... 56

Figure 29 : Cartes de corrélations globales entre les données SST et les dates de première neige pour la période 2000-2010..... 57

## Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques physiques des bassins versants Haut Atlasique (JULLERAT, 2004).....	15
Tableau 2: Caractéristiques du capteur SPOT VEGETATION ( <a href="http://vegetation.cnes.fr">http://vegetation.cnes.fr</a> ). ....	22
Tableau 3:Bandes spectrales du capteur SPOT VEGETATION ( <a href="http://vegetation.cnes.fr">http://vegetation.cnes.fr</a> )....	22
Tableau 4: Les 7 premières bandes spectrale de MODIS/TERRA ( <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/">http://modis.gsfc.nasa.gov/</a> ). ....	24
Tableau 5: Caractéristiques du capteur MODIS/TERRA ( <a href="http://modis.gsfc.nasa.gov/">http://modis.gsfc.nasa.gov/</a> ). ....	24
Tableau 6: Présentation du produit MOD10 .....	26
Tableau 7: Sommaire des statistiques calculées entres les surfaces de neige MODIS et VEGETATION pour l'ensemble des bassins étudiés .....	41
Tableau 8: Caractéristiques de l'enneigement dans le Haut Atlas de Marrakech estimés à partir des données MODIS pendant la période 2000-2010 .....	47

## Liste des abréviations

- ABHT** : Agence du **B**assin **H**ydraulique du **T**ensift
- AVHRR**: **A**dvanced **V**ery **H**igh **R**esolution **R**adiometer
- CESBIO** : Centre d'Etudes Spatiales de la **B**IOsphère
- CNES** : Centre National d'Etudes Spatiales
- CCT** : Centre Canadien de Télédétection
- DMN** : **D**irection de la **M**étéorologie **N**ationale
- ENVI**: **E**Nvironment **V**isualizing **I**mages (Logiciel)
- EOS**: **E**arth **O**bserving **S**ystem
- GIEC** : **G**roupe d'**E**xperts **I**ntergouvernemental sur l'évolution du **C**limat
- HVR**: **H**aute **R**ésolution de **V**isible
- IRD**: **I**nstitut de **R**echerche pour le **D**éveloppement
- MNT**: **M**odèle **N**umérique de **T**errain
- MODIS**: **M**ODerate resolution **I**maging **S**pectroradiometer
- NAO**: **N**orth **A**tlantic **O**scillation
- NASA**: **N**ational **A**eronautics and **S**pace **A**dmistration
- NDSI**: **N**ormalized **D**ifference **S**now **I**ndex
- PIR**: **P**roche infrarouge
- RMSE**: **R**oot **M**ean **S**quare **E**rror
- SCA**: **S**now **C**overed **A**rea
- SPOT** : **S**ystème **P**our l'**O**bservation de la **T**erre
- SRTM**: **S**huttle **R**adar **T**opographic **M**ission
- SST**: **S**ea **S**urface **T**emperature
- UCAM** : **U**niversité **C**adi **A**yyad de **M**arrakech
- VGT**: **V**EGETATION

## Introduction générale

Dans les pays du sud de la Méditerranée et du Moyen Orient, l'eau est une ressource rare : 180 millions d'habitants disposent de moins de 1000 m<sup>3</sup>d'eau par an et par habitant et 80 millions sont en situation de pénurie (moins de 500m<sup>3</sup>/habitant /an) alors que la demande a doublé depuis 50 ans (plan bleu, 2009). Schématiquement, les projections du GIEC convergent vers un réchauffement, déjà sensible sur les 50 dernières années (Xoplaki et al., 2003) et un assèchement (GIEC, 2008). L'analyse de l'intensité de ces changements annoncés désigne la région méditerranée comme un « hot-spot » du changement climatique (Giorgi, 2006). Pour de nombreux bassins versants en méditerranée semi aride, la zone de production de l'eau est située en montagne (Viviroli, 2007) et la présence de neige constitue une source capitale d'eau de surface (Chaponnière et al., 2005 ; Rimmer and Salinger, 2006, Boudhar, 2007 ; 2008 ). Pour le bassin du Tensift, il a notamment été montré que la fonte des neiges pouvait contribuer jusqu'à 25% au débit des principaux oueds atlasique (Boudhar et al, 2009).

De longues séries temporelles de données satellitaires existent désormais. Dans les régions semi-arides qui ne disposent pas d'un panel opérationnel de suivi au sol (réseau météo ...), ces longues séries d'observation représentent un témoin unique de l'évolution des ressources qui n'a été que peu exploité jusqu'à présent en Méditerranée (Hill et al., 2008). Les méthodes opérationnelles de cartographie des surfaces enneigées à partir de données optiques à basse résolution reposent généralement sur l'utilisation d'indices de neige, combinaison des réflectances (visible / moyen infrarouge), qui sont reliés au taux d'enneigement. Les indices normalisés comme le NDSI atténuent l'impact des effets atmosphérique et directionnels (Salomonson and Appel, 2004). Les indices modifiés comme le MSI (Chaponnière et al., 2005) permettent dans une certaine mesure de tenir compte de la variation spatiale de la réflectance des surfaces . Les travaux de Boudhar (2009) ont notamment permis la production de cartes de surfaces enneigées de qualité à partir du capteur VEGETATION. Ces produits ont notamment été validés sur de l'imagerie à haute résolution spatiale.

Le climat global est constitué de pseudo oscillation couvrant une large gamme d'échelle de temps, du mensuel au multi décennal (et au-delà) qui résultent d'interactions complexes entre l'atmosphère, l'océan et les surfaces continentales à l'échelle globale. C'est, en particulier, l'excitation privilégiée de la phase positive de l'oscillation Nord Atlantique

(NAO) durant ces dernières années (Marshall et al., 2001) associée au passage de l'oscillation Atlantique Multi Décennale (Atlantic Multi-decadal Oscillation –AMO) (Knight et al., 2005) dans sa phase négative qui ont été identifiés comme favorables aux conditions sèches persistantes observées depuis 20 ans sur l'hémisphère nord. Ces phases positives persistantes de la NAO pourraient être favorisée par un réchauffement de l'atlantique tropical (Cassou et al., 2004) mettant ainsi en évidence une connexion entre les latitudes moyennes et tropicales. Dans un contexte climatique en évolution, il est donc important de disposer d'un outil de suivi des surfaces enneigées par télédétection et de mieux comprendre la relation entre la surface enneigée et le climat global sur le Haut Atlas, notamment dans la perspective de mise en place d'un système de prévision précoce de l'équivalent en eau du couvert neigeux.

L'objectif de ce stage est triple ; il s'agira (1) d'évaluer la qualité des produits MODIS d'estimation des surfaces enneigées, MOD10A1, en prenant les estimations calculées à partir des données VEGETATION par Boudhar (2009) comme référence ; (2) de caractériser la variabilité spatio-temporelle du couvert neigeux sur le Haut Atlas à partir des produits journaliers de couverture neigeuse MODIS et (3) d'étudier le lien entre la dynamique atmosphérique et océanique à grande échelle et la variabilité du couvert enneigé sur cette région.

## **Chapitre I : Contexte et méthodologie**

### **I.1 Contexte institutionnel :**

Le stage est effectué au sein du projet SudMed qui est un projet Franco-marocain, mené en partenariat entre l'Université Cadi Ayyad de Marrakech (UCAM), le Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère (CESBIO, Unité Mixte de Recherche UPS-CNRS-CNES-IRD, France), l'Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Haouz (ORMVAH), l'Agence du Bassin Hydraulique de Tensift (ABHT) et la Direction Nationale de la Météorologie (DMN).

Le projet SudMed a pour objectif d'étudier et de modéliser le fonctionnement hydro-écologique du bassin versant du Tensift (Marrakech, Maroc) (Chehbouni et al, 2008). (1) avec une double finalité: analyser et comprendre l'évolution future des ressources en eau sous l'impact de l'action humaine et des modifications climatiques (2) proposer des outils pour contribuer à la gestion durable de ces ressources.

La démarche du projet SudMed pour atteindre cet objectif se traduit par trois axes de recherche:

- Reconstituer en les distinguant les évolutions d'origine naturelle ou humaine qui ont marqué la région depuis 25 ans ou plus;
- Décrire d'une manière intégrée les processus dominants qui contrôlent les flux, la production végétale et les bilans hydriques dans une région semi-aride;
- Développer des scénarios d'évolution des ressources hydriques et végétales sous différents impacts anthropiques et climatiques.

### **I.2 Région d'étude :**

#### **I.2.1 Présentation de la zone d'étude**

Nous nous focaliserons dans la suite du travail sur les 10 sous-bassins versants de Montagne inclus dans le bassin du Tensift. Cette région sera abusivement désignée par « Haut Atlas » par commodité dans la suite du document. Le bassin versant du Tensift occupe une superficie de 20450 km<sup>2</sup> (Figure 1).

Ce large domaine continental est situé entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 12' Ouest. Il est limité au Sud par la ligne de crête de la chaîne du Haut Atlas, au Nord par le massif de petites montagne nommé « Jbilet » avec des altitudes inférieurs à 1000 mètres, à l'Est par la ligne de partage des eaux, peu marquée, séparant le bassin du Tensift de celui du Tessaout, affluent d'Oum Er R'bia et à l'Ouest par l'océan Atlantique où se situe son exutoire. Les altitudes sont donc très contrastées, varient de 0 mètre au niveau de son exutoire à 4167 mètres au Jbel Toubkal .

La zone qui nous intéresse dans cette étude c'est le Haut Atlas de Marrakech. C'est une barrière montagneuse limitée à l'Ouest par Oued Nfis et elle s'étend jusqu'à l'Est de vallée du R'Dat. (Figure 1).

La morphologie globale de cette chaîne montre trois parties (Michard, 1976), le Haut Atlas oriental, le Haut Atlas central et le Haut Atlas occidental.

- ✓ Le **Haut Atlas occidental** est le massif le plus ancien, constitué de formations jurassiques ou crétacées entaillées de vallées profondes. Son point culminant est le Jbel Toubkal à 4167 mètres.
- ✓ Le **Haut Atlas central** est un massif essentiellement calcaire, morphologiquement dominé par des zones tabulaires culminant à 4000 mètres d'altitude, qui s'étend d'Azilal à Quarzazate.
- ✓ **Le Haut Atlas oriental** est formé des vastes plateaux d'altitude de la haute Moulouya. Ces plateaux s'étendent de Midelt (province de Khénifra), abritant le jbel Ayachi (3747mètres) à Imilchil (province d'Errachidia). L'altitude s'affaiblit vers l'est, où débute le domaine des hamadas (zone présaharienne). (<http://fr.wikipedia.org>).

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons aux sous-bassins versants de montagne du bassin du Tensift : le Nfis, Rheraya, Ourika, Ghdat, Zat, Anougal, Wadaker, Assif el Mehl, Seksawa, Mhand. Ils se situent à quelques dizaines de kilomètres au Sud et à l'Est de la ville de Marrakech.

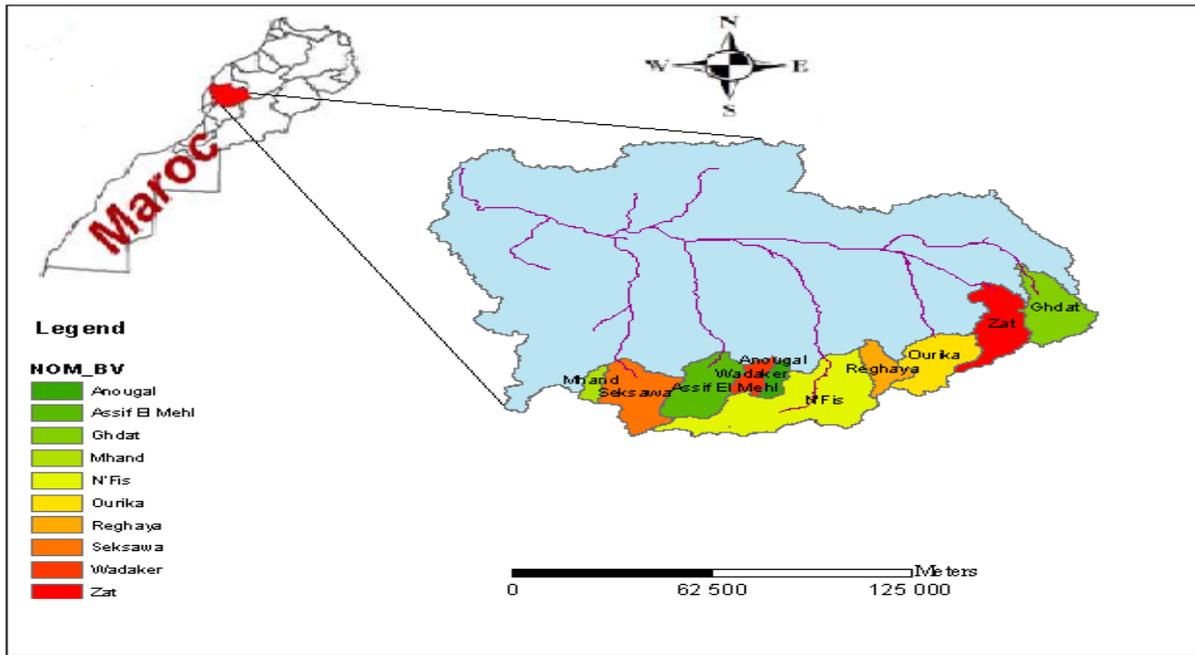


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude

### I.2.2 Climat du Haut Atlas :

Le Haut Atlas comporte deux types de climats montagnards.

L'un est **subtropical océanique** : se manifeste sur les versants Nord et Sud de la partie occidentale (jusqu'au Jbel Toubkal) ainsi que le versant nord de la partie centrale (du Toubkal jusqu'à Imilchil). Exposés aux perturbations venant de l'Atlantique, ils sont relativement humides avec des précipitations espacées mais parfois diluviennes. Il tombe entre 600 et 1 000 mm d'eau par an en moyenne. La sécheresse estivale, entrecoupée d'orages, est intense. L'enneigement est généralement tenace au-dessus de 2 500 à 3 500 mètres de novembre à avril et peut persister de septembre à juin pour les hauts sommets (avec de grosses variations selon l'exposition). (<http://fr.wikipedia.org>).

L'autre climat est **semi-désertique continental** : il se manifeste sur le versant sud de la partie centrale (du Toubkal à Imilchil) et toute la partie orientale (au-delà d'Imilchil), avec des amplitudes thermiques marquées. S'étendent de hautes steppes, des déserts de pierres et plus rarement de sable, et quelques vallées pourvues en eau où l'agriculture, très localisée, est possible. (<http://fr.wikipedia.org>).

**I.2.3 Caractéristiques physiographiques des sous bassins versants atlasiques :**

Le tableau 1 décrit les caractéristiques physiques des cinq bassins versants les plus actifs du Haut Atlas, qu'on peut les regrouper en deux ensembles (JUILLERAT, 2004):

- Les bassins versants des oueds N'Fis, Rhéraya et Ourika avec des altitudes moyennes au dessus de 2150 m et des pentes importantes (pente moyenne de l'ordre de 20 %). Les précipitations devraient être solides sur les hauteurs impliquant un écoulement plus important lors de la fonte des neiges.
- Les bassins versants des oueds Zat et R'Dat qui sont plus bas en altitudes (altitude moyenne autour de 1500 m avec des minima en dessous des 1000 m) et ont des pentes moyennes moins importantes (de l'ordre de 14-15 %). Le régime des précipitations devrait être moins perturbé par la fonte des neiges que les bassins versants précédents.

La différence entre ces bassins se fait donc, essentiellement, au niveau des reliefs et des pentes.

<i>Bassin versant</i>	<i>Surface en (Km<sup>2</sup>)</i>	<i>Périmètre (Km)</i>	<i>Altitude moyenne (m)</i>	<i>Altitude max (m)</i>	<i>Longueur du talweg principale (Km)</i>
<i>N'Fis</i>	848	172.5	2200	4088	58
<i>Rheraya</i>	225	78	2154	4167	32
<i>Ourika</i>	503	104	2550	4001	45.5
<i>Zat</i>	516	135	1960	3847	55
<i>R'Dat</i>	269	130	1700	3476	50

<i>Bassin versant</i>	<i>Longueur totale des cours d'eau (km)</i>	<i>Pente moyenne (%)</i>	<i>Altitudes importantes (m)</i>	<i>Temps de concentration</i>	<i>Indice de compacité</i>
<i>N'Fis</i>	2887	19.3	1500-3000	9h 10min	1.67
<i>Rheraya</i>	865	19.1	>2500	4h 11min	1.46
<i>Ourika</i>	1550	19.9	1500-3500	5 h 20 min	1.3
<i>Zat</i>	1663	15.5	1500-2500	6 h 44 min	1.66
<i>R'Dat</i>	1374	13.8	<2500	7h	1.54

**Tableau 1: Caractéristiques physiques des bassins versants Haut Atlasique (JUILLERAT, 2004)**

### I.3 Notions de télédétection spatiale :

Nous allons tenter ici de récapituler quelques notions de télédétection utiles pour la compréhension de la suite du rapport.

#### I.3.1 Définition de la télédétection spatiale :

Le terme "télédétection" signifie reconnaissance à distance. Il peut donc s'agir soit de mesure depuis l'espace, soit de mesure depuis le sol si l'instrument est éloigné de la cible. On distingue deux types de mesures par télédétection, la télédétection passive et la télédétection active. Passive signifie que l'instrument est uniquement constitué d'un détecteur, il s'agit donc de mesurer une "émission" naturelle de la surface observée ou un rayonnement naturel réfléchi par la surface. La télédétection active implique, au contraire, que l'instrument envoie un rayonnement d'une certaine longueur d'onde et qu'il mesure le rayonnement réfléchi. Nous ne détaillerons ici que le processus de télédétection passive qui est au centre du présent travail. La suite de ce paragraphe est largement inspirée des tutoriels de télédétection du Centre Canadien de Télédétection (CCT/ <http://www.ggy.bris.ac.uk>).

#### I.3.2 Le processus de télédétection :

L'observation de la terre par les satellites peut être décomposée en sept étapes ou processus depuis la source d'énergie qui éclaire la surface terrestre jusqu'à la dernière étape qui consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible ( Figure 2).

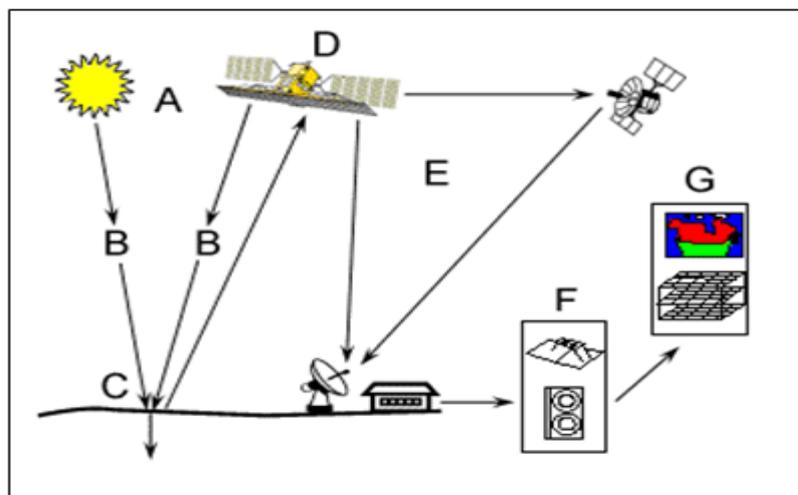


Figure 2: Le processus de la télédétection (©CCRS/ CCT)

**A: Source d'énergie ou d'illumination:** À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

**B: Rayonnement et atmosphère:** Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

**C: Interaction avec la cible:** Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

**D: Enregistrement de l'énergie par le capteur:** Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.

**E: Transmission, réception et traitement:** L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

**F : Interprétation et analyse:** Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

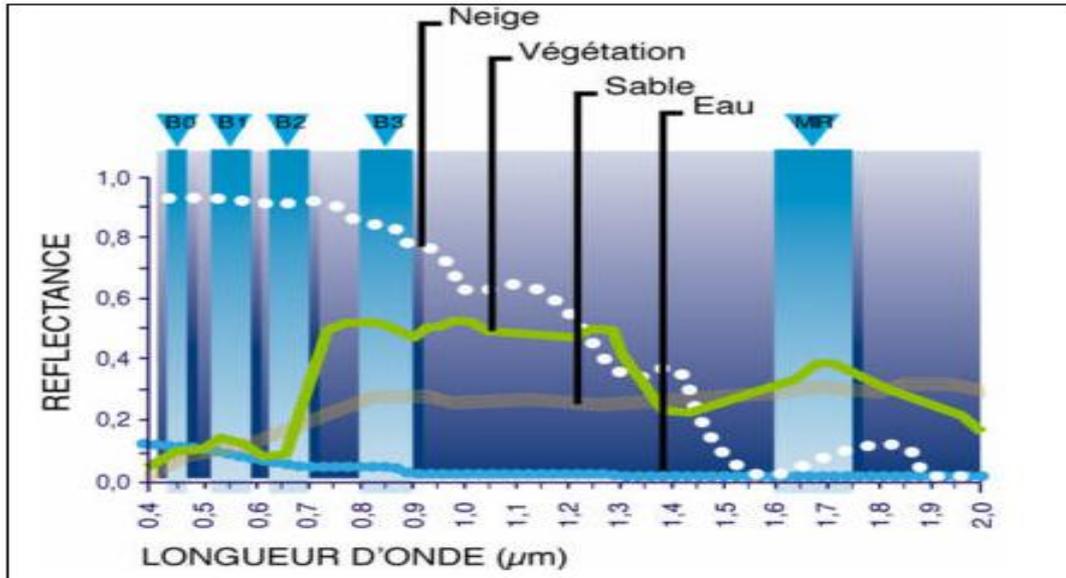
**G: Application:** La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

### **I.3.3 Interaction de la lumière avec la surface :**

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber l'énergie, la transmettre ou réfléchir l'énergie incidente. L'énergie incidente totale interagira avec la surface selon l'un ou l'autre de ces trois modes d'interaction ou selon leur combinaison. La proportion de chaque interaction dépendra de la longueur d'onde de l'énergie, ainsi que de la nature et des conditions de la surface.

La figure 3 montre les signatures typiques de différents types de surface. Les couverts végétaux sont généralement caractérisés par une forte absorption dans le rouge (à titre illustratif, il s'agit de la bande B2 du satellite SPOT) et une forte réflectance dans le proche

infrarouge (bande B3). La réflectance de la neige est très élevée dans le visible et le proche infrarouge. Elle diminue à partir de 1  $\mu\text{m}$  pour atteindre des valeurs très faibles dans le moyen infrarouge à 1.55  $\mu\text{m}$ . L'eau absorbe la majorité du rayonnement reçu quelle que soit la longueur d'onde. La réflectance diminue progressivement avec la longueur d'onde pour atteindre des valeurs quasi nulles dans le proche infrarouge après 0.9  $\mu\text{m}$ . La réflectance du sable, et plus généralement celles de sols nus, est faible aux courtes longueurs d'ondes, puis augmente quasi linéairement.



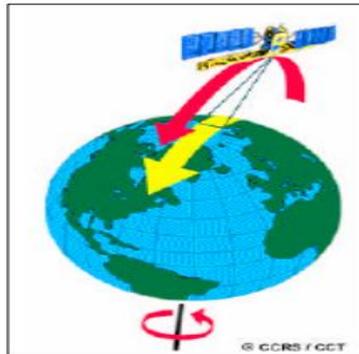
**Figure 3: Spectres typiques de réflectances de la neige, de l'eau, du sable et de la végétation. Les bandes spectrales correspondent aux capteurs embarqués sur SPOT : B1=Bleu, B2=rouge, B3=Proche Infrarouge, MIR=Moyen Infrarouge. (<http://vegetation.cnes.fr>).**

Les valeurs enregistrées par un satellite dans différentes bandes spectrales peuvent servir à calculer des indices combinant ces valeurs pour chaque point observé, sous forme de compte numériques ou de réflectance si ces mesures sont corrigées des effets directionnels, géométriques et atmosphériques (Définition en annexe). Ils ont été développés pour dégager une information spécifique qui n'est pas forcément visible sur une image acquise à une longueur d'onde unique.

### I.3.4 Orbitographie :

L'orbite d'un satellite est choisie en fonction de la capacité des capteurs qu'il transporte et des objectifs de sa mission. Le choix d'un orbite est déterminé par l'altitude (la hauteur du satellite au dessus de la surface de la terre), l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la terre.

Certaines plates-formes spatiales suivent un orbite allant pratiquement du nord au sud et vice-versa (c'est le cas pour SPOT et TERRA qui vont être utilisés dans notre étude). Cette configuration, combinée avec la rotation de la terre (ouest-est), fait qu'au cours d'une certaine période qui dépend de la fauchée du capteur (bande au sol observée par le capteur ; figure 5), les satellites ont observé la presque totalité de la surface de la terre. Ce type d'orbite est appelé orbite quasi polaire à cause de l'inclinaison de l'orbite par rapport à une ligne passant par les pôles Nord et Sud de la terre (figure 4). La plupart des satellites sur orbite quasi polaires ont aussi une orbite héliosynchrone ; de cette façon, ils observent toujours chaque région du globe à la même heure locale solaire. Pour une latitude donnée, la position du Soleil dans le ciel au moment où le satellite survole une certaine région au cours d'une saison donnée sera donc toujours la même.



**Figure 4:Orbite quasi polaire (©CCRS/ CCT)**

Lorsqu'un satellite est en orbite autour de la Terre, le capteur "observe" une certaine partie de la surface. Cette surface porte le nom de couloir-couvert ou fauchée (Figure 5). Les capteurs sur plate-forme spatiale ont une fauchée dont la largeur varie généralement entre une dizaine et une centaine de kilomètres. Pour les satellites à orbite quasi polaire, le satellite se déplace selon une trajectoire nord-sud. Cependant, vue de la Terre, la trajectoire du satellite semble avoir une composante vers l'ouest à cause de la rotation de la Terre. Ce mouvement apparent du satellite permet à la fauchée du capteur d'observer une nouvelle région à chacun des passages consécutifs du satellite. L'orbite du satellite et la rotation de la Terre travaillent donc de concert, permettant une couverture complète de la surface de la planète après un cycle orbital complet.

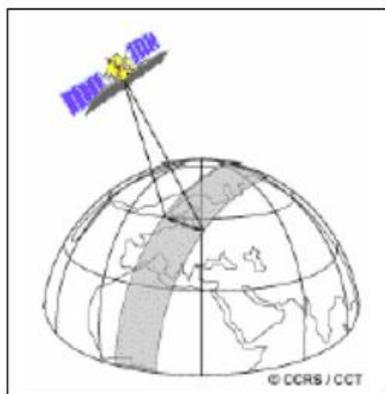


Figure 5: Fauchée d'un capteur (©CCRS/ CCT)

#### I.4 Télédétection des surfaces enneigées :

Les propriétés optiques de la neige sont de mieux en mieux cernées (Painter and Dozier, 2004 ; Dumont et al., 2009). Avec un albédo très élevé dans le visible ( $VIS > 0.9 \mu m$ ) et très faible dans le moyen infrarouge ( $MIR < 0.1 \text{ à } 1.6 \mu m$ ), la signature spectrale de la neige pure est très spécifique et contraste avec celles des autres surfaces naturelles (voir notamment figure 3).

L'algorithme de cartographie de la neige, basé sur (Normalized Difference Snow Index) NDSI, identifie la présence de la neige par le contraste de réflectance entre le visible et le moyen infrarouge. Le NDSI compense partiellement un certain nombre de conditions d'éclairage, y compris les effets atmosphériques. Le NDSI se calcule comme suit (Boudhar, 2009) :

$$NDSI = (VIS - MIR) / (VIS + MIR) \quad \text{Équation 1}$$

#### I.5 Les outils utilisés:

**MATLAB** est un logiciel d'analyse numérique, c'est un environnement puissant, complet et facile à utiliser, destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs et aux chercheurs et à tout scientifique, un système interactif. Il est performant, ouvert et programmable. Il dispose de plusieurs centaines des fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. Son approche matricielle, permet de traiter les données sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symétriques de façon fiable et rapide.

Tous les traitements relatifs aux images satellites ont été programmés sous **MATLAB** Ces traitements s'organisent comme suit :

- La préparation des données (l'extraction des fenêtres Maroc et Tensift et la sélection des images, ainsi que des calculs statistiques sur les images extraites)
- La re-projection
- L'extraction sur une large fenêtre Haut Atlas (donner les coordonnées de la fenêtre)
- Calcul de la surface neigeuse sur le Haut Atlas de Marrakech, par altitude et par bassin versant.

Le logiciel **ENVI** (Environment for Visualizing Images), a également été utilisé pour la visualisation des images, notamment pour la détection des masses nuageuses, et l'extraction des limites des cinq sous bassins Atlasiques.

C'est un logiciel qui permet de lire, de visualiser et d'analyser des images numériques et en particulier issues de la télédétection. ENVI supporte un grand nombre de formats de fichier de toutes tailles, mais possède également son format propre. Le format utilisé par ENVI est un format raster brut associé à un fichier entête ASCII (texte). Le fichier entête (header) contient toutes les informations utiles au logiciel pour lire le fichier : dimension de l'image, résolution et la projection.

ENVI est couplé à un logiciel de calcul scientifique IDL qui est très similaire à matlab dans son fonctionnement et ses objectifs (seule la syntaxe des commandes diffère), IDL s'est imposé comme le système de traitement universel utilisé en physique solaire, mais aussi en géoscience (ENVI). Il tourne sur toutes plateformes : Windows, Mac, UNIX.

## **I.6 Les données utilisées:**

### **I.6.1 Les Données satellitaires :**

#### **I.6.1.1 Le système VEGETATION :**

L'instrument VEGETATION est le point de départ d'un système de surveillance européen de la terre qui a été développé conjointement par la France, la Commission européenne, la Belgique, l'Italie et la Suède. Depuis avril 1998, VEGETATION a fourni une surveillance globale de la dynamique journalière des couverts terrestres avec une résolution de 1 Km. Le capteur VEGETATION est un excellent outil de surveillance compte tenu de la haute exigence de qualité en termes de radiométrie, géométrie et traitement additionnel pour des effets directionnels et atmosphériques.

Les capteurs VEGETATION (Archard et al., 1994; Arnaud and Leroy, 1991; Saint, 1994), lancés à bord des satellites SPOT 4 et 5, comprennent un système imageur dans quatre bandes spectrales (bleu : 0,43 - 0,47  $\mu\text{m}$ , rouge: 0,61 - 0,68  $\mu\text{m}$ , PIR: 0,78 - 0,89  $\mu\text{m}$  et MIR : 1,58 - 1,75  $\mu\text{m}$ ). 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 2200 km. La taille du pixel au nadir est de 1,15 x 1,15km. 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 (Tableau 2 et Tableau 3). Ces caractéristiques techniques et orbitales font que l'instrument VEGETATION voit 90% de l'équateur chaque jour, les 10% restant étant vus le lendemain.

<b>Lancement</b>	1998
<b>Altitude</b>	830 km
<b>Orbite</b>	polaire héliosynchrone
<b>Heure de passage à l'équateur</b>	10:30 a.m (descendant)
<b>Champ de vue</b>	~2250 km Angle d'observation (off-nadir) de l'ordre de 50.5°
<b>Résolution spatiale au nadir</b>	1.15 km
<b>Période de revisite</b>	1 jour

**Tableau 2 : Caractéristiques du capteur SPOT VEGETATION** (<http://vegetation.cnes.fr>).

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale (m)
1	Bleu	0.43-0.47 $\mu\text{m}$	1000
2	Rouge	0.61-0.68 $\mu\text{m}$	1000
3	Proche Infrarouge	0.78-0.89 $\mu\text{m}$	1000
4	Moyen Infrarouge	1.58-1.75 $\mu\text{m}$	1000

**Tableau 3 : Bandes spectrales du capteur SPOT VEGETATION** (<http://vegetation.cnes.fr>).

Depuis le lancement du capteur VEGETATION-1 (1998), deux types de produits sont proposés aux utilisateurs (Maisongrande et al. 2004):

- **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 apparente 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, pendant cette période, de la meilleure observation (technique du Maximum Value Composite, (Holben, 1986 ; Tarpley, 1984) ou de toutes les observations non nuageuses, qui sont ensuite moyennées après normalisation dans une configuration soleil-cible-capteur fixe (BiDirectional Compositing) (Duchemin et al., 2002). 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 coté mesure 1/112°.

Dans le cadre de la thèse de Boudhar (2009), les produits P à un pas de temps journalier ont été utilisés pour fournir des cartes de surfaces enneigées sur la période de 2000 à 2005. L'estimation de surfaces enneigées peut être résumée dans les étapes suivantes : en premier lieu les images brutes de VEGETATION ont subi un traitement pour la sélection des images sans nuage (qui sont sélectionnées après une analyse visuelle) et qui sont prises avec un angle de visée faible, ensuite la fraction de la surface enneigée dans chaque pixel a été calculée en appliquant une équation exponentielle (Équation 2) :

$$S = [1 - 0.49 \times \text{EXP}(-0.69 \times (\text{MSI}/100) + 1)]^{20} \quad \text{Équation 3}$$

Cette équation exponentielle a donné les meilleurs résultats de comparaison avec l'imagerie à haute résolution.

La détection de nuage pour le produit VEGETATION à été faite aussi dans le cadre de la thèse d'A. Boudhar (2009) en deux étapes :

- ✓ Dans un premier temps, ils ont repéré les images présentant des réflectances dans le bleu supérieures à 20% sur le piémont atlasique (altitudes inférieures à 1000 m).
- ✓ Dans une deuxième étape, ils ont repéré visuellement les nuages sur les images restantes en se basant sur la différence de signature spectrale dans le bleu et le MIR (Moyen Infra Rouge) sous le logiciel de traitement d'images ENVI.

Après tous les filtres appliqués, Le nombre d'images VEGETATION retenues est respectivement de 23, 24, 35, 37 et 34 pour les saisons 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004 et 2004-2005.

**I.6.1.2 Le système et les produits neiges MODIS :**

MODIS est un spectro-radiomètre monodirectionnel sensible aux domaines du visible, du proche infrarouge, du moyen infrarouge et de l'infrarouge thermique (Salomonson, 2002).

Les 36 canaux, échantillonnant ce large domaine allant de 0.415 à 14.235µm (tableau 4), font de cet instrument un capteur à moyenne résolution spectrale. Il dispose de plusieurs résolutions spatiales : 250 m pour les bandes 1et 2 (0.6µm-0.9µm), 500m de la 3<sup>ième</sup> à la 7<sup>ième</sup> (0.4 µm -2.1 µm) et 1000m à partir de la 8<sup>ème</sup> (0.4 µm –14.4 µm). Contrairement aux autres capteurs, MODIS scanne 10 lignes à la fois à la résolution spatiale de 1 Kilomètre, 40 lignes à celle de 250 mètres et 20 à celle de 500 mètres et ceci toujours dans le même sens (Tableau 4 et 5).

Bande	Bandes spectrales	Longueur d'onde	Résolution spatiale(m)
1	Rouge	0.62-0.67 µm	250
2	Infrarouge	0.84-0.87 µm	250
3	Bleu	0.45-0.47 µm	500
4	Vert/Jaune	0.54-0.56 µm	500
5	Infrarouge	1.23-1.25 µm	500
6	Infrarouge	1.62-1.65 µm	500
7	Infrarouge	2.10-2.15 µm	500

Tableau 4: Les 7 premières bandes spectrale de MODIS/TERRA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

	Lancement	1999
	Altitude	705 km
	Orbite	Héliosynchrone descendante
	Heure de passage à l'équateur	10:30 a.m.
	Champ de vue	2330 km
	Résolution spatiale au nadir	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 250 m (bande #1-2)</li> <li>• 500 m (bande #3-7)</li> <li>• 1 km (bande #8-36)</li> </ul>
	Période de revisite	(+/-2jours)

Tableau 5: Caractéristiques du capteur MODIS/TERRA (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

Le champ de visée fixe de +/- 55° implique une couverture de 2320Km. Ce large champ et les caractéristiques orbitographiques de la plateforme font que chaque point sur terre peut être vu tous les un à deux jours. La fréquence de revisite au dessus d'un même point avec les mêmes conditions géométriques de visée est de 16 jours.

✓ **Les produits MODIS :**

Les images ou produit MODIS sont distribués selon différents niveaux de traitement, radiométrique et de correction atmosphérique, topographique ou encore géométrique. Ils sont repartis dans 5 classes : calibration, atmosphères, terres émergées, cryosphère et océan (Figure 6) <http://modis.gsfc.nasa.gov>



**Figure 6 : Classification du produit MODIS par niveau de distribution (traitement)**

La cartographie de couverture de neige fractionnaire est basée sur la technique de régression de (Salomonson et Appel, 2004). La zone fractionnée (en %) de chaque pixel couvert de neige est calculée pour les terres et les eaux intérieures qui ne sont pas couvertes par les nuages.

$$\text{Fraction de neige} = -0.01 + 1.45 * \text{NDSI} \quad \text{Équation 4}$$

La détection de neige est assurée par l'utilisation de deux groupes de critères d'essais pour les caractéristiques de réflectance de la neige dans les régions visible et proche infrarouge. Un pixel est identifié comme enneigé si toutes les conditions suivantes sont remplies:

- $(VIS - MIR) / (VIS + MIR)$  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

### La détection de nuage

Les techniques de séparation entre neige et nuage sont basées sur la différence de réflectance et des caractéristiques d'émission. Les nuages peuvent être détecté par leur importante réflectance dans les domaines du visible et proche infrarouge du spectre électromagnétique (Rossow et Garder, 1993), alors que la réflectance de la neige (figure 3) diminue dans les ondes courtes de la partie infrarouge.

L'analyse des cartes de la neige dans de nombreux endroits et des situations conduit à un raffinement dans l'utilisation des résultats des tests stockés dans le produit masque de nuages. On a découvert que la différence de température de brillance (BT 3,7 mm - BT 11 mm) d'essai, stockés dans "bit 19" du produit masque de nuages, a fourni un masque de nuages raisonnable et qui améliore la cartographie de la neige.

Le tableau 6 présente le produit neige MOD10A1 utilisé dans ce travail, les données de ce produit sont sous format HDF-EOS et quadrillé dans une projection sinusoïdale. L'albédo est stocké comme nombre entier avec des valeurs de 0 à 100.

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

Tableau 6 : Présentation du produit MOD10

### I.6.2 Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) :

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) utilisé dans cette étude provient des données altimétriques recueillies au cours de la mission de 11 jours de la navette spatiale SRTM11 en utilisant l'interférométrie radar. Il est disponible depuis 2004 sur l'Afrique du Nord à la résolution de 90m gratuitement sur le site web (<http://seamless.usgs.gov/Website/Seamless/>).

Il est de bonne qualité car il décrit bien les pentes contrairement à beaucoup de MNT issus d'interpolation de courbes de niveau.

Les différents calculs effectués sur le MNT ont été réalisés à l'aide de l'application «Spatial Analyst » du logiciel ArcGIS 9.1 (Figure 7)

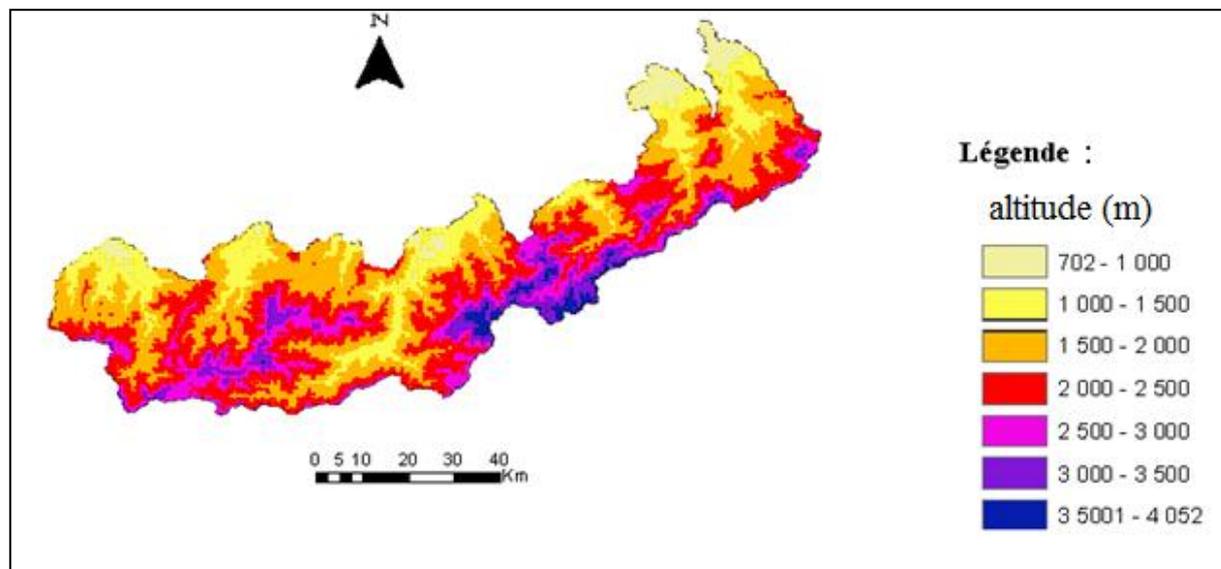


Figure 7: MNT des sous bassins atlasiques étudiés

### I.6.3 Les Données de terrain (station de l'Oukaimeden)

La station nivo- météorologique d'Oukaimeden est installée à une altitude de 3200 mètres près (Figure 8), celle-ci comprend des instruments de mesure de température de l'air, précipitations, vitesse de vent, rayonnement global et humidité de l'air en plus de la hauteur de la neige. En 2009, la station est équipée d'un GEONOR qui permet de mesurer le cumul des précipitations solide et liquide.

L'équivalent en eau de la neige est calculé à partir des données acquises par le capteur GEONOR qui mesure l'équivalent en eau des précipitations solides et liquides auxquelles sont retranchées les données d'un pluviomètre (précipitations liquides).

Les températures minimales et maximales journalières se sont des données du club Alpin Français elles couvrent la période 1988- 2009.



**Figure 8: Station météorologique d'Oukaïmeden installée à une altitude de 3200 m (Google Earth)**

Par ailleurs, nous disposons des données du Club Alpin Français (CAF) qui sont constitués des températures minimales et maximales journalières sur la période 1988- 2009.

La série temporelle des anomalies de températures minimale et maximale au pas de temps mensuel de la station d'Oukaïmeden sont présentées sur la figure 9 sur notre période d'étude. Les anomalies sont obtenues en retirant à chaque observation mensuelle la moyenne du mois correspondant calculé sur la série 1988-2009. Par ce biais, nous pouvons faire ressortir la variabilité interannuelle du signal de température. D'une manière générale, nous avons une prédominance d'hivers plus chauds que la normale de la période 1988-2009 avec une série d'années caractérisées par des hivers plutôt doux au début de notre période d'étude. Seuls les hivers 2004-2005, 2005-2006 et 2008-2009 sont clairement plus froids que la normale.

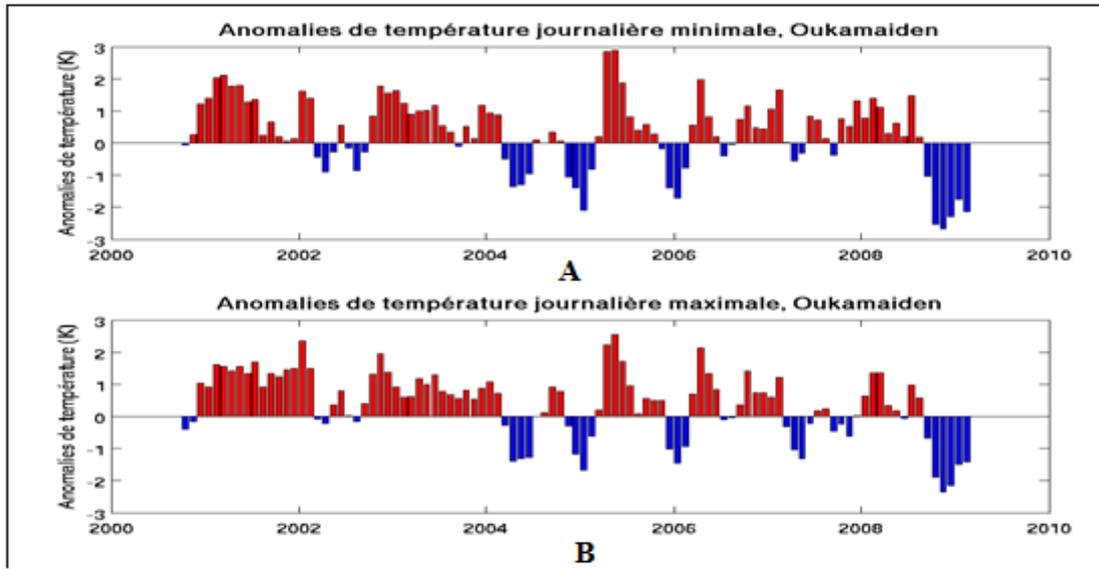


Figure 9: Anomalies de températures journalière minimale (A) et maximale (B) de la station d'Oukaimeden au pas de temps mensuel (Octobre 2000- Mai 2009)

#### I.6.4 Les données atmosphériques et océaniques :

##### I.6.4.1 Température de surface des océans (SST) :

Les données de température des océans utilisées sont issues de capteurs à bord des satellites de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Elles correspondent aux températures de la couche d'eau de 6 m d'épaisseur à la surface des océans.

Nous avons utilisé des données mensuelles globales de la température à la surface des océans de résolution  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  de la période 2000 -2010.

##### Méthode de mesure de la SST :

Mesure de la SST-HR : le radiomètre AVHRR des satellites météorologiques et environnementaux de la NOAA (instrument également embarqué à bord du satellite européen Metop-A) capte l'émission infrarouge de la surface de la Terre. La température de surface de la mer est calculée à partir de cette émission (avec une résolution de 1km) par un algorithme qui intègre les lois physiques et l'expérience acquise en océanographie et en télédétection.

Unité : degré Celsius, précision absolue  $< 0.5^{\circ} \text{ C}$ , précision relative  $> 0.2^{\circ} \text{ C}$ . La luminance émise par la surface de la mer puis enregistrée par le capteur, est convertie en température de brillance ou température apparente radiative, liée à la température réelle de surface de l'océan. Cependant certaines corrections sont nécessaires pour prendre en

compte les perturbations de l'atmosphère, principalement la vapeur d'eau qui absorbe une partie du rayonnement (<http://www.onerc.org>).

#### **I.6.4.2 NAO (North Atlantic Oscillation):**

La 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. C'est vers 1920 que les deux météorologues, l'autrichien Friedrich et l'anglais Gilbert Walker ont découvert ce phénomène. La variation de ce phénomène dépend de la pression atmosphérique.

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 (Hurrell et al. 1995).

##### ✓ **La phase positive de la NAO** (NAO<sup>+</sup>)

Elle correspond à un renforcement des deux centres d'action, avec un anticyclone plus marqué et une dépression plus creusée (figure 10). Il en résulte une intensification des vents d'ouest des moyennes latitudes et des alizés de l'Atlantique subtropical. Le décalage vers le nord du courant-jet d'altitude favorise une course plus septentrionale des dépressions des moyennes latitudes, qui advectent un air océanique chargé en humidité. On observe alors des températures plus douces et plus de précipitations sur l'Europe du Nord, la Scandinavie et jusqu'en Sibérie. A l'inverse, on observe des conditions plus sèches sur la région méditerranéenne.

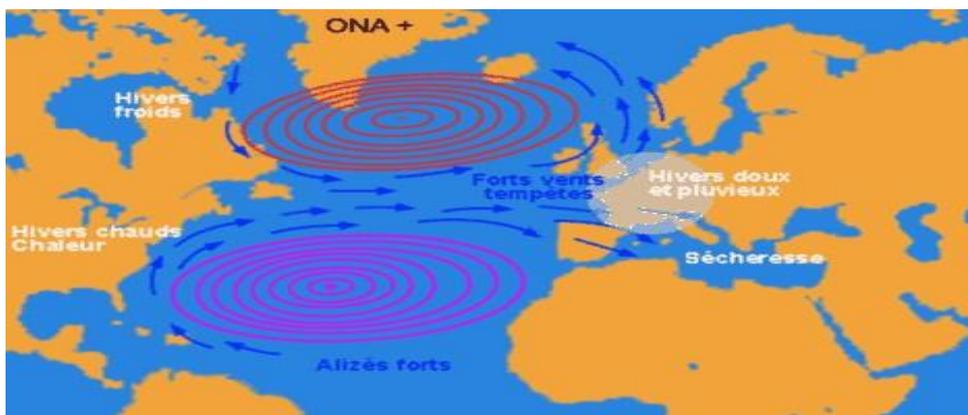


Figure 10: Schéma de NAO<sup>+</sup> (<http://www.laterredufutur.com>)

##### ✓ **La phase négative de la NAO** (NAO<sup>-</sup>)

Elle se caractérise par un affaiblissement de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande (figure 11), produisant un décalage des dépressions des moyennes

latitudes vers le sud. Les impacts en températures et précipitations sur la région Nord Atlantique sont relativement symétriques à ceux de la NAO<sup>+</sup>.

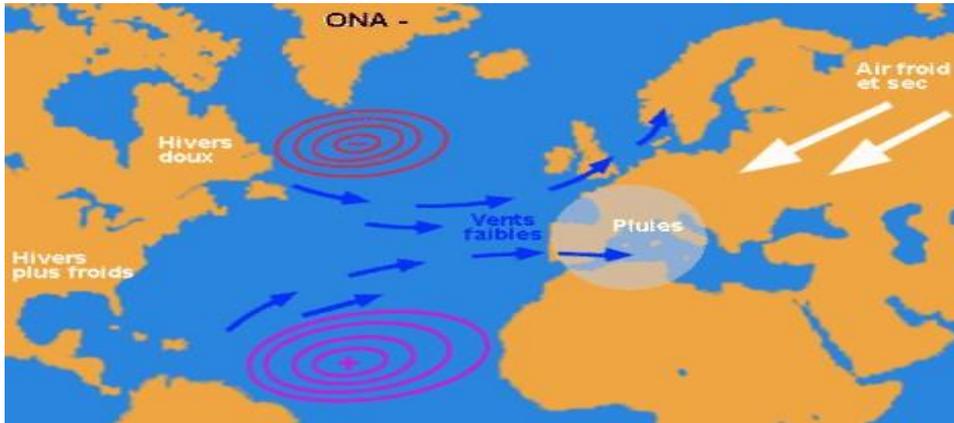


Figure 11: schéma de NAO<sup>-</sup> (<http://www.laterredufutur.com>)

La figure 12 représente les valeurs mensuelles de l'indice NAO de 2000 à 2010. Les mois où l'indice est positif sont colorés en rouge (phase positive de la NAO), alors que ceux où l'indice est négatif sont colorés en bleu (phase négative de la NAO). Nous constatons que la NAO présente une forte variabilité temporelle avec des changements de signes brusques d'un mois sur l'autre. Cette variabilité temporelle est une caractéristique bien connue du phénomène et couvre une large gamme de fréquence du mois à la décennie. Néanmoins, nous constatons que certaines phases de la NAO peuvent persister plusieurs mois : exemple de la phase positive durant l'hiver 2007-2008 et de la phase négative durant l'hiver 2009-2010.

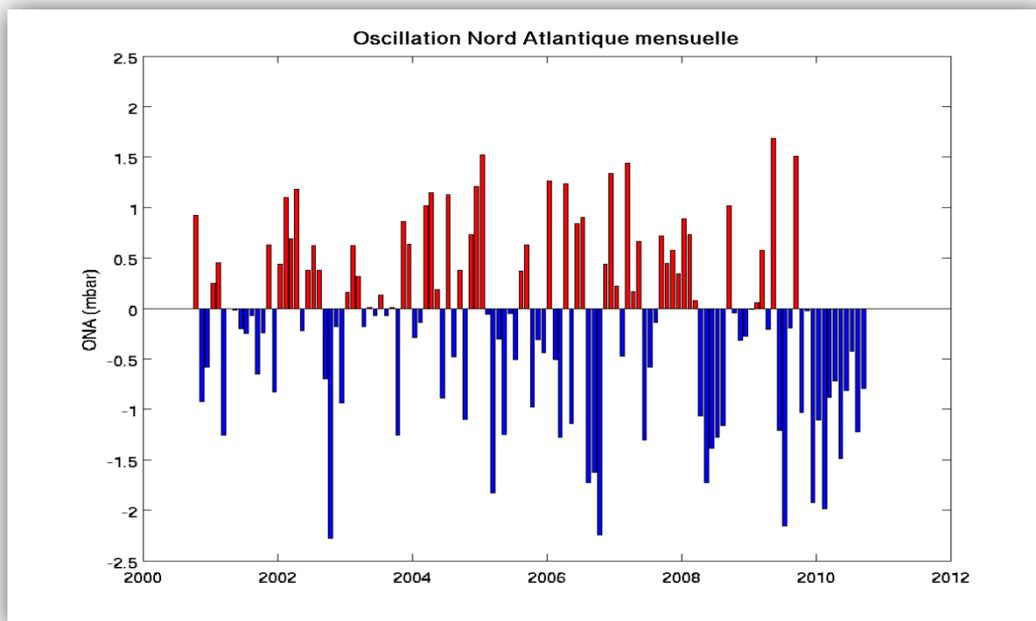


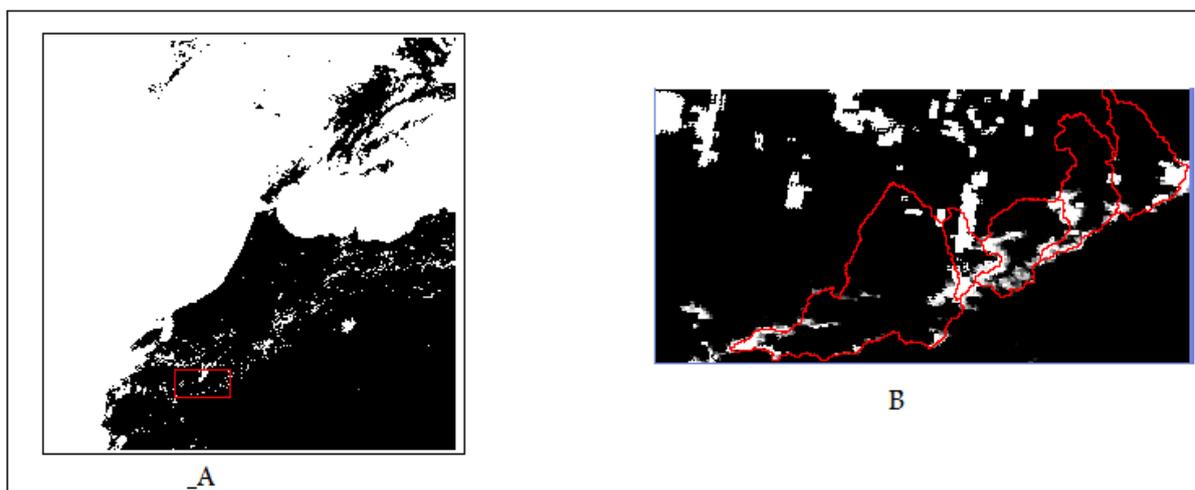
Figure 12 : Variation de l'Oscillation Nord Atlantique mensuelle pour la période 2000-2010

## I.7 Méthodologie

### I.7.1 Prétraitement des données :

On dispose pour cette étude d'une série d'images MODIS journalier (3895 images) MOD10A1 couvrant la période 2000-2010 téléchargées à partir du site de la NASA.

Les données sont disponibles par tuiles de 1200\*1200 km<sup>2</sup>. La tuile qui correspond au Haut Atlas Marocain est h17v05. Après le téléchargement des données **MODIS** journalières, les images sont géoréférencées dans la projection Lambert Nord Maroc et extraites sur notre région d'étude : la fenêtre « Tensift » (entre les latitudes 32° 10' et 30° 50' Nord et les longitudes 9° 25' et 7° 12' Ouest) (Figure 13). Après extractions, la taille de chaque image est (328 colonnes, 169 lignes).



**Figure 13: Exemple d'extraction et de reprojektion des produits enneigés MODIS journaliers (01/01/2001) : (A) image brutes ; (B) extraction sur la fenêtre d'étude (coordonnées) et délimitation des 5 sous-bassins versants**

La surface enneigée est ensuite calculée (1) par sous-bassin versant, (2) par tranche d'altitude et (3) globale sur tout le Haut Atlas.

#### **Extraction par bassin versant :**

La surface enneigée sur les dix sous bassins versants (N'fis, Ourika, Rheraya, Zat, R'dat, Seksawa, Anougal, Mhand, Wadaker, Assif el mahl) dont seulement les 5 les plus enneigés seront utilisés pour la comparaison avec le capteur VEGETATION est calculée. Pour cela, nous avons créé des régions d'intérêts avec MATLAB en utilisant les limites des dix sous bassins versants. Ces limites sont en format vectoriel (evf) et ont la même projection géographique que les images MODIS (le code d'extraction est en annexe 3).

Après nous avons appliqué un masque en affectant pour chaque bassin versant une valeur aux pixels qui le constituent. Le produit des pixels de l'image de surface avec ceux du masque permet d'éliminer les surfaces en dehors du sous bassin considéré, ce qui permet d'obtenir la surface neigeuse du sous bassin versant qui nous intéresse.

### **Extraction par tranche d'altitude :**

A partir des séries d'images MODIS du Haut Atlas de Marrakech, nous avons extrait la surface neigeuse au niveau de chaque tranche d'altitude à partir de 1100 mètres avec un pas de 400 mètres. Cela est fait en projetant le MNT à la même résolution que les images MODIS extraites sur la même fenêtre. Chaque pixel de surface calculée se superpose donc à un pixel d'altitude (MNT). A l'aide d'un programme écrit sous MATLAB, nous avons calculé la somme des surfaces neigeuses des pixels ayant les mêmes altitudes (code d'extraction en annexe 3).

### **Masque nuage**

Pour la comparaison des images MODIS journalières avec les images d'enneigement issues du capteur VEGETATION qui ont été déjà filtrées des nuages, il faut identifier les images communes et éliminer les images MODIS couvertes de nuages. Dans cet objectif, nous éliminons les images MODIS dont 20% de la surface des 10 sous-bassins versants de montagne du bassin du Tensift préalablement listés est identifiée comme nuage par l'algorithme MODIS.

## **I.7.2 Statistiques :**

### **I.7.2.1 Corrélation :**

Dans ce document, la corrélation a été utilisée dans le but de faire en premier lieu une comparaison entre les deux produits MODIS et VEGETATION, en deuxième lieu pour voir le lien entre la couverture neigeuse et le climat à grande échelle du Haut Atlas marocain.

Pour ce faire, une première approche consiste à calculer le coefficient de corrélation de ces variables. Le coefficient le plus utilisé est le coefficient de Pearson  $r_p$  :

$$r_p = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Équation 5

Avec  $N$ , le nombre d'observations,  $x_i$  la valeur de  $X$  pour l'observation au temps  $i$ ,  $\bar{x}$  la moyenne empirique des  $x_i$ ,  $y_i$  la valeur de  $Y$  pour l'observation au temps  $i$  et  $\bar{y}$  la moyenne empirique des  $y_i$ .

Plus le coefficient est proche des valeurs extrêmes -1 et 1, plus la corrélation entre les variables est forte ; on emploie simplement l'expression « fortement corrélées » pour qualifier les deux variables. Une corrélation égale à 0 signifie que les variables sont linéairement indépendantes.

### **I.7.2.1 RMSE :**

La RMSE c'est l'erreur-type. Elle est la racine carrée de MSE. C'est une estimation de l'erreur moyenne entre la donnée (MODIS) et une référence (VEGETATION)

$$\mathbf{RMSE}=\sqrt{\mathbf{MSE}} \qquad \mathbf{Équation\ 6}$$

$$\mathbf{RMSE}=\sqrt{\sum_{i=1}^n(x1, i - x2, i)^2/n} \qquad \mathbf{Équation\ 7}$$

Avec

$n$  : nombre de points communs entre MODIS et VEGETATION

## **Chapitre II : Evaluation des produits MODIS**

### **II.1 Introduction :**

Ce chapitre est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats obtenus concernant la comparaison des deux produits neiges satellitaires MODIS et VEGETATION dans le but de faire une évaluation du produit MODIS qui va être utilisé pour (1) caractériser la variabilité spatio-temporelle de l'enneigement sur le Haut Atlas et (2) déterminer la relation entre cette variabilité et la dynamique atmosphérique et océanique dans le chapitre III.

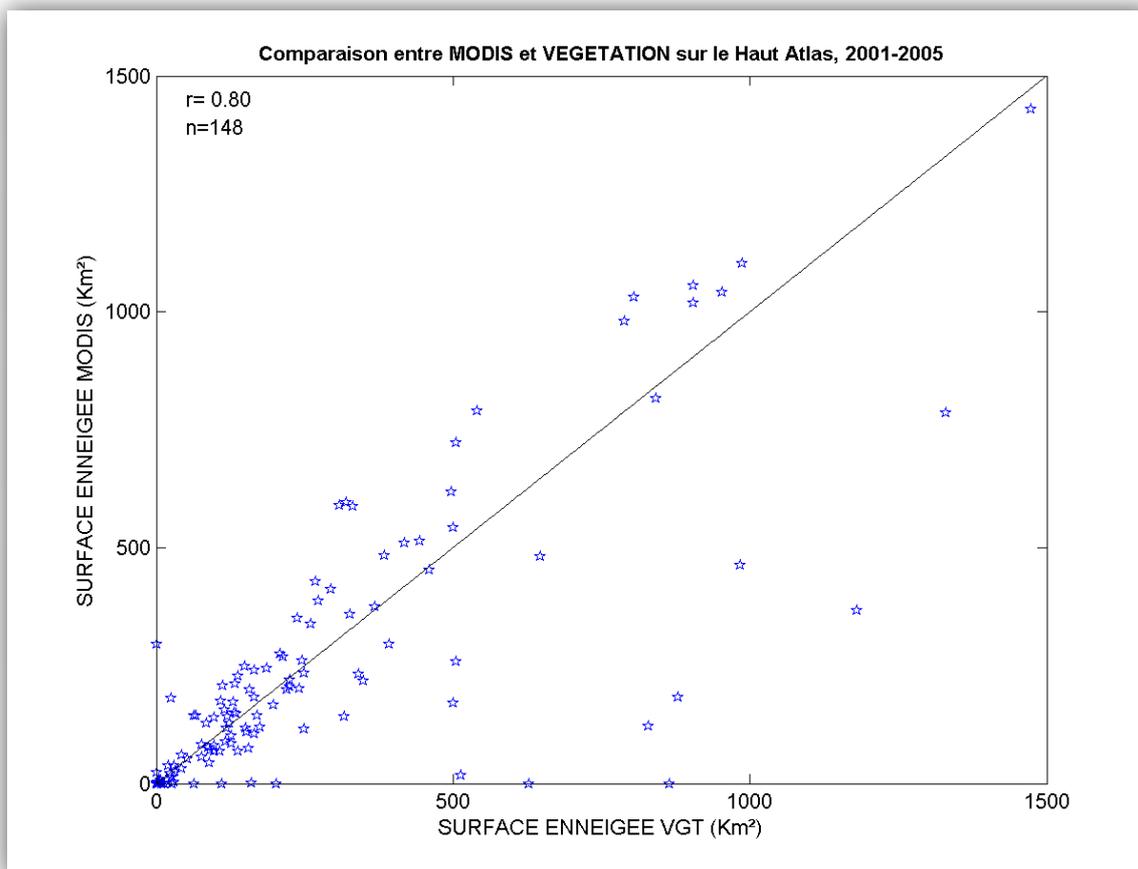
La comparaison entre les deux jeux de données MODIS et VEGETATION est faite sur la période 2001-2005, pendant lesquelles les produits sont disponibles. Cette comparaison concerne les résultats de cartographie des surfaces neigeuses obtenues par les deux instruments sur les cinq principaux bassins actifs : le Nfis, la Rheraya, l'Ourika, le R'Dat et le Zat et sur l'ensemble de ces 5 sous-bassins versants qui couvrent l'essentiel du Haut Atlas.

### **II.2 Comparaison à l'échelle du Haut Atlas :**

En premier lieu la relation globale sur toute la période étudiée entre les surfaces issues des deux capteurs à l'échelle du Haut Atlas de Marrakech est analysée.

Pour faire cette comparaison, les dates communes entre les deux instruments sont déterminées. En effet, bien que les deux instruments fournissent des images journalières du Haut Atlas, nous devons sélectionner les images sans nuages (voir méthodologie d'estimation de la surface enneigée plus haut). Ce travail a déjà été effectué pour les produits VEGETATION. Nous automatisons le même travail pour les produits MODIS en considérant que l'image n'est pas nuageuse si moins de 20 % de la surface totale des 5 sous-bassins versants étudiés est identifiée comme nuageuse. Au final, nous avons 148 dates communes qui correspondent au nombre de points sur la figure 14.

La figure 14 montre la relation globale sur toute la période étudiée entre les surfaces enneigées en km<sup>2</sup> issues des deux capteurs à l'échelle des 5 sous-bassins versants du Haut Atlas marocain. L'accord entre les deux produits est globalement satisfaisant avec un coefficient de corrélation  $r=0.8$ .



**Figure 14: Corrélation entre les surfaces enneigées issues des images VEGETATION et MODIS dans le Haut Atlas durant la période (2001-2005)**

Néanmoins, plusieurs points semblent s'écarter de la diagonale. Ces points majoritairement situés sous cette diagonale correspondent à une forte sous-estimation des surfaces enneigées par les produits MODIS, nous avons identifié les dates correspondantes dans le but de les visualiser : **03/01/2001 ; 20/01/2001 ; 02/05/2001 ; 23/05/2001 ; 07/12/2001 ; 08/01/2002 ; 23/02/2002 ; 16/01/2003 ; 01/03/2004 ; 10/03/2005.**

Afin de tenter d'expliquer les différences d'estimation de la surface enneigée par les deux produits, nous avons tracé sur la figure 15 les images identifiées ci-dessus.

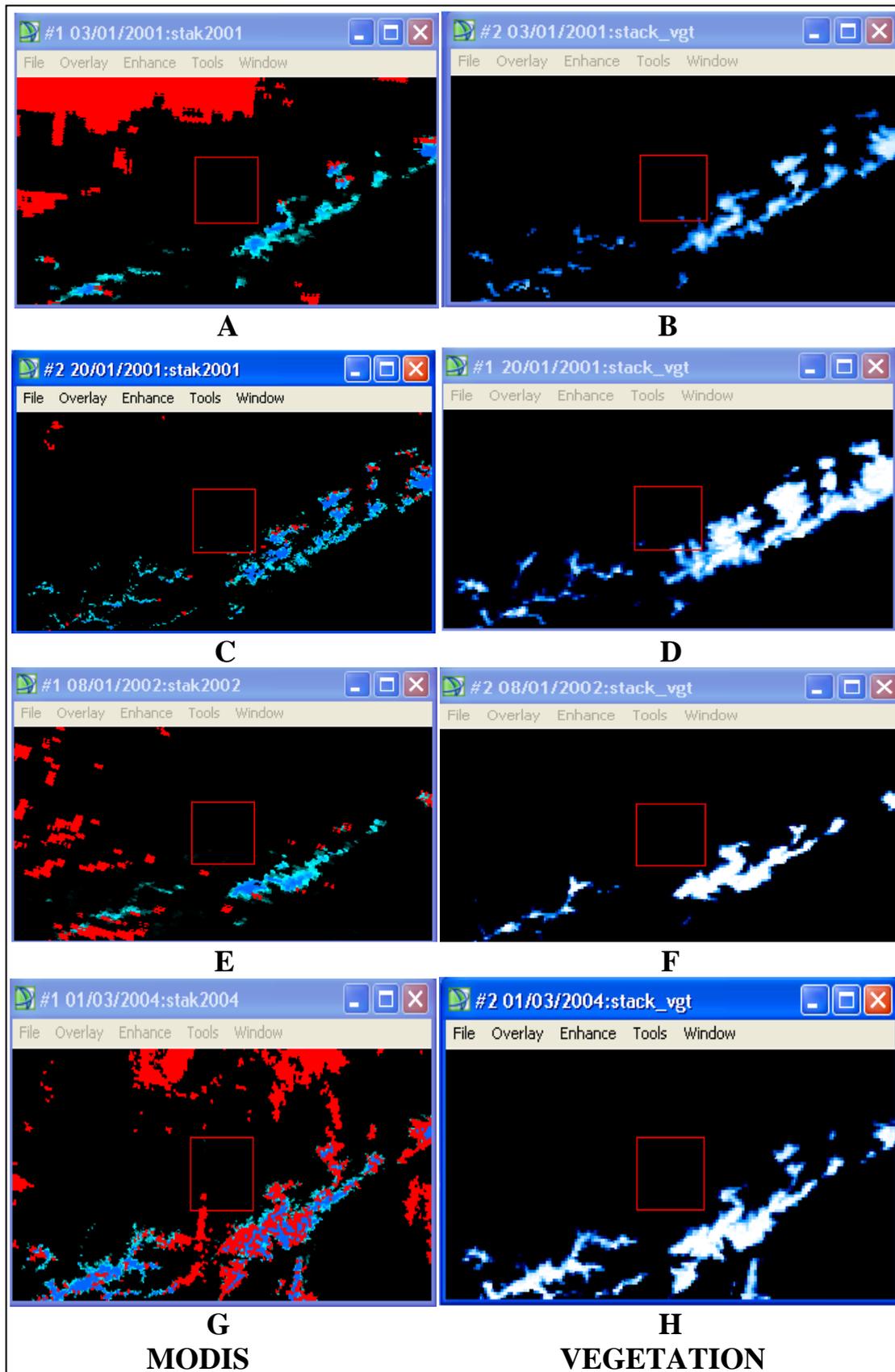
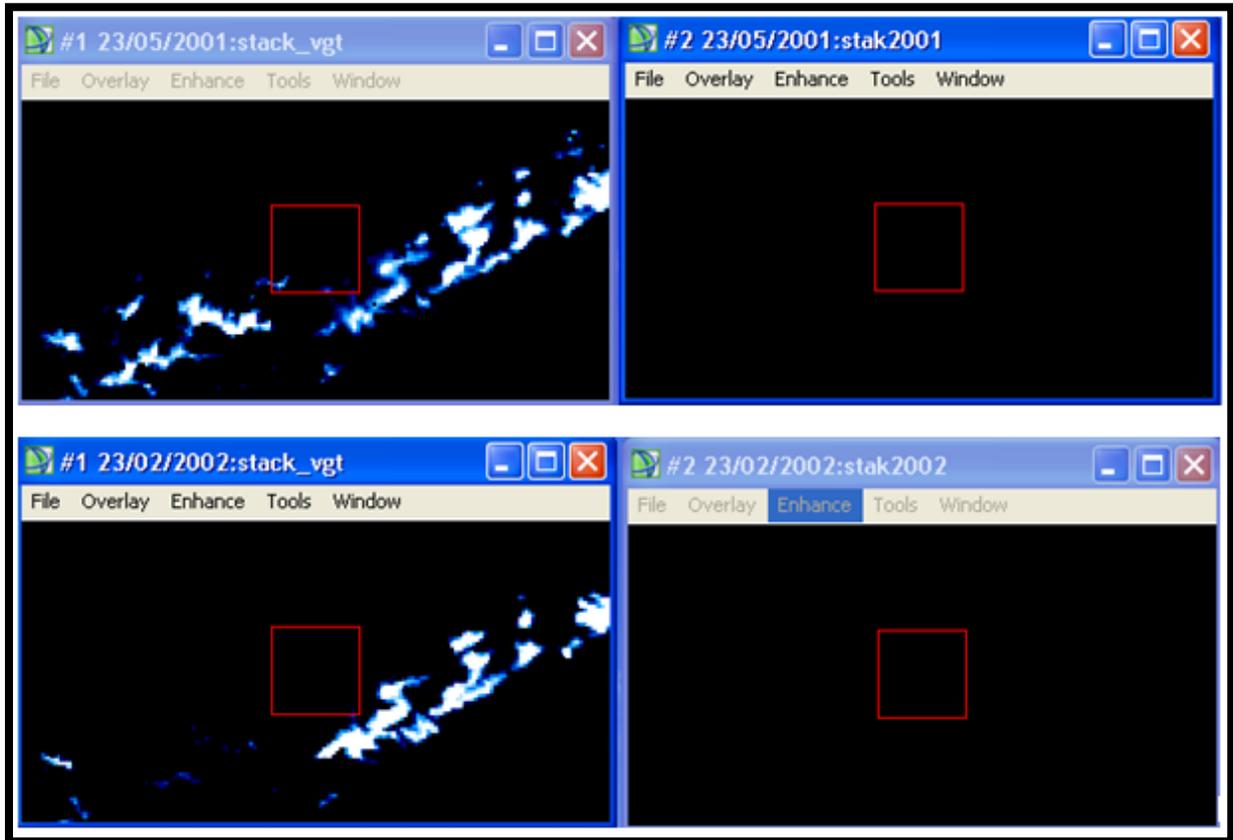


Figure 15 : Exemples d'images qui présentent une différence de surface enneigée entre MODIS (à gauche) et VEGETATION (à droite)

La figure 16 présente un autre exemple de différence de surface enneigée entre MODIS et VEGETATION, on remarque que la surface enneigée estimée par MODIS est égale à zéro, alors que VEGETATION présente une surface enneigée importante.



**Figure 16: Exemple de Différence entre VEGETATION (à gauche) et MODIS (à droite)**

L'analyse de ces images montre la présence de deux types de différence entre les deux capteurs :

- ✓ Une différence d'estimation de surface enneigée entre MODIS et VEGETATION remarquée clairement sur l'exemple (C, 20/01/2001 MODIS) et (D, 20/01/2001 VEGETATION). Cette différence peut être due aux différences des deux indices utilisés MNDSI pour MODIS et MSI pour VEGETATION.
  
- ✓ Un problème qui semble lié au nuage des produits MODIS (les exemples A 03/01/2001, E 08/01/2002 et G 01/03/2004, MODIS), c'est le cas aussi pour les images du 02/05/2001, 07/12/2001, 10/03/2005 et 16/01/2003. Ces pixels (en rouge sur

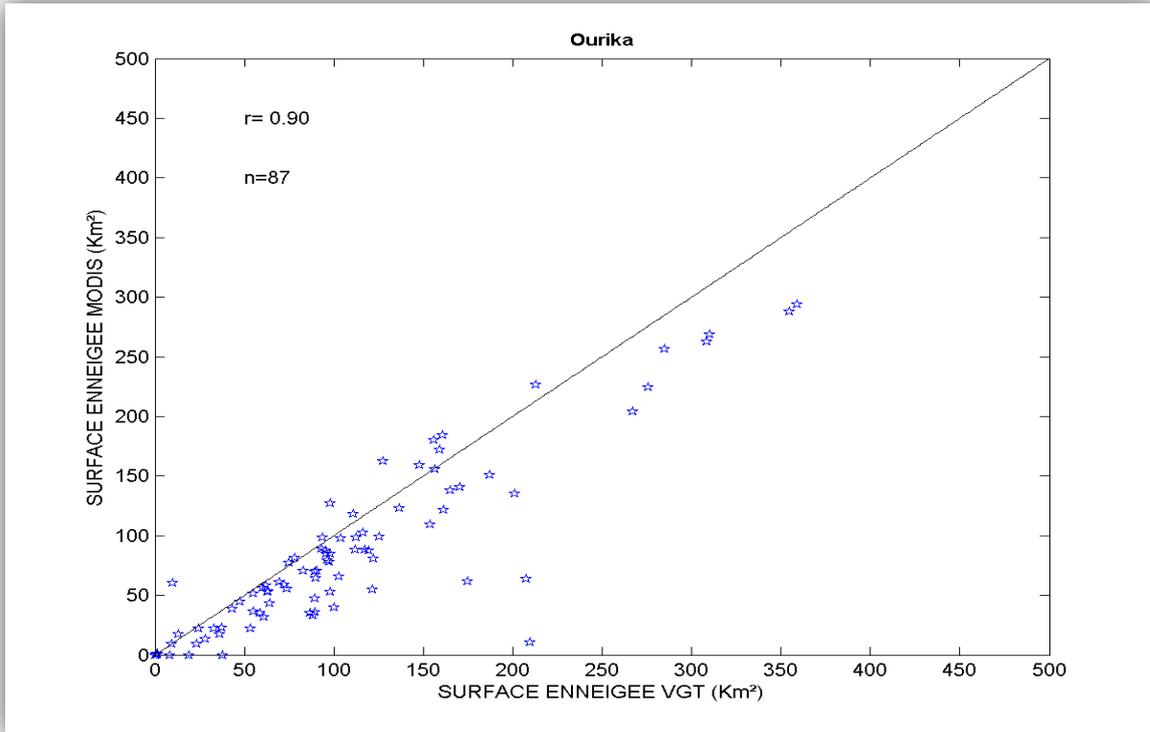
les images) sont identifiés comme nuage par l'algorithme MODIS alors qu'il est très probable qu'il s'agisse de neige compte tenu de leur altitude et du fait que les pixels avoisinants sont enneigés (voir notamment le MNT figure 7). En effet, les nuages ont une signature spectrale voisine de la neige dans le domaine Visible (Konig, et al. 2001a), ce qui complique leur identification. Cette mauvaise classification entraîne une sous estimation de surface enneigée.

Le seuil de NDSI=0.4 utilisé pour déclarer qu'un pixel est enneigée est peut-être un peu élevé pour notre région et peut éliminer certaines régions enneigées. Il est important de rappeler que la méthodologie développée pour estimer les surfaces neigeuses à partir du capteur VEGETATION a été spécifiquement développée pour le Haut Atlas marocain alors que l'estimation des surfaces enneigées à partir du capteur MODIS repose sur une méthodologie générique appliquée à l'échelle du globe.

Par ailleurs, la différence de résolution entre VEGETATION (1 km) et MODIS (0.5 km) peut engendrer une surestimation des surfaces par VEGETATION.

### **II 3 Comparaison par bassin versant :**

Ensuite nous avons comparé les surfaces enneigées au niveau des sous bassins versants. A titre illustratif, la figure 17 montre la corrélation entre les surfaces d'enneigements issus des images VEGETATION et MODIS dans le bassin d'Ourika durant la période (2001-2005). Les comparaisons sur les autres sous-bassins versants sont rapportées dans l'annexe 2.



**Figure 17: Exemple de corrélation entre les surfaces d'enneigement issues des images VEGETATION et MODIS dans le bassin d'Ourika durant la période 2001-2005**

Sur ce bassin, les surfaces enneigées MODIS sont légèrement plus faible que celles dérivés des données du capteur VEGETATION. Cela peut être attribué à la différence de résolution entre les deux capteurs. En effet, la résolution kilométrique du capteur VEGETATION pourrait entrainer une surestimation des surfaces enneigées par rapport à MODIS dont la résolution est de 500m. De manière générale, les résultats sont très similaires sur l'ensemble des 5 sous-bassins étudiés. La comparaison entre les deux produits présente un bon accord global exception faite de quelques dates (voir plus haut) qui s'écartent de la diagonale et qui correspondent à une sous-estimation des surfaces enneigées par les produits MODIS.

Le tableau 7 présente des statistiques calculées entre les surfaces de neige MODIS et VEGETATION pour chaque bassin étudié et le nombre de points en commun.

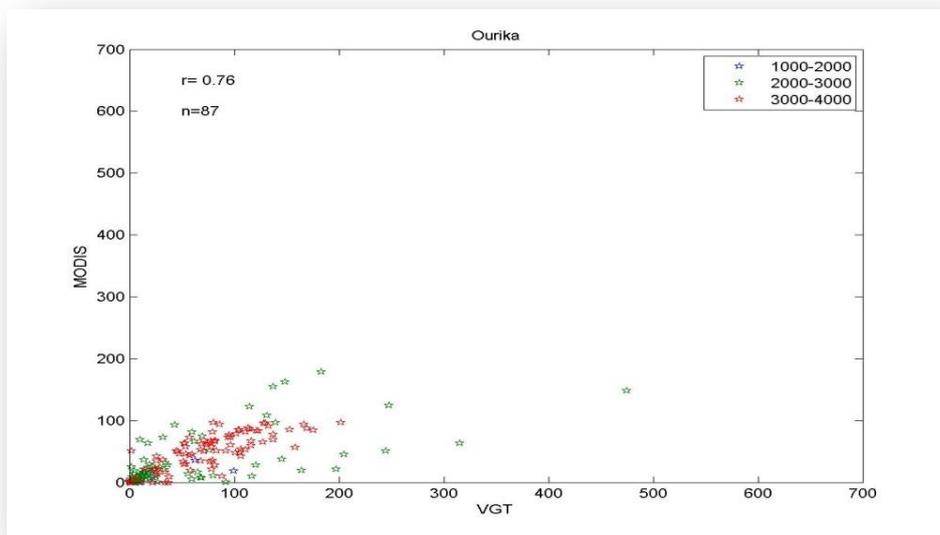
Bassin versant	Nombre de points commun	Corrélation (r)	RMSE(Km <sup>2</sup> )	Ecart absolue relatif (%)	Biais (Km <sup>2</sup> )
N'fis	85	0.84	69.60	48.8	-23.36
Ourika	87	0.90	41.12	34.3	-22.40
Rdat	82	0.93	19.88	56.8	-8.68
Rherhaya	87	0.81	15.82	32.2	-7.62
Zat	81	0.90	24.28	75.1	-11.99

**Tableau 7: Sommaire des statistiques calculées entre les surfaces de neige MODIS et VEGETATION pour l'ensemble des bassins étudiés**

A partir de ce tableau on constate que les deux produits sont bien corrélés sur les cinq sous bassins étudiés, avec des coefficients de corrélation qui dépassent 0.80. Les valeurs de RMSE sont relativement faibles en comparaison de la surface des bassins versants. Les valeurs d'écart absolus sont relativement importantes mais ces valeurs sont principalement dues aux faibles valeurs de surface enneigée en début et en fin de saison qui entraine des écarts importants en relatif. Enfin, les biais soulignent la sous-estimation des surfaces enneigées par MODIS par rapport à VEGETATION déjà soulignée plus haut.

#### II.4 Comparaison par tranche d'altitude :

Pour visualiser de plus la corrélation entre les deux instruments nous avons comparé les surfaces enneigées extraites par tranche d'altitude. La figure 18 montre cette corrélation.



**Figure 18: Corrélation entre les surfaces d'enneigement issues des images VEGETATION et MODIS par tranche d'altitude pour le bassin d'Ourika durant la période 2001-2005**

La figure 18 montre un exemple de corrélation entre les surfaces enneigées issues des deux capteurs MODIS et VEGETATION par tranche d'altitude pour le bassin d'Ourika, cette figure présente aussi une bonne corrélation entre les deux produits, mais il y a des points qui s'écartent de la diagonale. La plupart de ces points ont des altitudes entre 2000m et 3000m.

## **II.5 Comparaison avec les données de la station de l'Oukaimeden :**

La figure 19 montre la série temporelle d'enneigement du capteur MODIS (% de pixel enneigé) et l'équivalent en eau de la neige mesuré à la station de l'Oukaimeden. Il y a une certaine similarité entre les observations de terrain à l'Oukaimeden et les estimations de surface enneigée MODIS. Les premiers événements neigeux de la mi-décembre sont en particulier correctement détectés par le produit MODIS. Il semblerait par ailleurs que chaque nouvel événement en cours de saison détecté par les mesures in situ soit accompagné d'une augmentation de la surface enneigée MODIS. Néanmoins, certaines dates présentent des comportements aberrants. C'est notamment le cas de la brutale chute de surface enneigée MODIS à la mi-janvier alors que le pixel correspondant à la station de l'Oukaimeden affichait une couverture par la neige totale sur les 10 jours précédents. Une fonte aussi rapide est très improbable et cette valeur nulle d'enneigement MODIS à la mi-janvier est certainement à relier au problème d'image présentant une couverture neigeuse nulle sur l'ensemble du Haut Atlas comme souligné à la figure 14. Ces valeurs nulles d'enneigement improbable pourraient très certainement être filtrées en comparant chaque valeur à ses deux valeurs encadrantes temporellement. Enfin, il est également important de souligner que la précision de localisation des images satellites n'est pas parfaite. Nous avons donc procédé à l'extraction des séries temporelles d'enneigement sur les 9 pixels avoisinant la station de l'Oukaimeden. La figure 20 présente la série temporelle d'enneigement MODIS correspondant à la moyenne de ces 9 séries temporelles, elle présente aussi une similarité entre les observations de terrain à l'Oukaimeden et les estimations de surface enneigée MODIS. Chaque nouvel événement neigeux détecté par les mesures in situ est accompagné par une augmentation de la surface enneigée MODIS sauf l'événement de la mi-décembre où MODIS n'a enregistré aucun enneigement.

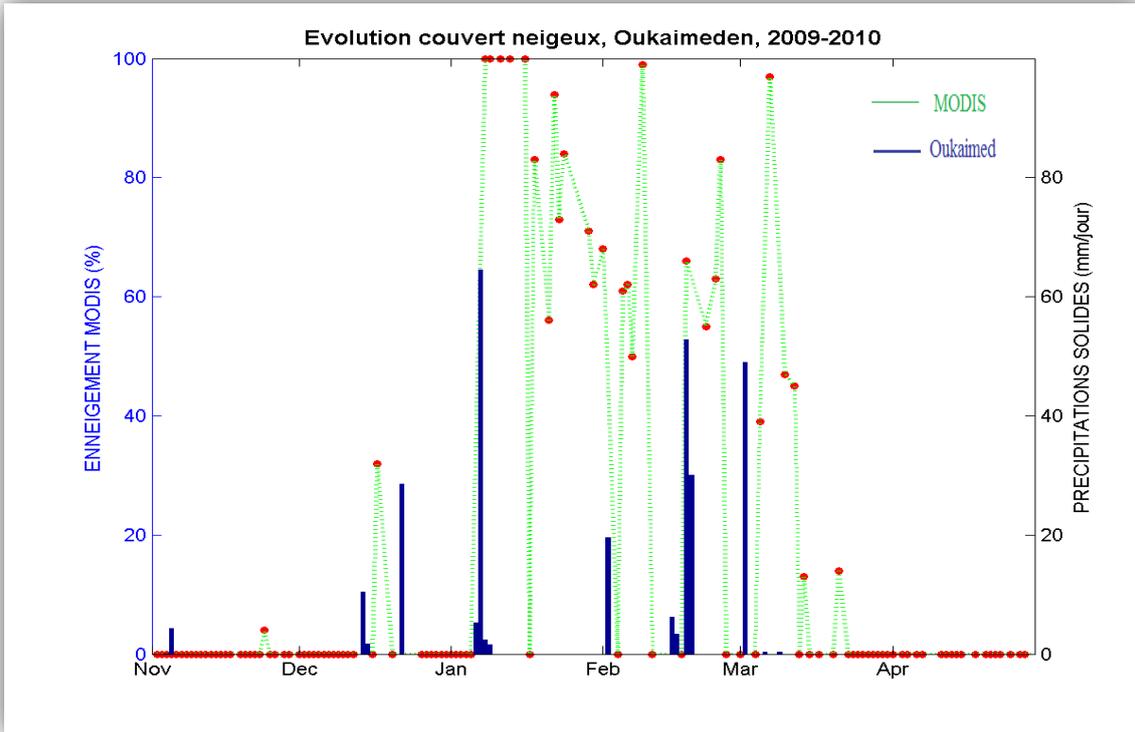


Figure 19 : Comparaison entre la série temporelle d'enneigement MODIS (%) d'enneigement du pixel de la station de l'Oukaimeden et l'équivalent en eau journaliers des précipitations solides mesurées à la station d'Oukaimeden pour la saison 2009-2010

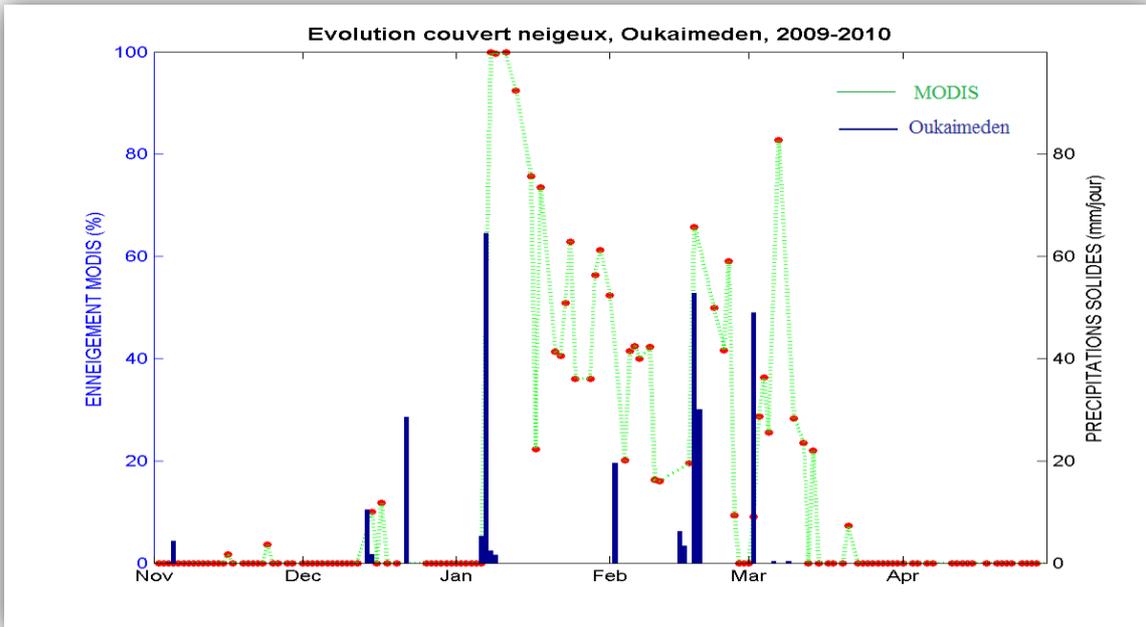


Figure 20 : Comparaison entre la série temporelle d'enneigement MODIS (%) d'enneigement moyen des 9 pixels autour de la station de l'Oukaimeden et l'équivalent en eau journaliers des précipitations solides mesuré à la station d'Oukaimeden pour la saison 2009-2010

De manière générale et en conclusion de cette partie, les résultats de la cartographie des surfaces des neiges issues des deux capteurs VEGETATION et MODIS sont assez comparables mais à part sur quelques images erronées qui ont été identifiées. Ces produits MODIS d'enneigement seront donc utilisés dans la dernière partie du travail pour (1) caractériser la variabilité spatio-temporelle de l'enneigement sur le Haut Atlas de Marrakech et (2) étudier la relation entre l'enneigement et le climat à grande échelle.

## **Chapitre III : Caractérisation de la variabilité de la surface neigeuse et lien avec le climat**

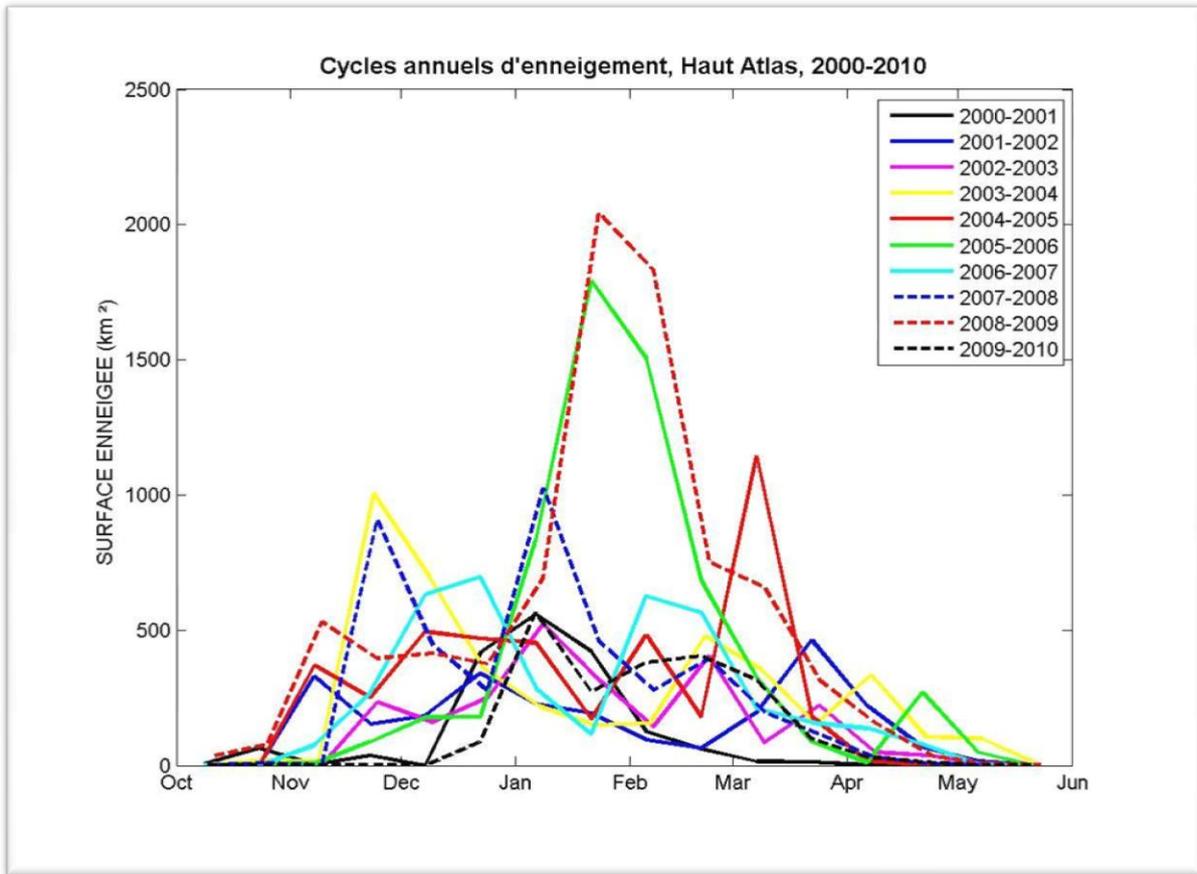
Ce chapitre est divisé en deux parties, la première est consacrée à l'analyse des résultats obtenus concernant la variabilité de la surface neigeuse sur le Haut Atlas, par tranche d'altitude et en fonction des sous bassins versants. La deuxième partie concerne l'étude du lien entre les surfaces neigeuses et le climat à grande échelle.

### **III.1 Caractérisation de la variabilité interannuelle de la surface neigeuse :**

#### **III.1.1 Variabilité interannuelle de l'enneigement sur le Haut Atlas :**

Les Figures 21 et 22 présentent le cycle annuel de la surface neigeuse sur le Haut Atlas pour les années hydrologiques (Octobre à Mai) 2000-2001 à 2009-2010. Ces figures permettent de mettre en évidence une forte variabilité intra-saisonnière et interannuelle des couverts neigeux liés à la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations solides. Les dates de premières neiges (qui sont analysées plus bas ; voir figure 23) s'étalent des mois de Novembre à Janvier et présente une forte variabilité d'une année sur l'autre avec des années très précoces (saison 2004-2005) et d'autres bien plus tardives (saison 2001-2002).

Pour les saisons 2000-2001 et 2009-2010 la chute de la neige n'a commencée qu'à partir du mois de décembre et elle a presque totalement fondu au mois de mai. Pour la saison 2001-2002, on note la présence de trois événements neigeux majeurs, la couverture neigeuse maximale est estimée à 1791 km<sup>2</sup>, enregistrée le 7/03/2002. La saison 2002-2003 a connue quatre principaux événements neigeux avec une surface maximale de 1266 km<sup>2</sup> enregistrée le 11/01/2003. Pour la saison 2003-2004 on remarque qu'il y a trois épisodes neigeux avec une surface maximale enregistrée à la fin du mois de novembre (1712 km<sup>2</sup>). En 2004-2005 on note qu'il y a quatre périodes de chute de la neige. À la différence des autres saisons on note un épisode neigeux au mois de mars marquée par une surface totale importante. Les saisons 2008-2009 et 2005-2006 ont connue un enneigement très important avec des surfaces neigeuses proche de 3000 km. La saison 2006-2007 a connu seulement deux événements neigeuse un vers la fin du moi de décembre et l'autre au début du mois de février. Selon ces interprétations, on conclut que les saisons 2005-2006 et 2008-2009 présentent les surfaces enneigées les plus importantes, alors que les saisons 2000-2001 et 2002-2003 sont les moins enneigées.



**Figure 21: Cycles annuels d'enneigement (moyen de 15 jours) sur le Haut Atlas pour la période estimés 2000-2010**

Par ailleurs, afin d'étudier le lien avec la dynamique atmosphérique et océanique à grande échelle, nous résumons sur le tableau 8 une série d'indicateurs de la saison neigeuse (Octobre à Mai) sur le Haut Atlas : Surface enneigée maximale, Sommes des surfaces enneigées totale, date des premières neiges. La surface enneigée maximale varie de 1266 km<sup>2</sup> pour la saison 2002-2003 à plus de 3100 km<sup>2</sup> pour la saison 2008-2009. Les dates de premières neiges moyennes sur le Haut Atlas de Marrakech s'étalent sur 1 mois et demi, les plus précoces étant autour du 20 novembre. Néanmoins, la variabilité spatiale de l'enneigement sur le Haut Atlas est très importante (figure 24).

Les Saisons	La surface maximale (Km <sup>2</sup> )	La somme des surfaces (Km <sup>2</sup> )	Date de première neige	Date de surface maximale
2000-2001	1423.43	21318.46	13/12/2000	7/01/2001
2001-2002	1791.08	25515.85	29/12/2001	7/03/2002
2002-2003	1266.81	28731.89	21/12/2002	11/01/2003
2003-2004	1712.77	43645.63	23/11/2003	26/11/2003
2004-2005	1841.08	43329.59	24/11/2004	13/11/2004
2005-2006	2883.92	57375.06	27/12/2005	18/01/2006
2006-2007	2562.21	49240.66	04/12/2006	12/12/2006
2007-2008	2330.60	50945.53	26/11/2007	25/11/2007
2008-2009	3103.45	83437.19	07/12/2008	22/01/2009
2009-2010	2318.15	23018.29	07/01/2010	09/01/2010

Tableau 8: Caractéristiques de l'enneigement dans le Haut Atlas de Marrakech estimés à partir des données MODIS pendant la période 2000-2010

Enfin, la figure 22 présente l'évolution des sommes de surfaces enneigées sur l'ensemble du Haut Atlas pour notre période d'étude. Nous pouvons également constater la forte variabilité de ces grandeurs et la large gamme couverte avec des valeurs à peine supérieures à 20000 km<sup>2</sup> pour l'année 2000-2001 et plus du quadruple pour la saison 2008-2009, qui comme pour la surface maximale présente la valeur la plus élevée pour la somme des surfaces.

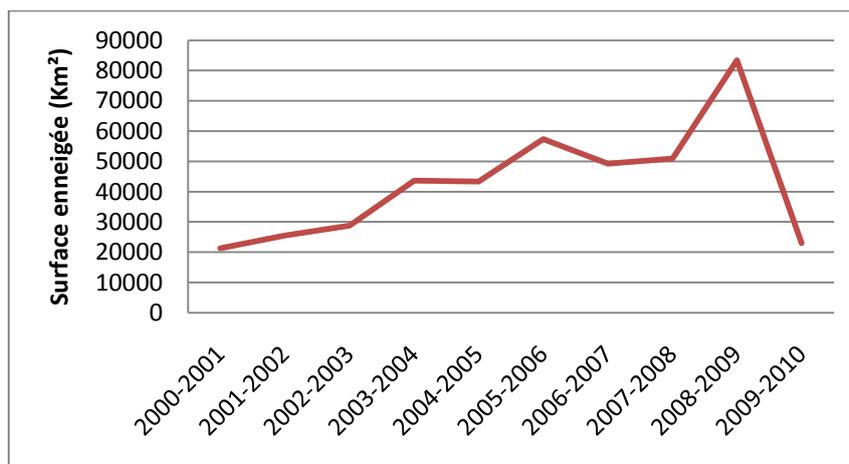
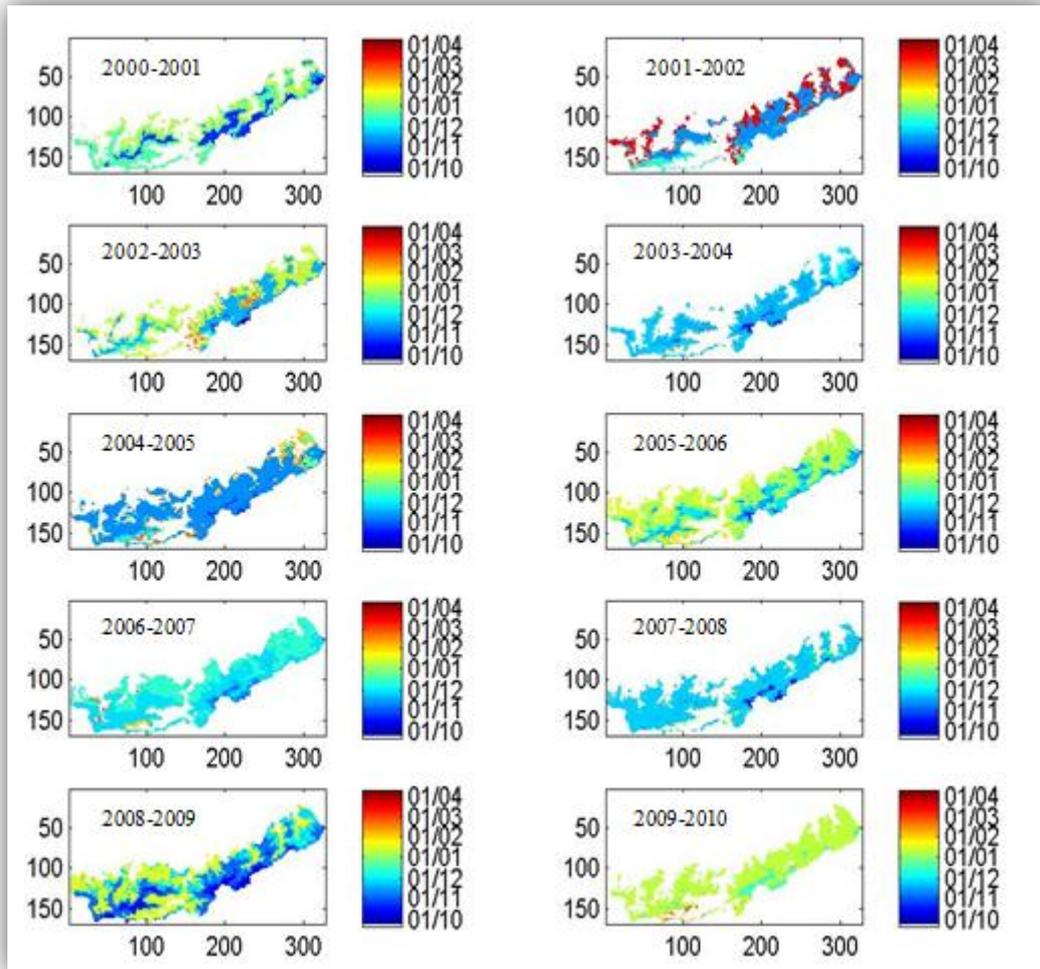


Figure 22: Variation de la somme d'enneigement sur le Haut Atlas pour la période 2000-2010



**Figure 23: Carte des dates de première neige pour les différentes années hydrologiques étudiées**

La figure 23 montre une distribution spatiale cohérente des dates d'enneigements avec les premières neiges atteignant le Haut Atlas sur les hauteurs (voir MNT figure7) alors que sur les zones de piémonts, les premières neiges sont plus tardives. Néanmoins, plusieurs différences sont clairement visibles. En effet, les saisons 2003-2004, 2004-2005, 2006-2007, 2007-2008 et 2008-2009 ont connu des dates de premières neiges précoces. La saison 2008-2009 se distingue encore ici avec des dates extrêmement précoces sur les hauteurs mais plus tardives en piémonts alors que la distribution spatiale sur les autres saisons précitées est plus homogène. La saison 2009-2010 a connu des dates de premières neiges tardives sur l'ensemble du Haut Atlas.

La figure 24 présente l'enneigement moyen sur tout le Haut Atlas pour l'ensemble des saisons étudiées. Cette figure montre la forte variabilité spatiale de l'enneigement sur le Haut Atlas. De manière générale, les zones les plus enneigées se situent sur les altitudes les plus hautes (voir MNT figure 7). Ici encore, nous constatons une forte variabilité interannuelle de l'enneigement entre des années exceptionnelles comme l'année 2008-2009 et 2005-2006 et d'autres la couverture neigeuse est beaucoup moins présente 2000-2001 et 2009-2010. Il est notamment intéressant de noter que les années 2008-2009 et 2009-2010 ont été caractérisées par des pluies exceptionnelles sur tout le Maroc. Ces deux années sont pourtant très contrastés en termes d'enneigement. L'année 2009-2010 présente une couverture neigeuse très faible et des premières neiges très tardives (figure 23) alors que l'année 2008-2009 présente la surface enneigée la plus importante de la décennie et des premières neiges très précoces (Figure 24). La dernière partie du travail est consacrée à l'analyse des déterminants atmosphériques et océaniques qui gouvernent ces différences de comportement.

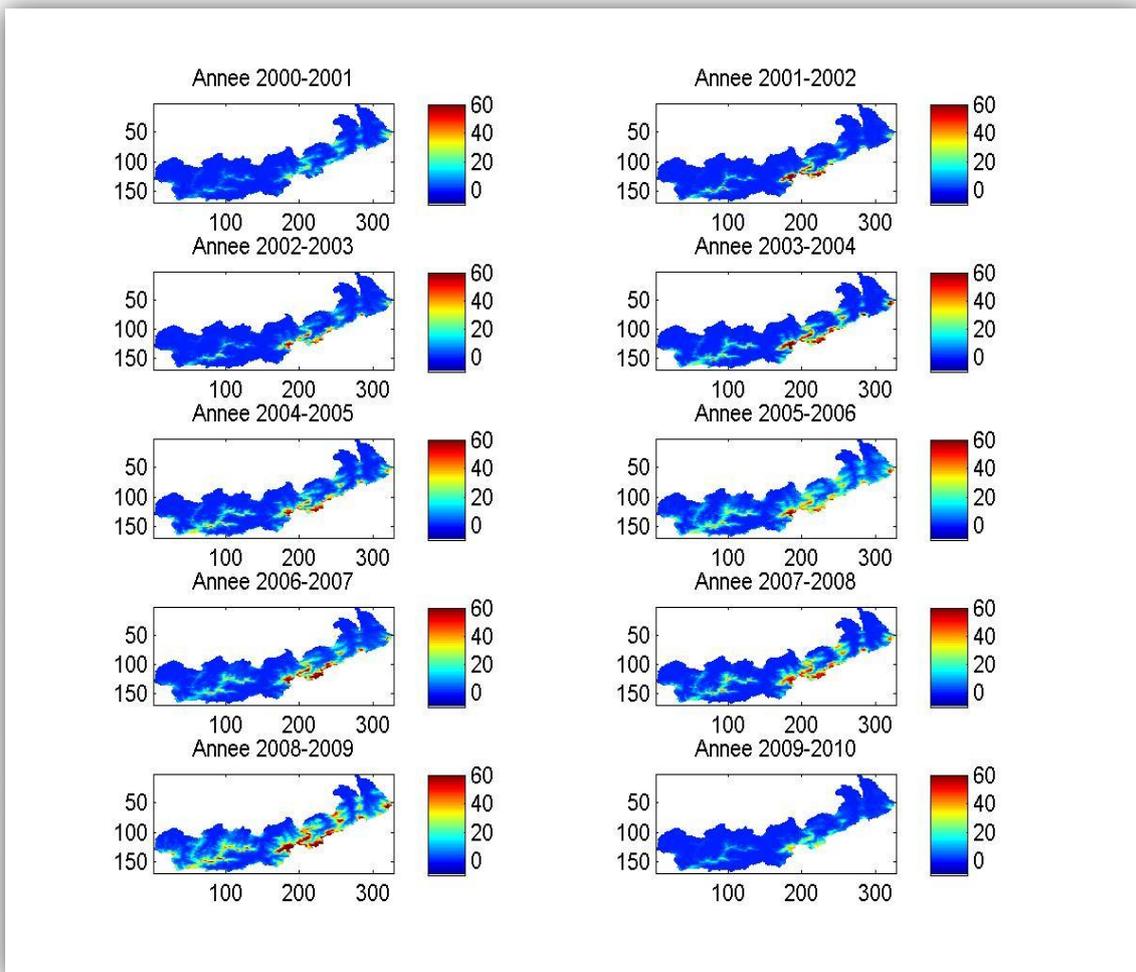


Figure 24 : L'enneigement moyen sur le Haut Atlas

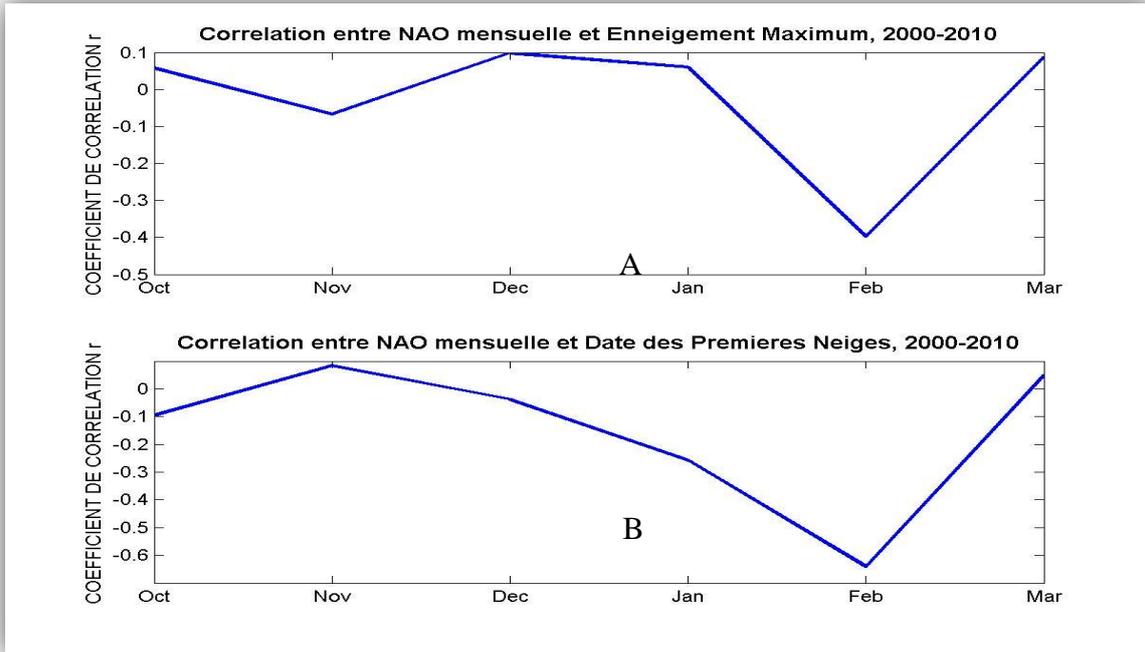
### **III.2 Lien entre le climat à grande échelle et la variabilité du couvert enneigé sur le Haut Atlas de marrakech:**

Afin d'estimer le degré d'influence du climat sur l'enneigement dans le Haut Atlas, les surfaces d'enneigement sont corrélées à l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) et aux champs spatio-temporels de température de surface des océans

#### **III.2.1 Comparaison entre la surface de la neige et NAO :**

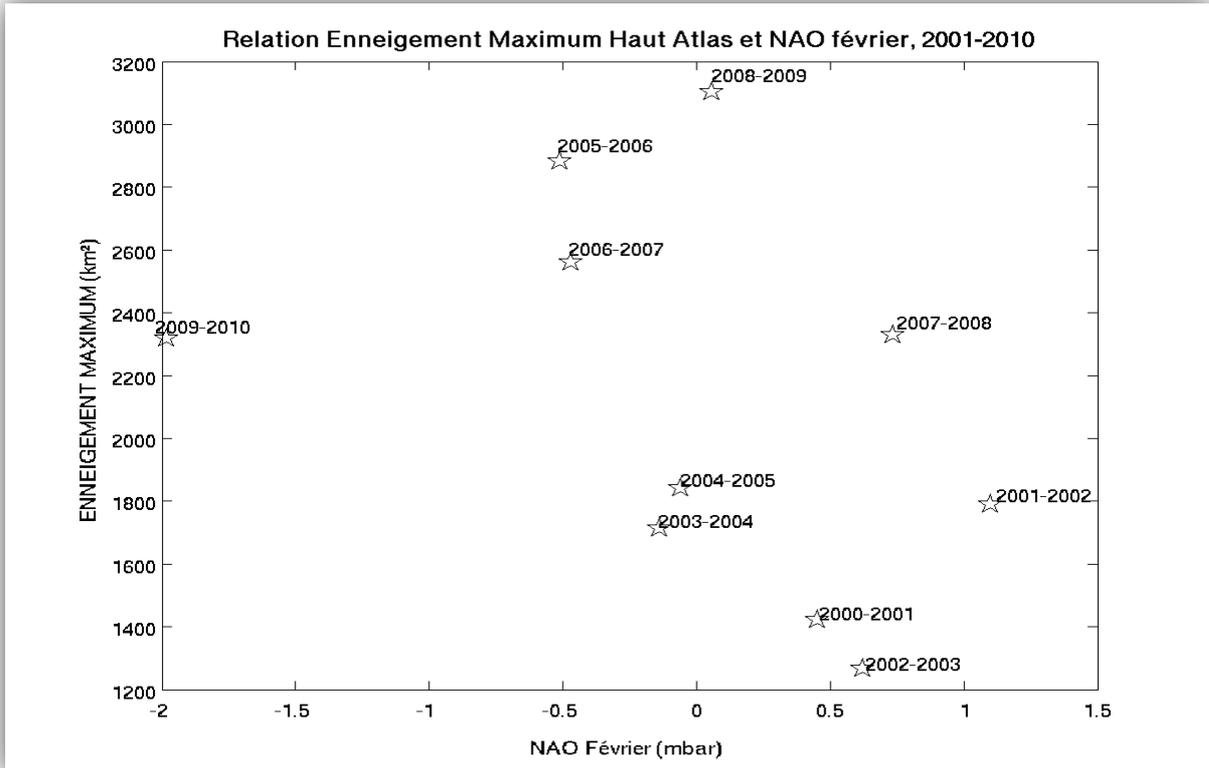
La figure (25.A) présente la corrélation entre la NAO mensuelle d'Octobre à Mars et l'enneigement maximum déterminé à partir des produits d'enneigement MODIS pour la période 2000-2010. La valeur du coefficient de corrélation la plus élevée est trouvée entre la surface d'enneigement maximum et la NAO de Février ( $r=-0.41$ ). Cette valeur ne passe pas le test de significativité (test de student à 90%) étant donné la longueur de la série (10 ans avec un point par an). Néanmoins, le signe de cette corrélation est cohérent dans la mesure où il a 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. En d'autres termes, durant les phases négatives (positives) de la NAO, l'enneigement maximum enregistré par MODIS a tendance à présenter des anomalies positives (négatives). Enfin, le mois de février est situé au cœur de l'hiver, période où l'enneigement est très important. Bien qu'il existe un décalage de quelques mois entre les dates d'enneigement maximum enregistrés et le mois de février, la persistance de l'effet de la NAO sur 1 ou 2 mois (Marshall et al., 2001) peut expliquer ce maximum de corrélation en février. Enfin, outre les précipitations, la température joue également un rôle important sur la dynamique de l'enneigement, de l'évènement neigeux jusqu'à la fonte (voir paragraphe suivant).

La figure (25.B) montre la corrélation entre NAO mensuelle et les dates des premières neiges pour la période 2000-2010. Les dates de premières neiges semblent également anti-corrélées avec la NAO de Février. L'interprétation est plus délicate. En effet, les dates de premières neiges sont situées entre la fin novembre et début janvier. L'effet de la NAO ne peut persister que sur 2 mois au maximum. Ce maximum de corrélation obtenu en Février est donc très étonnant. Néanmoins, cette étude préliminaire est à considérer avec précaution dans la mesure où nous ne disposons que de 10 années de données.



**Figure 25: Corrélation entre NAO mensuelle et données d'enneigement , enneigement maximum(A) et dates des premières neige(B) pour la période 2000-2010**

La figure 26 montre la relation entre l'enneigement maximum et la NAO de Février qui a montré la plus forte corrélation. De manière générale, nous constatons que la majorité des années étudiées sont plutôt caractérisées par des phases positives ou neutres de la NAO en Février. Cette figure permet également de mettre en évidence une série d'années au début des années 2000 caractérisées par un faible enneigement. Ces années (de 2000 à 2003) durant lesquelles le Maroc a connu une sécheresse persistante sont caractérisées par des valeurs significativement positives de la NAO. Inversement, les saisons 2005-2006 et 2006-2007 présentent des valeurs négatives de la NAO et sont logiquement associées à des anomalies positives d'enneigement. Les années 2003-2004, 2004-2005 et 2008-2009 présentent des valeurs neutres et un comportement en termes d'enneigement très contrastés. Enfin, les années 2007-2008 et 2009-2010 ne semblent pas être influencées par la NAO. En effet, ces deux années sont caractérisés par des enneigements maximums similaires (2330 km<sup>2</sup> et 2318 km<sup>2</sup>) et des valeurs de NAO opposées (0.57mbar et -1, 11mbar). Pour information, le retrait de l'année 2009-2010 qui est particulièrement atypique ramène le coefficient de corrélation r à -0.55.

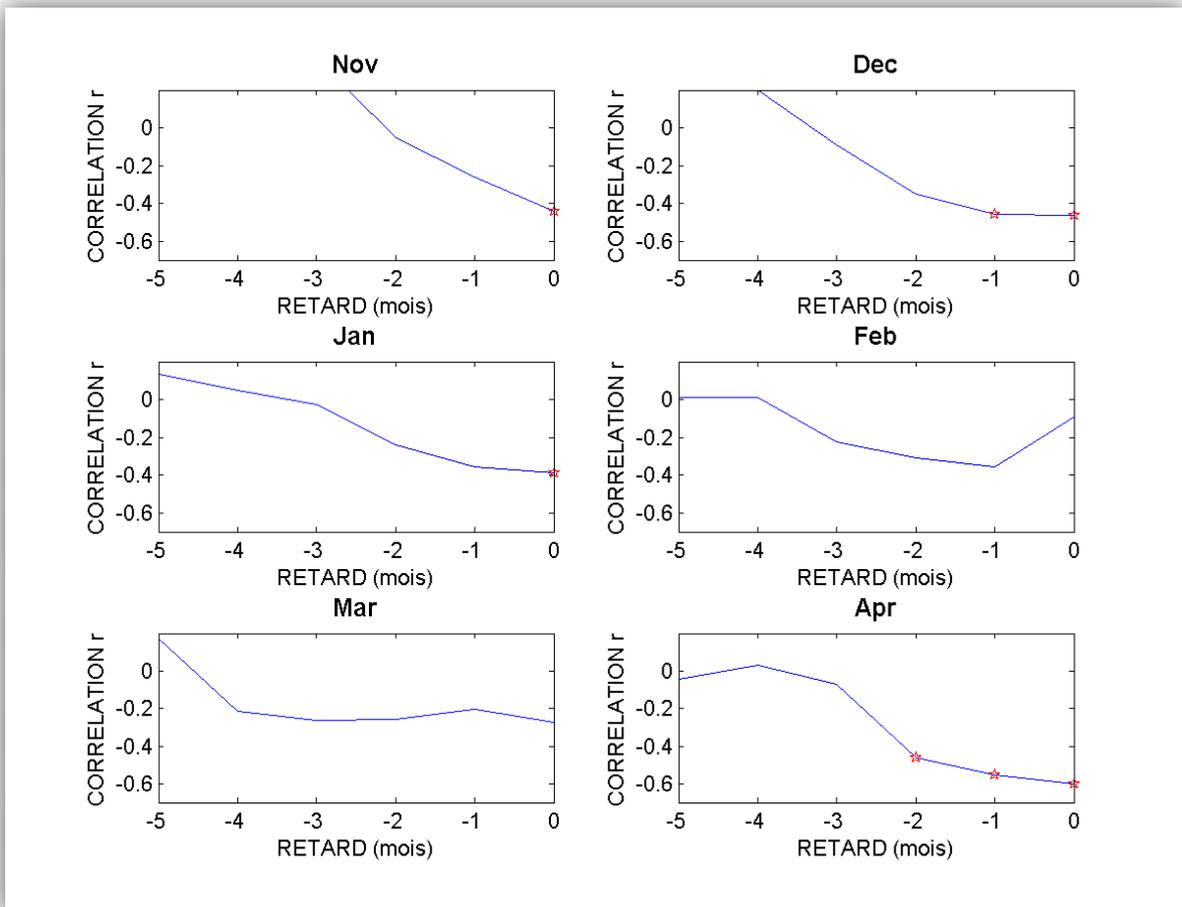


**Figure 26: Relation entre enneigement maximum du Haut Atlas de Marrakech et NAO du mois de Février pour la période 2001-2010**

La température jouant un rôle moteur sur le déclenchement d'un évènement neigeux, nous avons tenté d'analyser la relation entre la température mensuelle enregistrée à l'Oukaimeden et la NAO. Dans cet objectif, nous avons corrélé les valeurs de températures maximales mensuelles de Novembre à Avril avec les valeurs de la NAO simultanée et des 5 mois précédents (figure 27) ; la corrélation avec la température minimale est donnée à l'annexe 5). Les températures maximales et la NAO sont corrélées négativement sur l'ensemble des mois étudiés. En d'autres termes, quand la NAO est dans une phase négative, les températures ont plutôt tendance à enregistrer des anomalies positives et inversement. Ces résultats corroborent l'étude de Wang et al. (2005) qui ont également montré une anti-corrélation entre NAO et température. Ces résultats sont particulièrement intéressants car ils mettent en évidence un double effet opposé impactant l'enneigement sur le Haut Atlas. En effet, si les phases négatives de la NAO sont caractérisées par un apport humide des flux Atlantiques plus marqués sur l'Afrique du Nord, et, in fine, des précipitations excédentaires, elles sont aussi associées à des anomalies positives de température défavorables à l'enneigement. Cela pourrait expliquer également la faible corrélation mise en évidence entre NAO et enneigement. L'année 2008-2009 qui présente le plus fort enneigement bénéficie

d'une phase relativement neutre de la NAO sur l'ensemble de l'hiver et des températures particulièrement basses. Il aurait été particulièrement intéressant d'étudier le lien entre les températures et l'enneigement et NAO pour l'année 2009-2010 qui présente un comportement particulièrement atypique. Malheureusement les données pour l'année 2010 n'étaient pas disponibles pour cette étude.

Les valeurs significatives correspondent de manière générale aux valeurs simultanées de la NAO. Cette absence de retard est en bon accord avec l'effet direct de ce phénomène atmosphérique sur le climat du Nord de l'Afrique ; en contraste avec les températures de surface des océans qui peuvent entrainer un impact sur le climat avec un retard de plusieurs mois étant donné la forte inertie thermique des masses d'eaux par rapport aux masses atmosphériques.



**Figure 27 : corrélation entre la température maximale journalière (moyenne mensuelle) enregistré à l'Oukaimeden de Novembre à Avril et la valeur mensuelle de la NAO simultanée et des 5 mois précédents (1988-2009). Les étoiles rouges correspondent aux valeurs significatives à 90% (test de Student)**

### III.2.2 Comparaison entre la surface de la neige et SST :

Les océans, contrairement aux masses atmosphériques présentent une forte inertie thermique. Les anomalies de température de surface peuvent impacter le climat à plusieurs mois d'intervalle ce qui les rend particulièrement intéressantes pour la prévision précoce. Afin d'étudier plus finement le lien entre l'enneigement et les températures de surface des océans à l'échelle du Haut Atlas, des cartes de corrélations ont été calculées entre les données SST et l'enneigement maximum pour la période 2000-2010 (figure 28) et entre les données SST et les dates de première neige (figure 29). Les cartes ne présentent que les régions où la corrélation est significative à 90% (test de student).

Quand la corrélation est proche de 0.5 (motifs spatiaux à dominante rouge sur la carte), la corrélation est significativement positive, par contraste, la corrélation est significativement négative sur les régions bleues.

Tout d'abord et par contraste avec le lien avec la NAO, nous constatons des corrélations significatives 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 dans la région Tropicale et Equatoriale Atlantique. Cette corrélation semble ensuite s'estomper petit à petit pour disparaître complètement dès le mois de novembre. Cette zone de corrélation positive dans l'Atlantique Tropical et Equatorial en août et septembre démontre que le réchauffement de cette région de l'océan Atlantique durant la fin de l'été peut être favorable pour l'enneigement sur le Haut Atlas durant l'hiver suivant.

Le climat du bassin Méditerranéen est dominé par l'alternance entre des régimes extratropicaux principalement gouvernés par l'Oscillation Nord Atlantique et des subsidences d'air sec au niveau de la branche descendante de la cellule Halley (Bolle, 2002). Notre résultat corrobore plusieurs études précédentes. Knippertz et al. (2002) a montré que l'Atlantique tropical était une source d'humidité pour les régions Sud du Maroc, jusqu'au Haut Atlas, notamment pour les précipitations du début de l'automne. La perturbation de la cellule de Hadley par des anomalies positives de température de surface des océans dans la région tropicale pourrait être à l'origine de l'impact des régions tropicales atlantiques sur les précipitations sur l'Europe du Sud et l'Afrique du Nord comme démontré par Czaja et Frankignoul (2002). Cassou et al. (2004) montre de plus que le réchauffement de l'océan atlantique tropical et équatorial à la fin de l'été conduit à l'excitation privilégié de la phase négative de la NAO l'hiver suivant ce qui est compatible avec une augmentation de l'enneigement sur le Haut Atlas. Pour le reste de l'année, les motifs spatiaux de corrélation

sont extrêmement diffus et difficile à interpréter au regard de la faible longueur de la série temporelle d'enneigement. En conclusion, ce motif de corrélation entre l'enneigement maximum et les anomalies de température de surface des océans dans l'Atlantique tropical et équatorial semble cohérent par rapport à ce que l'on sait de l'influence de la dynamique atmosphérique et océanique sur le climat du Maroc. Par ailleurs, ce retard de plusieurs mois fait de cette variable un candidat intéressant pour le développement de modèle de prévisions précoces du couvert neigeux.

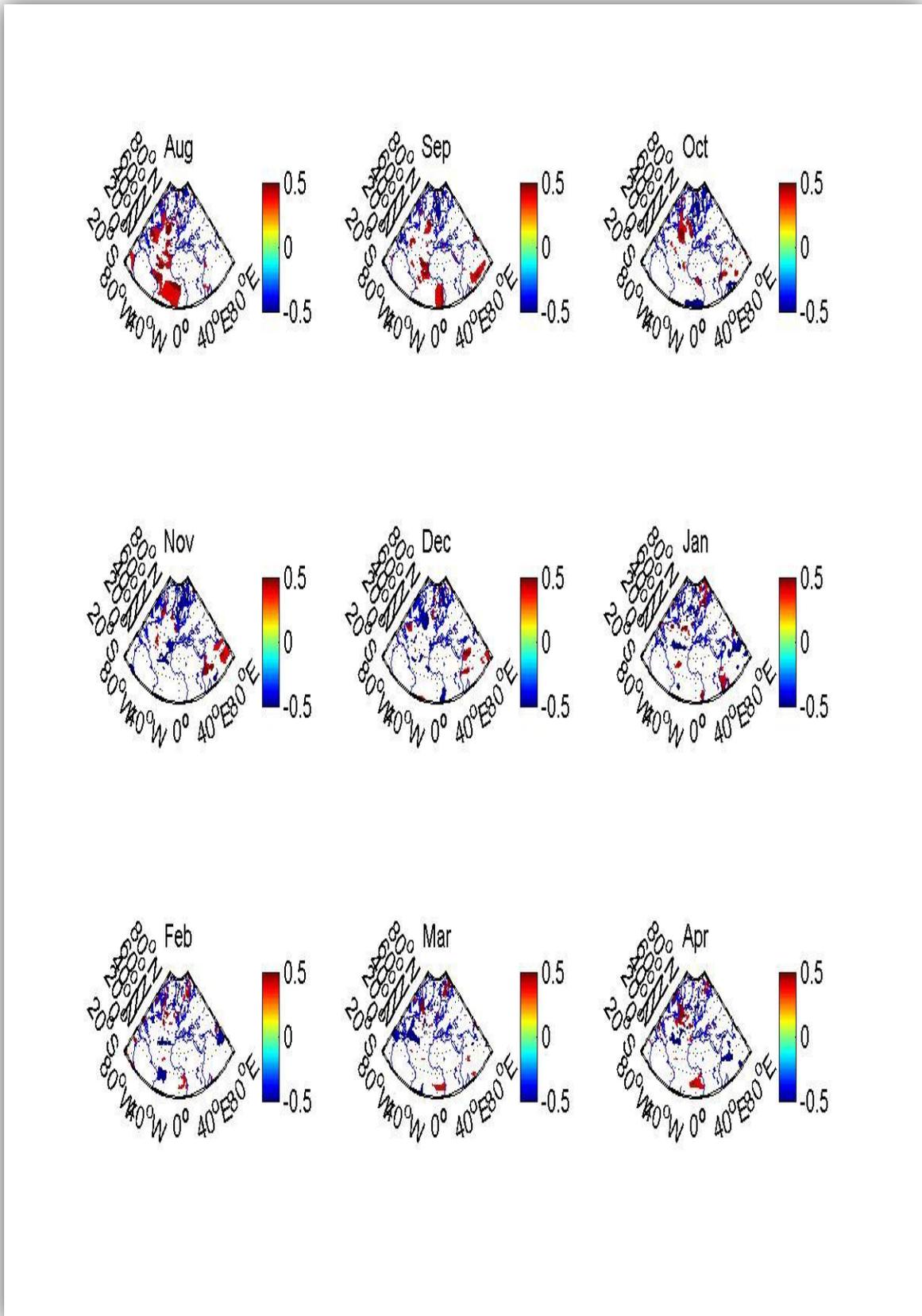
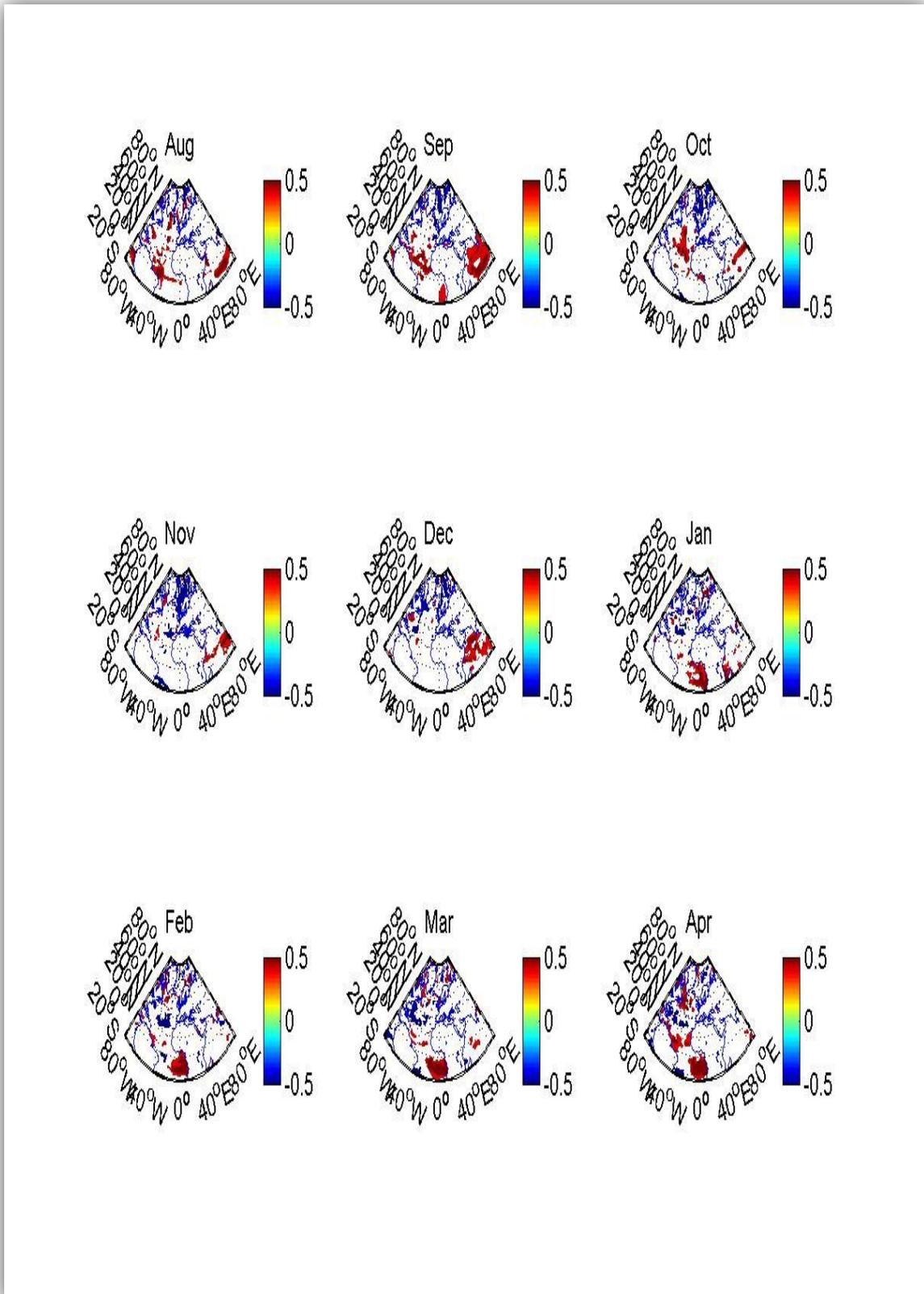


Figure 28: Cartes de corrélations globales entre les données SST et enneigement maximum pour la période 2000-2010



**Figure 29 : Cartes de corrélations globales entre les données SST et les dates de première neige pour la période 2000-2010**

## Conclusion

La chaîne montagneuse du Haut Atlas de Marrakech constitue un château d'eau pour les plaines arides avoisinantes. Malgré l'importance de la neige dans le bilan hydrique régional et comme indicateur de changement climatique, peu d'études se sont focalisées jusqu'à présent sur l'étude du lien entre l'enneigement et climat à grande échelle.

Ce travail a permis de réaliser trois objectifs :

- le premier consistait à effectuer une évaluation de la qualité des produits MODIS d'estimation des surfaces enneigées, MOD10A1, en prenant les estimations calculées à partir des données VEGETATION par Boudhar (2009) comme référence : cette comparaison a montré un bon accord global entre les deux produits ( $r=0.80$  et  $RMSE=179 \text{ km}^2$  en moyenne sur l'ensemble du Haut Atlas de Marrakech pour la période 2000-2004). Néanmoins, les surfaces estimées par MODIS présentent un léger biais négatif ( $-22 \text{ km}^2$ ) qui pourrait tout autant être dû à une surestimation du capteur VEGETATION qui présente une résolution plus importante (500 m pour MODIS, 1 km pour VEGETATION). Nous avons également montré que l'algorithme générique utilisé par la NASA pour estimer la surface neigeuse pouvait présenter des problèmes de détections de nuages (mauvaise classification entre pixel enneigée et nuageux).
- le deuxième objectif c'est de caractériser la variabilité spatio-temporelle du couvert neigeux sur le Haut Atlas de Marrakech à partir des produits journaliers de couverture neigeuse MODIS : nous avons caractérisé les cycles saisonniers d'enneigement du Haut Atlas à l'aide de ces produits et dérivé des indicateurs annuels de la saison neigeuse sur le Haut Atlas. Nous avons notamment mis en évidence une forte variabilité interannuelle en terme d'enneigement maximum et en terme de date de premières neiges. Nous avons également analysé la variabilité spatiale de l'enneigement moyen sur le Haut Atlas.
- Le troisième objectif c'est d'étudier le lien entre la dynamique atmosphérique et océanique à grande échelle (NAO et SST) et la variabilité du couvert enneigé sur cette région. Les résultats montrent notamment qu'une NAO en phase négative durant le mois de février est favorable à l'enneigement sur le Haut Atlas. Cette corrélation, même si son signe négatif est cohérent avec les études précédentes

montrant le lien NAO-précipitations sur l'Afrique du Nord, est faible. L'analyse de la relation entre la NAO et la température mesurée à l'Oukaimeden a permis de montrer que la phase négative de la NAO conduisait dans un même temps à un réchauffement, donc plutôt défavorable à l'enneigement. Cet impact de la NAO sur la température et les précipitations, les deux facteurs régissant le déclenchement d'un évènement neigeux, pourrait expliquer la faible relation obtenue entre NAO et enneigement. Enfin, nous avons montré une relation forte 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 Haut Atlas. 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.

De manière générale, cette étude montre l'intérêt d'utilisation des données de la télédétection pour caractériser l'enneigement en montagne semi aride et d'établir un lien entre ce dernier et le climat. Néanmoins, la série temporelle (10 ans) de données est un peu courte pour mettre en évidence des liens forts entre l'enneigement et le climat. Notamment, plusieurs valeurs de corrélation ne passent pas le test de significativité à 90%. Il serait donc capital d'étendre notre travail aux données du capteur VEGETATION disponible en continu depuis 1998 mais qui nécessite des traitements lourds pour en extraire une surface enneigée. Ce travail est en cours. Nous pouvons également évoquer la série temporelle du capteur AVHRR à la résolution kilométrique disponible depuis 1989. Par ailleurs, ce travail préliminaire d'étude du lien entre le climat et l'enneigement s'est focalisé sur la variabilité interannuelle. Dans la suite du travail, nous envisageons de descendre à une échelle plus fine, intra-saisonnière jusqu'à l'évènement neigeux. Enfin, un indice climatique comme la NAO est un « résumé » d'un phénomène atmosphérique complexe. Il serait donc intéressant d'analyser le lien entre l'enneigement et des champs spatio-temporels de variables atmosphériques traceurs de la dynamique régionale comme les géopotentiels à 500hPa. Enfin, la finalité de ce travail est la prévision précoce du couvert neigeux sur le Haut Atlas et les résultats obtenus sur la relation entre SST de la fin de l'été et l'enneigement sur le Haut Atlas durant l'hiver suivant sont très encourageants dans cet objectif.

## Bibliographie

- ARCHARD.F, MALINGREAU. J, & PHULPIN. T, (1994). A mission for global monitoring of the continental biosphere. VEGETATION International Users Committee Secretariat, Joint Research Center, Institute for Remote Sensing Application. *I21020 ISPRA (Va), Italy*
- ARNAUD. M, & LEROY. M, (1991). Spot-4 - a New Generation of Spot Satellites. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 46, 205-215.*
- BOUDHAR.A, 2009, Télédétection du manteau neigeux et modélisation de la contribution des eaux de fonte des neiges aux débits des Oueds du Haut Atlas de Marrakech, Thèse de doctorat, Université Cadi Ayyad (Faculté des Sciences et Techniques Marrakech), 230p.
- BOUDHAR.A, DUCHEMIN. B, HANICH. L, CHAPONNIERE. A, MAISONGRANDE. P, BOULET.G, STITOU.J, CHEHBOUNI.A, 2007, Analyse de la dynamique des surfaces enneigées du Haut Atlas marocain à partir des données SPOT-VEGETATION, (Sécheresse 2007 ; 18(4) :278-288).
- CASSOU.C, 2004, Du changement climatique aux régimes de temps : l'oscillation nord-atlantique, (La Météorologie 2004 ; 45 : 21-32).
- Centre Canadien de Télédétection, (CCT) Ressources naturelles Canada, Notions fondamentales de télédétection, pdf, 266p.
- CHAPONNIERE, A., MAISONGRANDE, P., DUCHEMIN, B., HANICH, L., BOULET, G., HALOUAT, S., ESCADAFAL, R. (2005) A combined high and low spatial resolution approach for mapping snow covered area in the Atlas Mountain. *International Journal of Remote Sensing* **26**: 2755–2777.
- CHEHBOUNI, et al, 2008, An integrated modelling and remote sensing approach for hydrological study in semi-arid regions: the SUDMED Program. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29:5161-5181.
- DUCHEMIN. B, BERTHELOT. B, DEDIEU. G, LEROY. M, MAISONGRANDE. P, (2002), Normalisation of directional effects in 10-day global syntheses derived from VEGETATION/SPOT: II. Validation of an operational method on actual data sets". *Remote Sensing of Environment*; 81:101-113.
- GIEC, 2008, Document technique n°VI sur le changement climatique et l'eau (juin 08).

- GIORGI. F, 2006, Climate change hot-spots, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, doi:10.1029/2006GL025734.
- JUILLERAT M., 2004, Etude hydrologique comparative de 5 bassins versants du Haut Atlas marocain, mémoire de maîtrise, université de franche-comté.
- HANICH, L et al. (2003). Snow covers mapping using SPOT VEGETATION with high resolution data: application in the Moroccan Atlas mountains. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Toulouse, France.
- HILL. J, STELMES. M, UDELHOVEN. Th, RODER. A, SOMMER. S, 2008, Mediterranean desertification and land degradation Mapping related land use change syndromes based on satellite observations, *Glob. Plan. Chang.*, 64, pp.146-157.
- HOLBEN. B.N. (1986). Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int.J. Remote Sensing*, 7:1417-1434.
- KNIGHT. J, ALLAN. R, FOLLAND. C. K., VELLINGA. M, and Mann M.E., 2005, A signature of persistent natural thermohaline circulation cycles in observed climate.
- LOPEZ.P, SIRGUEY.P, ARNAUD.Y, POUYAUD.B, CHEVALIER.P, 2008, Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000–2006),( *Global and Planetary Change* 61 (2008) 103–116).
- MARSCHALL. J, KUSHNIR. J, BATTISTI. D, CHANG. P, CZAJA. A, DICKSON. R, HURRELL. J, MCCARTNEY. M, SARAVANAH. R, VEBECK. M, 2001, North Atlantic Climate Variability: phenomena, impacts and mechanisms, 2001, *Int. J. Climatol.*, 21, 1863-1898.
- MAISONGRANDE. P., DUCHEMIN, B., DEDIEU, G. (2004) VEGETATION/SPOT - An Operational Mission for the Earth Monitoring: Presentation of New Standard Products". *International Journal of Remote Sensing* 25,9-14.
- RIMMER. A, SALINGAR. Y, 2006. Modelling precipitation-streamflow processes in karst basin: The case of the Jordan River sources, Israel, *Journal of Hydrology*. 331, pp. 524– 542.
- SALOMONSON, V.V. and APPEL, I., 2004. Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index. *Remote Sensing of Environment* 89, 351–360.
- Tarpley J.P., S.R. Schneider and R.L. Money. (1984).Global vegetation indices from NOAA-7 meteorological satellite. *Journal of Climate Applied Meteorology*; 23:491-494.

- XOPLAKI. E, GONZALES-ROUCO. F.J, LUTERBACHER. J, WANNER. H, 2003, Mediterranean summer air temperature variability and its connection to the large-scale atmospheric circulation and SSTs, *Clim Dyn.*, 20, 723-739.

## Annexes

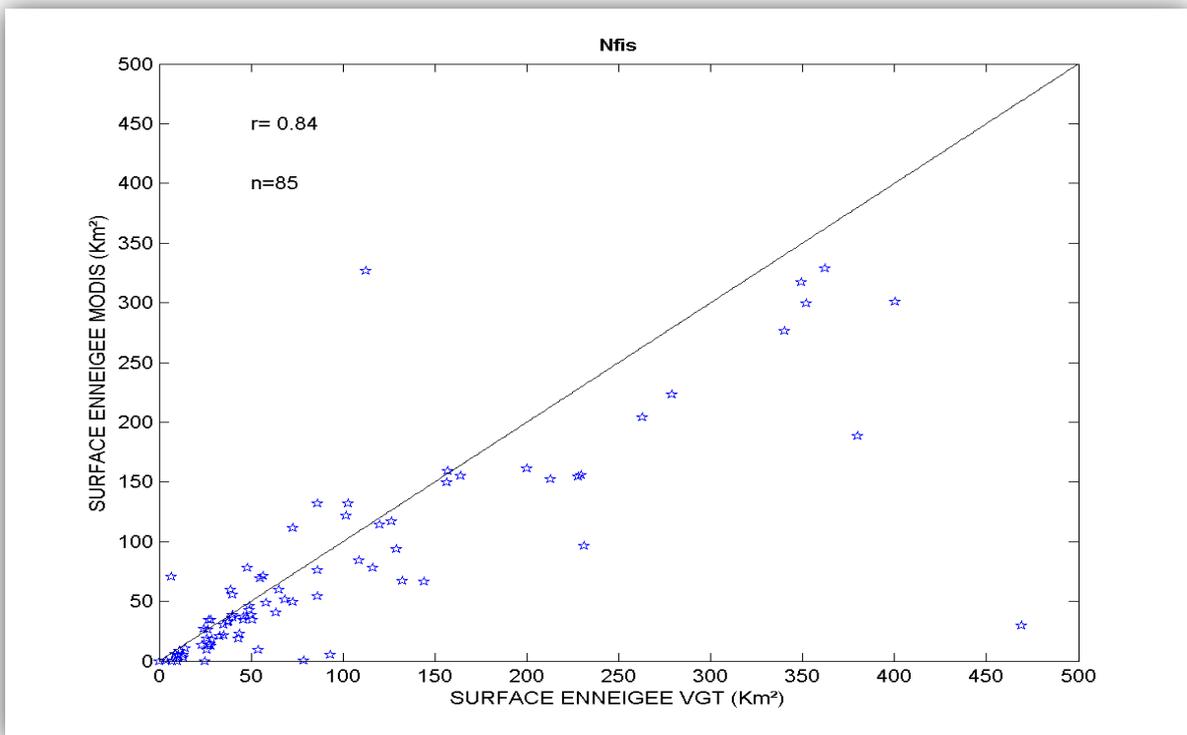
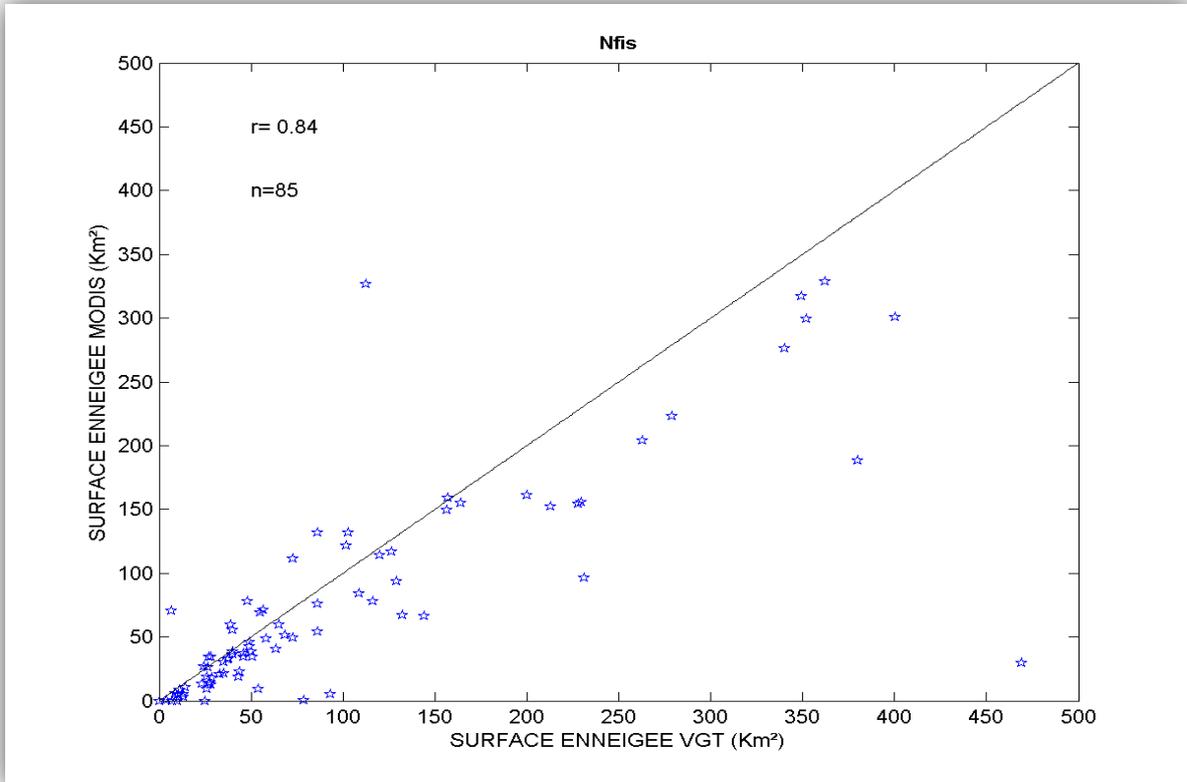
### Annexe 1

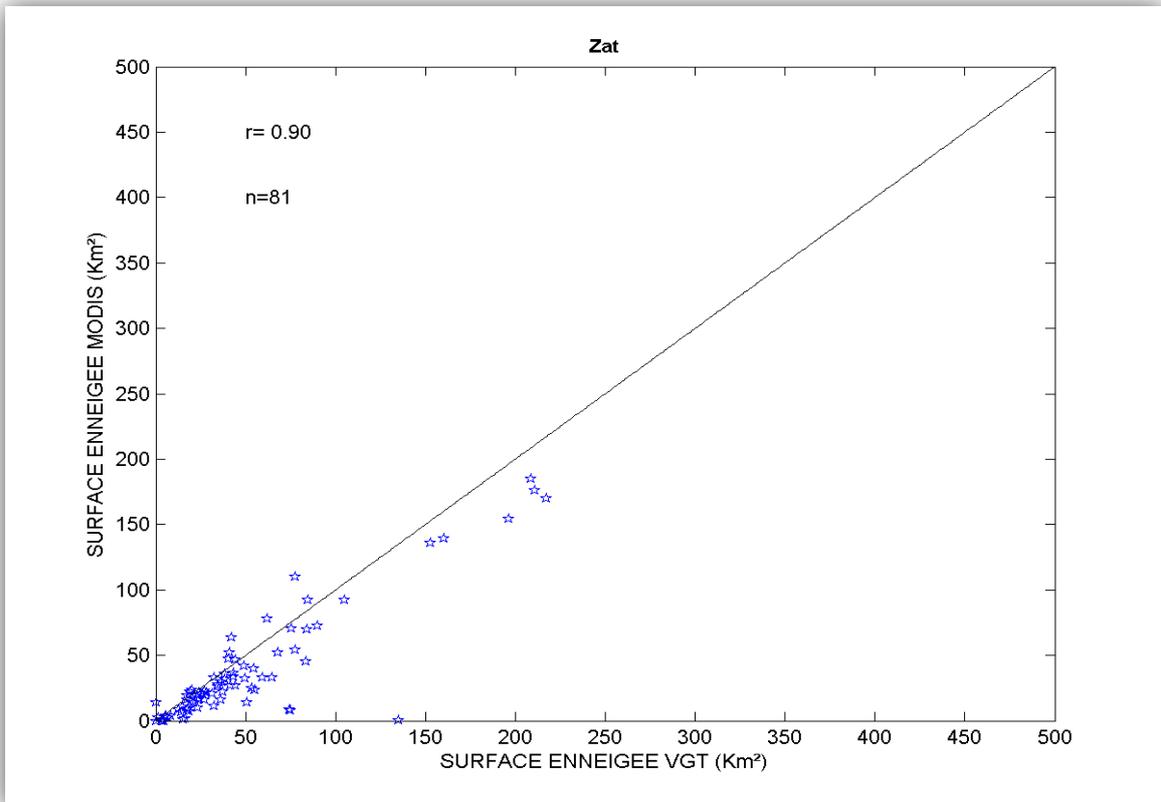
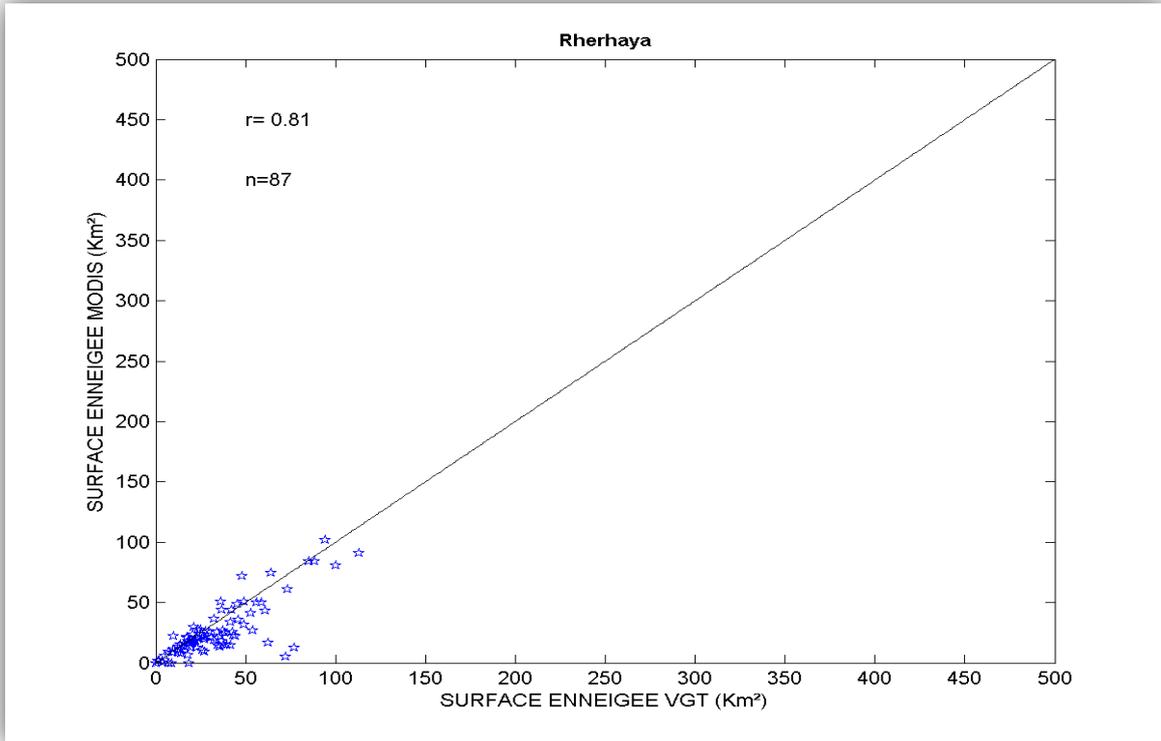
#### Définition:

- **Effet directionnel** : C'est une relation triple « soleil -sol -capteur » qui conduit à une variation de la réflectance. La position du capteur qui diffère de celle du soleil fait la différence des mesures de la réflectance.
- **Effet atmosphérique** : Ce sont les perturbations atmosphériques qui affectent le rayonnement réfléchi lors de son passage à travers l'atmosphère vers le capteur : absorption et diffusion. Les vapeurs aqueuses et les gazes carboniques sont des gazes à effet de serre qui absorbent très efficacement les rayons de différentes longueurs d'ondes.
- **Effet géométrique (effet topographique)** : La détection de la neige s'effectue le plus souvent dans les régions montagneuses. Donc la réflectance sera influencée par la topographie, tel que les reliefs escarpés peuvent cacher certaines zones et alors elles ne seront pas détectées par le satellite. Par conséquent on aura des calculs de la réflectance qui seront faux.

 Annexe 2

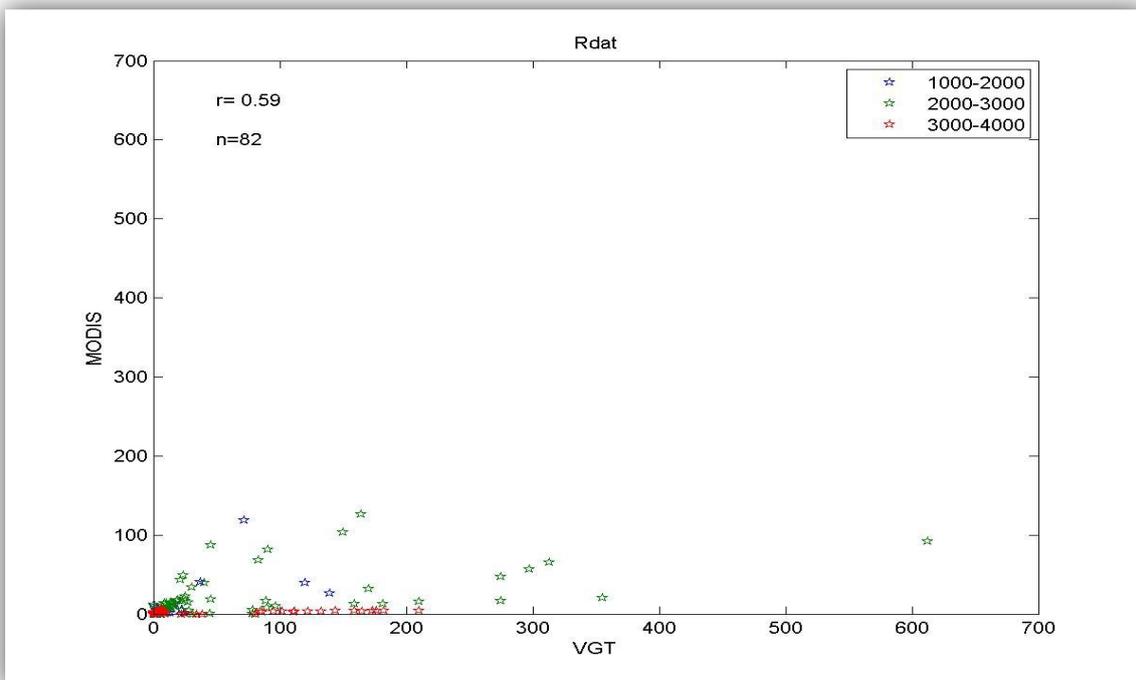
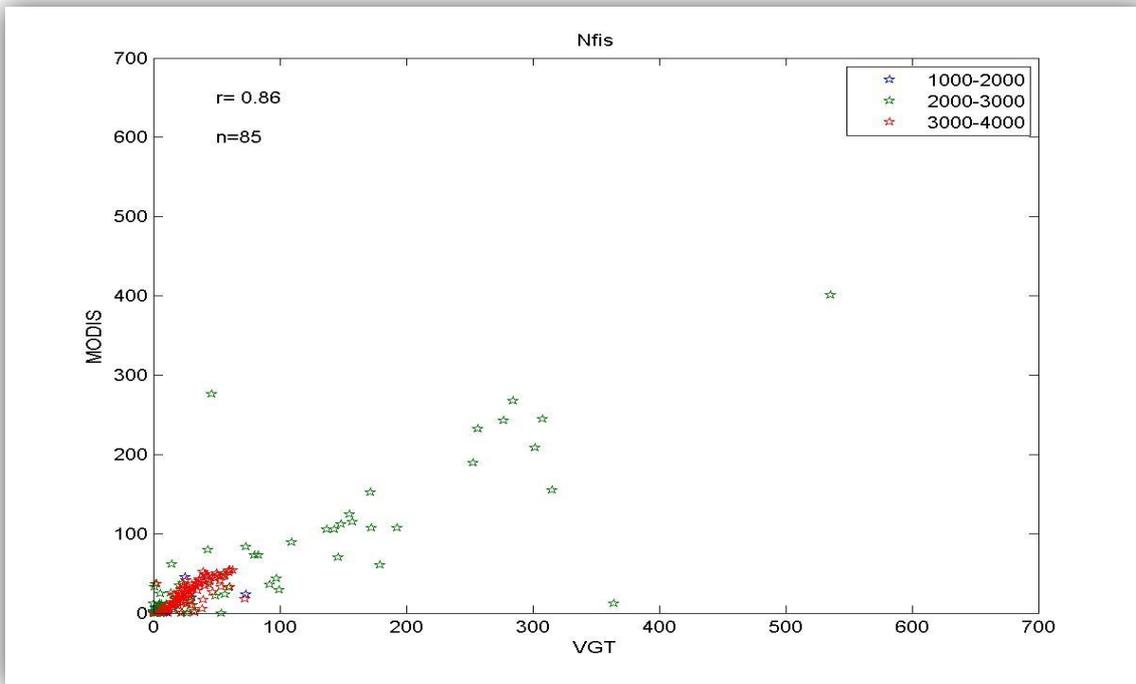
**Corrélation entre les surface d'enneigement issus des images VEGETATION et MODIS pour chaque sous bassin versant durant la période (2001-2005) :**

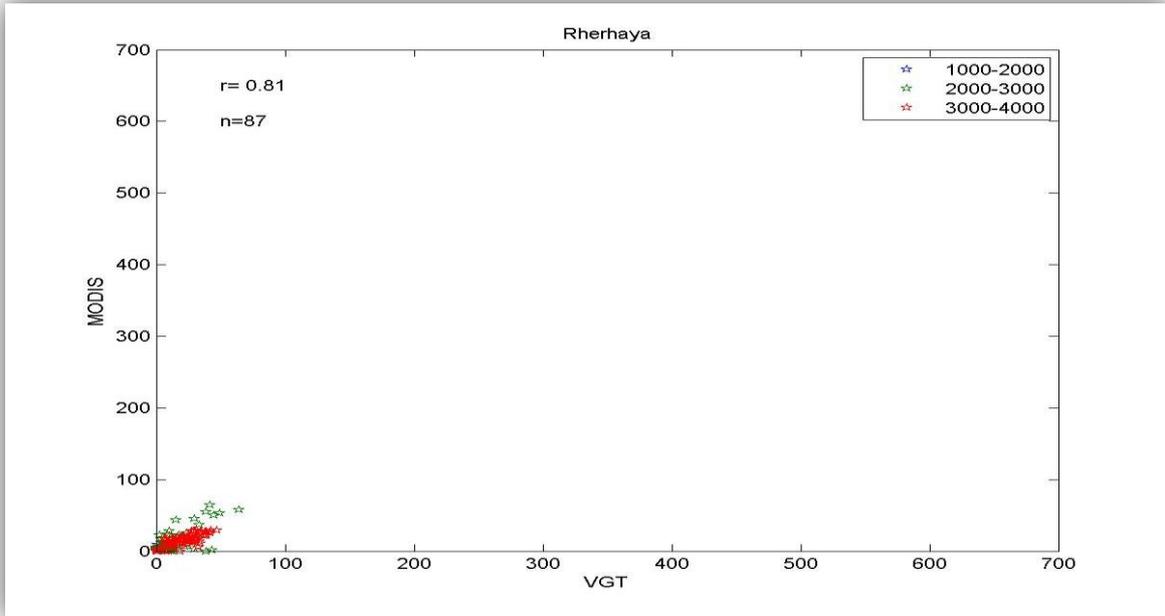




**Annexe 3**

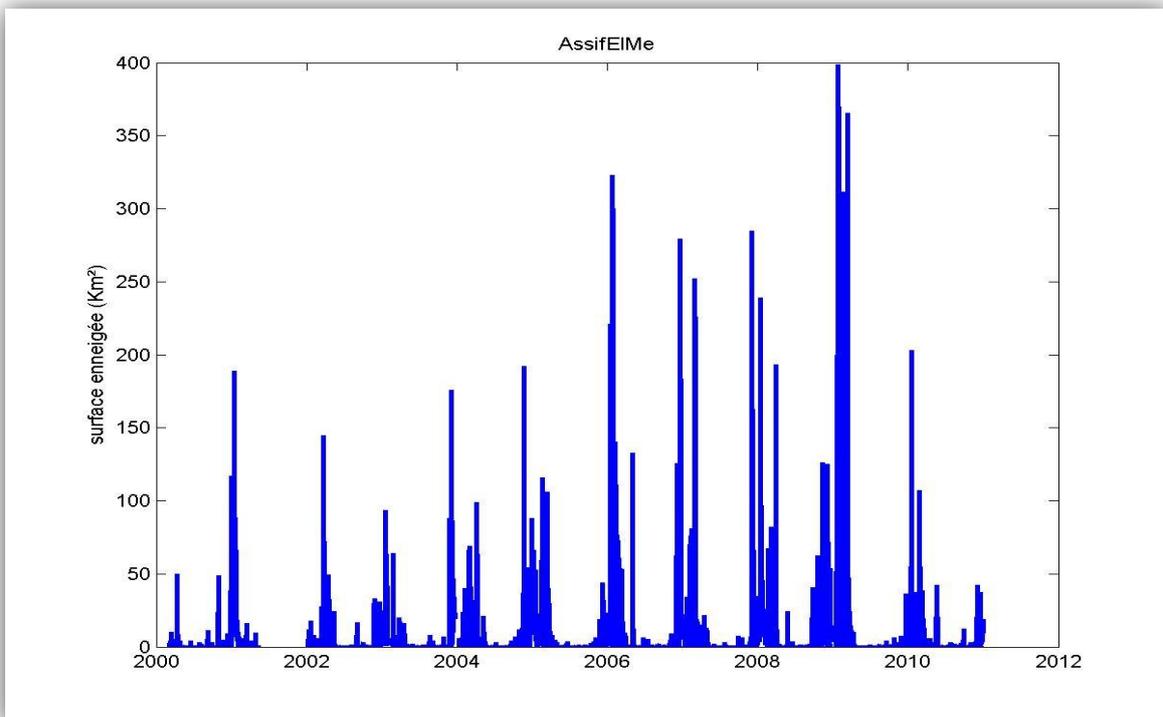
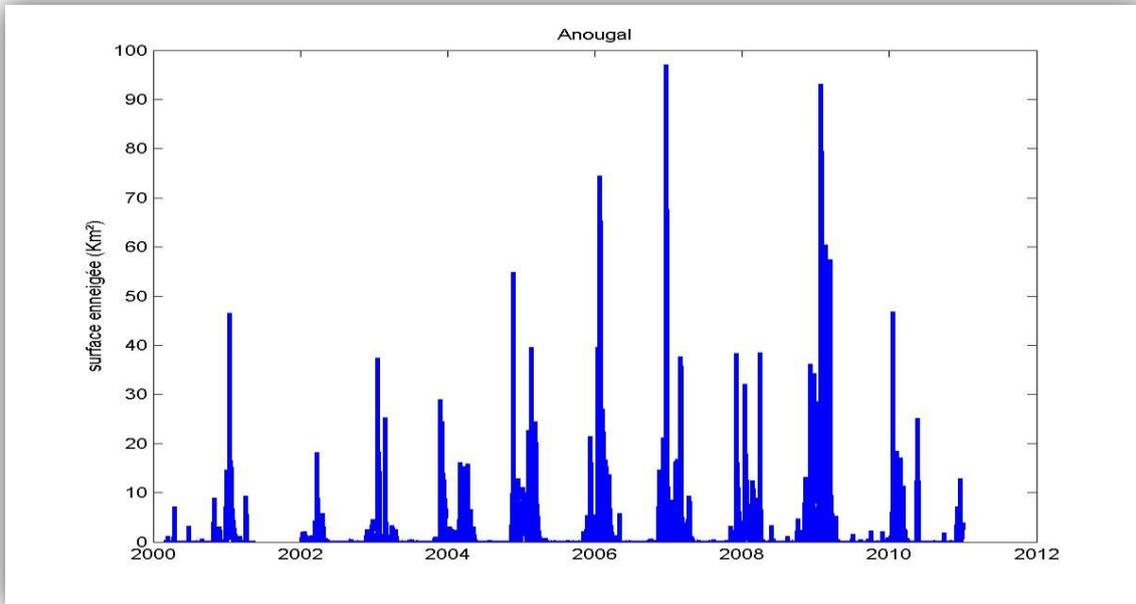
**Corrélation entre les surface d'enneigement issu des images VEGETATION et MODIS par tranche d'altitude pour chaque sous bassin versant durant la période (2001-2005) :**

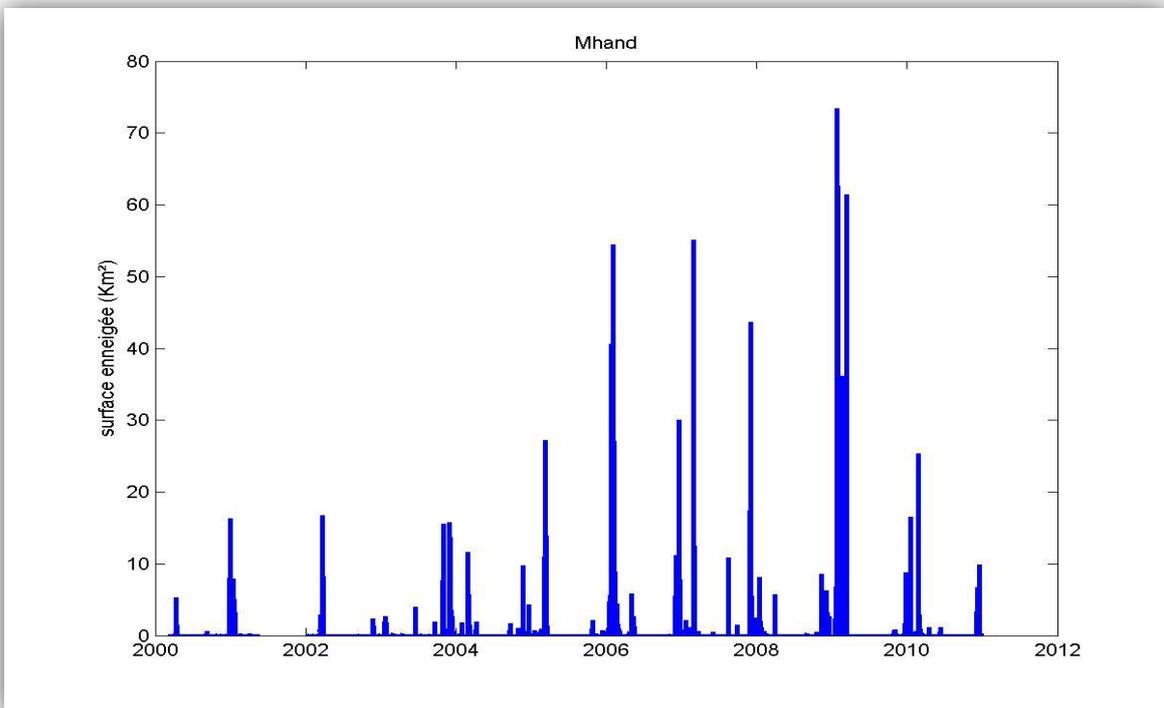
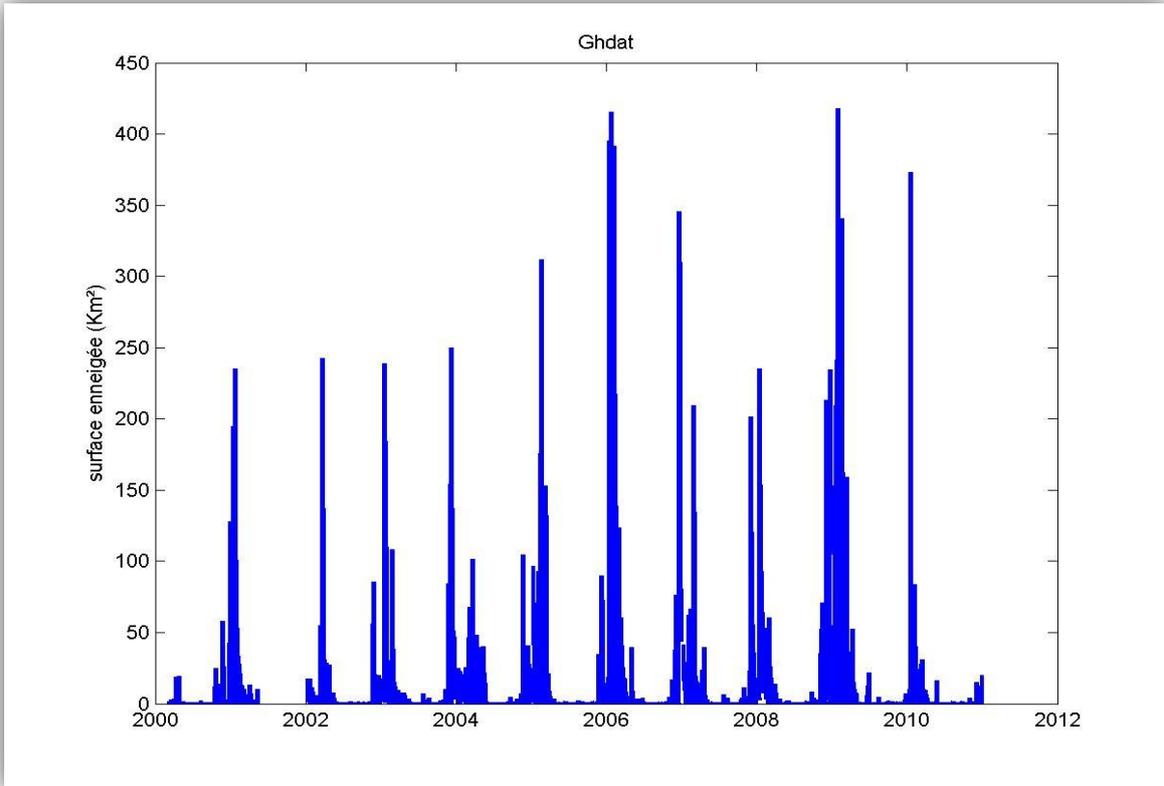


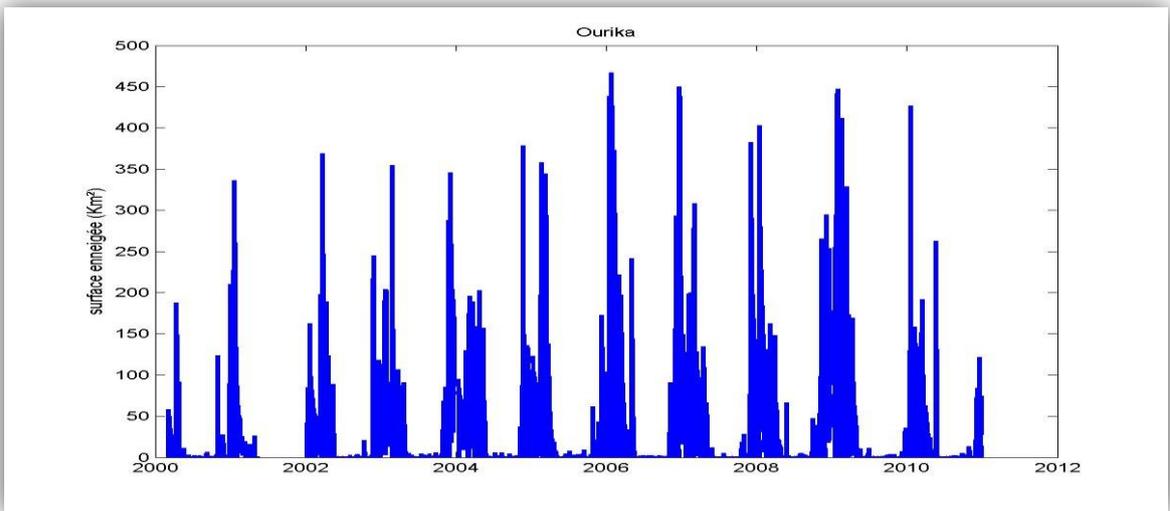
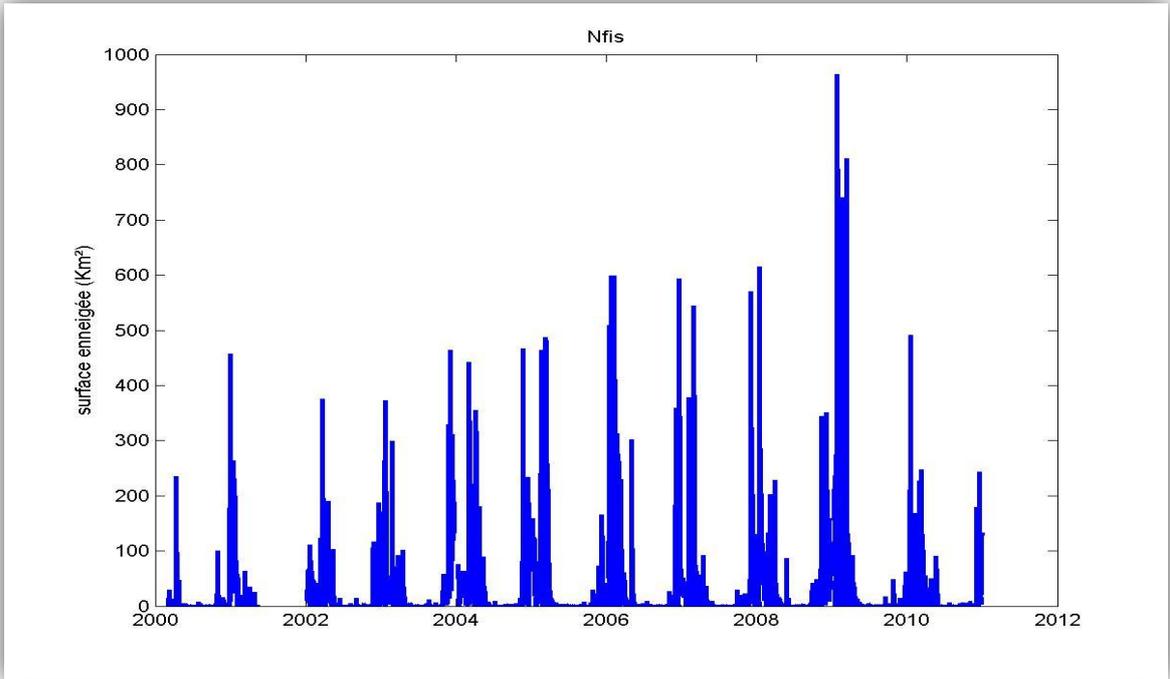


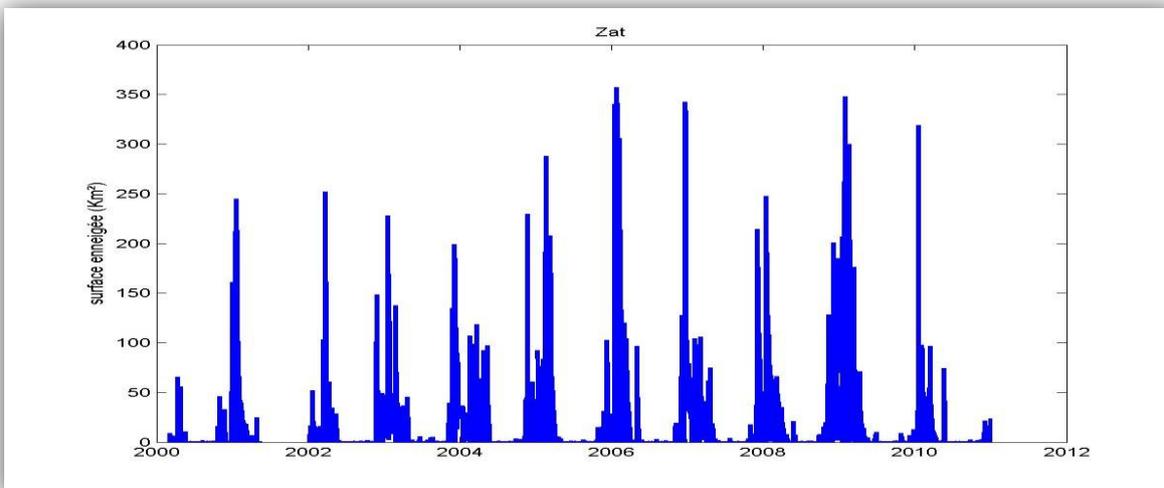
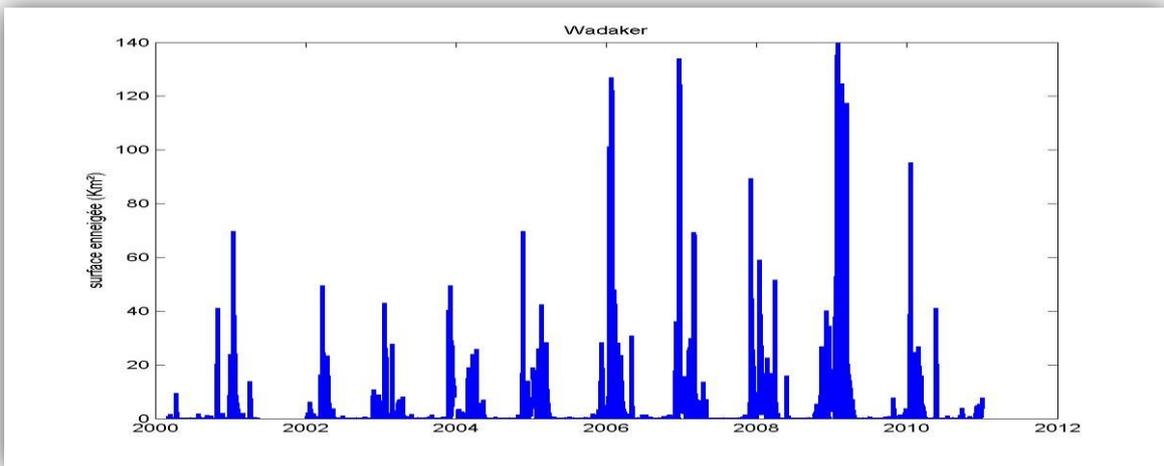
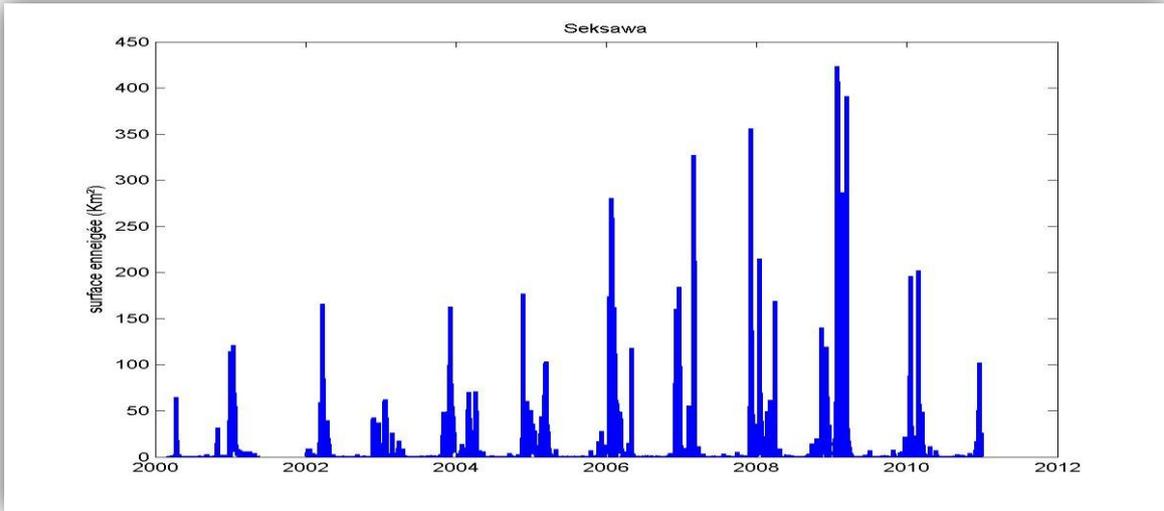
**Annexe 4**

**Variation de la surface neigeuse au niveau des sous bassin versant étudié sur la période 2000-2010 :**



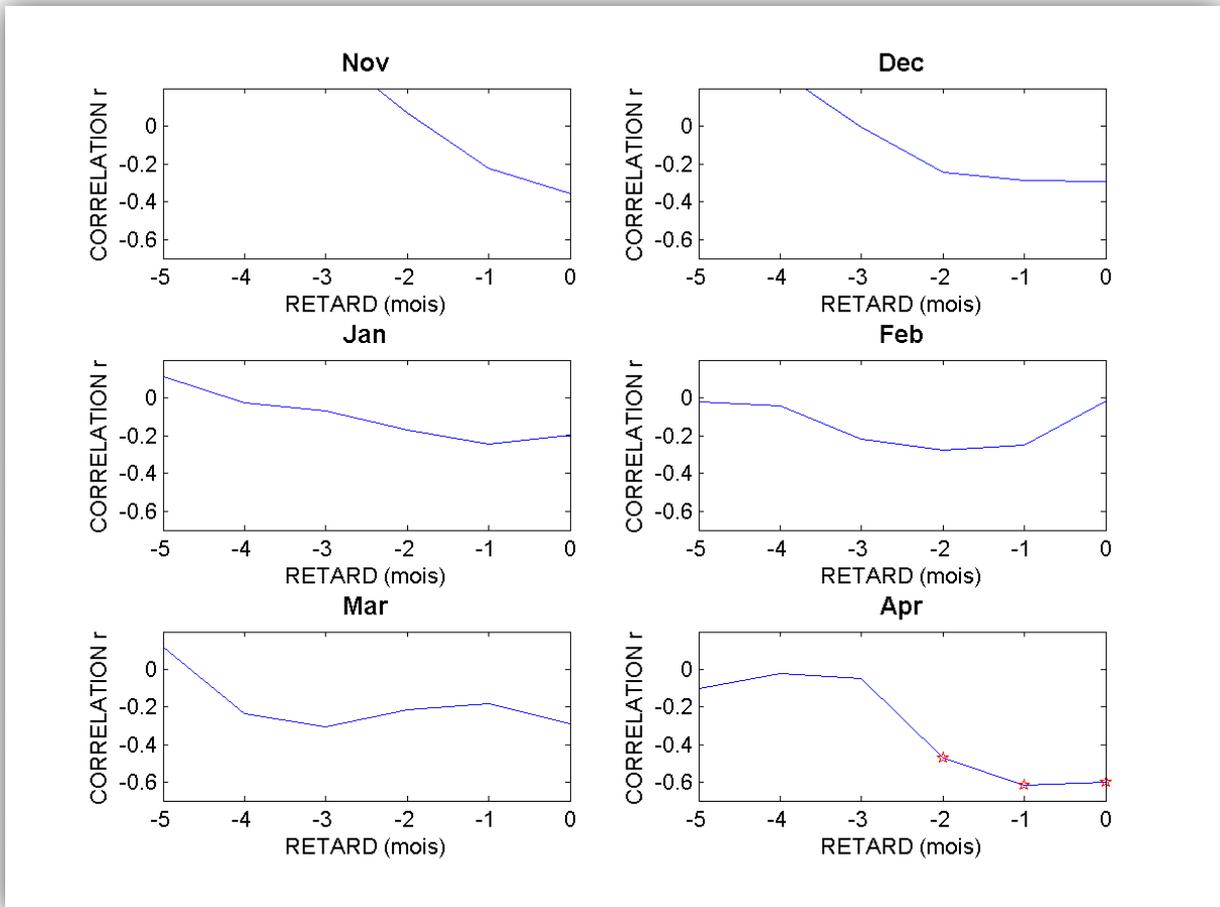






Annexe 5

La corrélation de la NAO avec la température minimale journalière de la station d'Oukaimeden :



 **Annexe 6**

• **Programme de calcul de la surface neigeuse par bassin et par tranche d'altitude**

```
function readmodis=readmodis(annee)
close all;
clc;
NameBV=['Wadaker      ','AssifElMe';'Seksawa      ','Rherhaya  ','Ourika
','Rdat      ','Zat      ','Mhand      ','Anougal  ','Nfis      '];
%Lecture des series SCA MODIS
filename_serie=sprintf('D:\\MARCHANE\\DATA\\stack_journalier\\%d\\st
ak%d',annee,annee);
fid_serie=fopen(filename_serie,'r');
%lecture de fichier hdr
filename_hdr=sprintf('D:\\MARCHANE\\DATA\\stack_journalier\\%d\\stak
%d.HDR',annee,annee);
ihdr=fopen(filename_hdr,'rt');
for i=1:5
Temp = fgetl(ihdr);
end
strband=fgetl(ihdr);
ind=findstr(strband,'=');
strband=strtrim(strband((ind+1):length(strband)));
nbdata=str2num(strband);
for i=1:10
Temp = fgetl(ihdr);
end
nbdataexist=0;
datedata=[];
for i=1:nbdata
str=fscanf(ihdr,'%s,');
ind=findstr(str,',');
str=str(1:(ind-1));
if(isempty(str)~=1);
```

```
nbdataexist=nbdataexist+1;
datedata(nbdataexist)=datenum(str,'dd/mm/yyyy');
end
end
fclose(ihdr);
%%%%%%%%%
nbc=328;
nblig=169;
% Masque Sous bassin
load D:\MARCHANE\sig\Hydrologie\maskbvatlas.txt;
%imagesc(maskbv)
wkeep=find(maskbvatlas~-9999);
% Masque altitude
load D:\MARCHANE\work\SRM2004\mnt_bv.txt
an=num2str(annee);
nomfich=sprintf('D:\MARCHANE\work\SCA_donnees_journalies\extract
ion_par_bv\SCA_total_%s.txt',an);
iout=fopen(nomfich,'wt');
for i=1:nbdataexist
[ancur,moiscur,jourcur]=datevec(datedata(i));
for j=0:9
com=sprintf('fprintf(iout%d,'%d
%d%d','',ancur,moiscur,jourcur);',j);
eval(com);
com=sprintf('SCABVCur=SCACur(w%d);',j);
eval(com);
com=sprintf('mnt_bv_cur=mnt_bv(w%d);',j);
eval(com);
w=find((SCABVCur>=0) & (SCABVCur<=100));
nbpixsnow=length(w);
SCASnowCur=sum(SCABVCur(w).*(0.5*0.5)/100); %km²
wc=find(SCABVCur==250);
```

```
PercentCloud=(length(wc)/length(SCABVCur))*100;

com=sprintf('fprintf(iout%d, ''%%f%%d%%f'', SCASnowCur, nbpixsnow, PercentCloud); ', j);

eval(com);

for k=1100:200:3900

w=find((mnt_bv_cur>=k) & (mnt_bv_cur<(k+200)));

SCABVCurAlt=SCABVCur(w);

w1=find((SCABVCurAlt>=0) & (SCABVCurAlt<=100));

nbpixsnow=length(w);

SCASnowCur=sum(SCABVCurAlt(w1).*(0.5*0.5)/100); %km²

com=sprintf('fprintf(iout%d, ''%%f ''', SCASnowCur); ', j);

eval(com);

end

com=sprintf('fprintf(iout%d, ''\n''); ', j);

eval(com);

end

end

fclose('all');
```

- **Programme de calculer de l'enneigement moyen, Date des premières neiges et la corrélation entre NAO mensuelle et les données de l'enneigement**

```
close all;

clear all;

clc;

annees=[2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010];

nbannee=length(annees);

% Masque Sous bassin

load 'D:\MARCHANE\sig\Hydrologie\maskbvatlas.txt';

%imagesc(maskbv)

wkeep=find(maskbvatlas~=-9999);

nbpixatlas=length(wkeep);

%%%%%%%%%
```

```
nbcol=328;

nblig=169;

anneeshydro=['2000-2001';'2001-2002';'2002-2003';'2003-2004';'2004-
2005';'2005-2006';'2006-2007';'2007-2008';'2008-2009';'2009-2010'];

k=0;

DateSCANoCloud=[];

MSCA=[];

for i=1:nbannee
    annee=annees(i);
    com=sprintf('Annee %d ...',annee);
    disp(com);

    filename_serie=sprintf('D:\\MARCHANE\\DATA\\stack_journalier\\%d\\st
ak%d',annee,annee);
    fid_serie=fopen(filename_serie,'r');
    %lecture de fichier hdr

    filename_hdr=sprintf('D:\\MARCHANE\\DATA\\stack_journalier\\%d\\stak
%d.hdr',annee,annee);
    ihdr=fopen(filename_hdr,'rt');
    for j=1:5
        Temp = fgetl(ihdr);
    end
    strband=fgetl(ihdr);
    ind=findstr(strband,'=');
    strband=strtrim(strband((ind+1):length(strband)));
    nbdata=str2num(strband);
    for j=1:10
        Temp = fgetl(ihdr);
    end
    nbdataexist=0;
    datedata=[];
    for j=1:nbdata-1
```

```
str=fscanf(ihdr,'%s,');
ind=findstr(str,',');
str=str(1:(ind-1));
%pause
if(isempty(str)~=1);
    nbdataexist=nbdataexist+1;
    datedata(nbdataexist)=datenum(str,'dd/mm/yyyy');
end
end
str=fscanf(ihdr,' %s}');
ind=findstr(str,'}');
str=str(1:(ind-1));
nbdataexist=nbdataexist+1;
datedata(nbdataexist)=datenum(str,'dd/mm/yyyy');
fclose(ihdr);
datemin=datenum(annee,5,31);
datemax=datenum(annee,10,1);
for j=1:nbdataexist
    [ancur,moiscur,jourcur]=datevec(datedata(j));
    %io=fread(fid_serie,[nbcol,nblig],'float');%images SCA
    %imagesc(io)%affichage de l'image
    SCACur=fread(fid_serie,[nbcol nblig],'float');
    if((datedata(j)<=datemin) | (datedata(j)>=datemax))
        SCABVCur=SCACur(wkeep);
        w=find((SCABVCur>=0) & (SCABVCur<=100));
        nbpixsnow=length(w);
        wc=find(SCABVCur==250);
        PercentCloud=(length(wc)/length(SCABVCur))*100;
        if(PercentCloud<20)
            k=k+1;
            MSCA(k,:)=SCABVCur;
        end
    end
end
```

```
        DateSCANoCloud(k)=datedata(j);
    end
end
end
fclose(fid_serie);
end
save MSCA MSCA;
save DateSCANoCloud DateSCANoCloud

% Images d'enneigement moyen
for i=1:10
    datemin=datenum(2000+(i-1),10,1);
    datemax=datenum(2000+i,5,31);
    w=find((DateSCANoCloud>=datemin) & (DateSCANoCloud<=datemax));
    SCACur=MSCA(w,:);
    NBPIXNoCloud=zeros(nbpixatlas,1);
    SCAMoyen=zeros(nbpixatlas,1);
    for j=1:nbpixatlas
        TSSCA=SCACur(:,j);
        w=find((TSSCA>=0) & (TSSCA<=100));
        NBPIXNoCloud(j)=length(w);
        SCAMoyen(j)=mean(TSSCA(w));
    end
    SCAMoyenImg=maskbvatlas;
    SCAMoyenImg(wkeep)=SCAMoyen;
    NBPIXNOCloudImg=maskbvatlas;
    NBPIXNOCloudImg(wkeep)=NBPIXNoCloud;
    figure(i)
    subplot(3,1,1)
    imagesc(SCAMoyenImg);
    set(gca,'Clim',[-5 70]);
```

```
B=colormap;
B(1,:)=1;
colormap(B);
p=colorbar;
com=sprintf('Enneigement moyen (%%), annee hydrologique %d-
%d',2000+(i-1),2000+i);
t=title(com);
set(t,'Fontweight','bold');
set(t,'FontSize',10);
subplot(3,1,2)
imagesc(NBPIXNOCloudImg/243*100);
set(gca,'Clim',[-10 100]);
colorbar
com=sprintf('Nombre d''images (%%), annee hydrologique %d-
%d',2000+(i-1),2000+i);
t=title(com);
set(t,'Fontweight','bold');
set(t,'FontSize',10);
B=colormap;
B(1,:)=1;
colormap(B);
colorbar
end

% Cycle annuel d'enneigement
plotttype=['k- ' ;'b- ' ;'m- ' ;'y- ' ;'r- ' ;'g- ' ;'c- ' ;'b--' ;'r--' ;'k--
'];
SCAMax1j=[];
SCAMax15j=[];
SCAMean1j=[];
SCAMean15j=[];
for i=1:10
```

```
datemin=datenum(2000+(i-1),10,1);
datemax=datenum(2000+i,5,31);
anmin=2000+(i-1);
anmax=2000+i;
w=find((DateSCANoCloud>=datemin) & (DateSCANoCloud<=datemax));
nbdate=length(w);
DateCur=DateSCANoCloud(w);
SCACur=MSCA(w,:);
TSSCA=zeros(nbdate,1);
for j=1:nbdate
    ImgSCACur=SCACur(j,:);
    w2=find((ImgSCACur<0) | (ImgSCACur>100));
    ImgSCACur(w2)=NaN;
    TSSCA(j)=nansum(ImgSCACur(:)*0.5*0.5/100);
end
SCAMax1j(i)=max(TSSCA);
SCAMean1j(i)=mean(TSSCA);
% Affichage date enneigement maximum
w=find(TSSCA(:)==SCAMax1j(i));
com=sprintf('Annee hydro %d-%d, Enneigement max: %8.2f km², Date
enneigement maximum: ',anmin,anmax,max(TSSCA));
disp(com);
datevec(DateCur(w))
[AnCur,MoisCur,JourCur]=datevec(DateCur);
w=find(AnCur==anmin);
AnCur(w)=2000;
w=find(AnCur==anmax);
AnCur(w)=2001;
DateCur=datenum(AnCur,MoisCur,JourCur);
datemin=DateCur(1);
datemax=DateCur(nbdate);
k=0;
```

```
TSSCA_15J=[];
DateCur_15J=[];
for j=datemin:15:(datemax-15)
    k=k+1;
    w=find((DateCur>=j) & (DateCur<(j+15)));
    TSSCA_15J(k)=mean(TSSCA(w));
    DateCur_15J(k)=(j+j+15)/2;
end
SCAMax15j(i)=max(TSSCA_15J);
SCAMean15j(i)=mean(TSSCA_15J);
figure(i)
subplot(3,1,3)
p=plot(DateCur_15J,TSSCA_15J,'b-');
set(p,'linewidth',2);
hold on
p=plot(DateCur,TSSCA,'b:');
set(p,'linewidth',2);
hold on
legend('Moyenne 15 jours','Donnees journalieres');
set(gca,'Ylim',[0 1000]);
ylabel('SURFACE ENNEIGEE (km²)');
datetick;
    figure(11);

com=sprintf('p=plot(DateCur_15J,TSSCA_15J, ''%s'');',strtrim(plottype
(i,:)));
eval(com);
ylabel('SURFACE ENNEIGEE (kmÂ²)');
set(gca,'Ylim',[0 100]);
hold on
set(p,'linewidth',2);
datetick;
```

```
end

figure(11)

legend('2000-2001','2001-2002','2002-2003','2003-2004','2004-2005',
'2005-2006','2006-2007','2007-2008','2008-2009','2009-2010');

t=title('Cycles annuels d'enneigement, Haut Atlas, 2000-2010');

set(t,'Fontweight','bold');

set(t,'FontSize',12);

print -depsc Cyc_ann_enneigement

print -djpeg Cyc_ann_enneigement

%% Date des premieres neiges

DatePremNeige=[];

for i=1:10

    datemin=datenum(2000+(i-1),10,1);

    datemax=datenum(2000+i,5,31);

    anmin=2000+(i-1);

    anmax=2000+i;

    w=find((DateSCANoCloud>=datemin) & (DateSCANoCloud<=datemax));

    nbdate=length(w);

    DateCur=DateSCANoCloud(w);

    SCACur=MSCA(w,:);

    com=sprintf('DatePremNeige%d=[];',i);

    eval(com);

    for j=1:nbpixatlas

        SCATimSerCur=SCACur(:,j);

        for k=1:nbdate

            if((SCATimSerCur(k)>30) & (SCATimSerCur(k)<=100))

                com=sprintf('DatePremNeige%d(j)=DateCur(k);',i);

                eval(com);

                break;

            end

        end

    end

end

end
```

```
end

figure(12)

subplot(5,2,i,'align')

DatePremNeigeImg=maskbvatlas;

com=sprintf('DatePremNeigeImg(wkeep)=DatePremNeige%d(:);',i);

eval(com);

imagesc(DatePremNeigeImg);

set(gca,'Clim',[datenum(anmin,10,1)-10 datenum(anmax,3,31)+10]);

w=find((DatePremNeigeImg>=datenum(anmin,10,1)) &
(DatePremNeigeImg<=datenum(anmax,3,31)));

DatePremNeige(i)=nanmean(DatePremNeigeImg(w));

B=colormap;

B(1,:)=1;

colormap(B);

p=colorbar;

set(p,'Ytick',[datenum(anmin,10,1) datenum(anmin,11,1)
datenum(anmin,12,1) datenum(anmax,1,1) datenum(anmax,2,1)
datenum(anmax,3,1) datenum(anmax,4,1)]);

set(p,'Yticklabel',['01/10';'01/11';'01/12';'01/01';'01/02';'01/03';
'01/04']);

end

%%

print -depsc DatePremieresNeige
print -djpeg DatePremieresNeige
print -dtiff DatePremieresNeige

load 'D:\MARCHANE\work\donnees_climat\NAO.txt'

moistxt=['Oct';'Nov';'Dec';'Jan';'Feb';'Mar'];

NAO=NAO(:,3);

RVECT=[];

PVECT=[];

for i=1:6
```

```
NAO_cor=NAO(i:12:length(NAO));
[r1j,p1j]=corrcoef(NAO_cor,SCAMax1j);
RVECT1j(i)=r1j(2,1);
PVECT1j(i)=p1j(2,1);
[r15j,p15j]=corrcoef(NAO_cor,SCAMax15j);
RVECT15j(i)=r15j(2,1);
PVECT15j(i)=p15j(2,1);
[rm1j,pm1j]=corrcoef(NAO_cor,SCAMean1j);
RVECTm1j(i)=rm1j(2,1);
PVECTm1j(i)=pm1j(2,1);
[rm15j,pm15j]=corrcoef(NAO_cor,SCAMean15j);
RVECTm15j(i)=rm15j(2,1);
PVECTm15j(i)=pm15j(2,1);
[rFS1j,pFS1j]=corrcoef(NAO_cor,DatePremNeige);
RVECTFS1j(i)=rFS1j(2,1);
PVECTFS1j(i)=pFS1j(2,1);

end

figure(13)
subplot(2,1,1)
p=plot(RVECT1j,'b-')
set(p,'linewidth',2);
hold on
set(gca,'Xlim',[1 6]);
set(gca,'Xtick',[1:6]);
set(gca,'Xticklabel',['Oct';'Nov';'Dec';'Jan';'Feb';'Mar']);
t=title('Correlation entre NAO mensuelle et Enneigement Maximum,
2000-2010');
set(t,'Fontweight','bold');
set(t,'FontSize',12);
ylabel('COEFFICIENT DE CORRELATION r');
set(gca,'Ylim',[-0.5 0.1]);
subplot(2,1,2)
```

```
p=plot(RVECTFS1j,'b-')
set(p,'linewidth',2);
hold on
set(gca,'Xlim',[1 6]);
set(gca,'Xtick',[1:6]);
set(gca,'Xticklabel',['Oct';'Nov';'Dec';'Jan';'Feb';'Mar']);
t=title('Correlation entre NAO mensuelle et Date des Premieres
Neiges, 2000-2010');
set(t,'Fontweight','bold');
set(t,'FontSize',12);
ylabel('COEFFICIENT DE CORRELATION r');
set(gca,'Ylim',[-0.7 0.1]);
print -deps Corr_NAO_SCA_sum
print -djpeg Corr_NAO_SCA_sum
```

- **Programme de calcul de la corrélation entre MODIS et VEGETATION**

```
clear all;
close all;
NameBV=['Rherhaya';'Ourika';'Rdat';'Zat';'Nfis'];
[nbBV,temp]=size(NameBV);
annees=[2001;2002;2003;2004];
[nbannee,temp]=size(annees);
anneesvgt=['2001-2002';'2002-2003';'2003-2004';'2004-2005'];
for i=1:nbBV
    SurTotMODIS_compall=[];
    SurTotVGT_compall=[];
    Datescommunes_all=[];
    for j=1:nbannee
        SurTotMODIS_comp=[];
        SurTotVGT_comp=[];
        strtrim(NameBV(i,:))
```

```
com=sprintf(' [DatesCommunes%d, SurTotMODIS_comp%d, SurTotVGT_comp%d] =
correl_savgvt (''%s'', %d, '%s''); ', anneer(j), anneer(j), anneer(j), anneer(j),
anneer(j), anneer(j), strtrim(NameBV(i, :)))

eval(com);
com=sprintf(' [DatesCommunes%d, SurTotMODIS_comp%d, SurTotVGT_comp%d] =
correl_savgvt (''%s'', %d, '%s''); ', anneer(j)+1, anneer(j)+1, anneer(j)+1,
anneer(j)+1, anneer(j)+1, anneer(j)+1, strtrim(NameBV(i, :)))

eval(com);

com=sprintf(' SurTotMODIS_comp=[SurTotMODIS_comp%d; SurTotMODIS_comp%d
]; ', anneer(j), anneer(j)+1);

eval(com);

com=sprintf(' SurTotVGT_comp=[SurTotVGT_comp%d'; SurTotVGT_comp%d'];
', anneer(j), anneer(j)+1);

eval(com);

com=sprintf(' dateTot=[DatesCommunes%d; DatesCommunes%d]; ', anneer(j), a
anneer(j)+1);

eval(com);

com=sprintf(' datestart=datenum(%d, 11, 1); ', anneer(j));

eval(com);

com=sprintf(' dateend=datenum(%d, 4, 30); ', anneer(j)+1);

eval(com);

w=find(dateTot>=datestart & dateTot<=dateend);

DatesCommunes_hydro=dateTot(w);

SurTotMODIS_comp=SurTotMODIS_comp(w);

SurTotVGT_comp=SurTotVGT_comp(w);

Datescommunes_all=[Datescommunes_all; DatesCommunes_hydro];

SurTotMODIS_compall=[SurTotMODIS_compall; SurTotMODIS_comp];

SurTotVGT_compall=[SurTotVGT_compall; SurTotVGT_comp];

com=sprintf(' save SCAVGTMODIS_%s Datescommunes_all
SurTotMODIS_compall SurTotVGT_compall; ', strtrim(NameBV(i, :)));

eval(com);

figure

Correl = corrcoef(SurTotVGT_compall, SurTotMODIS_compall);
```

```
plot(SurTotVGT_compall, SurTotMODIS_compall, 'p');
set(gca, 'Xlim', [0 500]);
set(gca, 'Ylim', [0 500]);
title(strtrim(NameBV(i, :)));
ylabel('MODIS');
xlabel('VGT');
hold on; plot(0:1500, 0:1500, 'k')
com=sprintf('text(50,450, 'r=%5.2f');', Correl(2,1));
eval(com);
com=sprintf('text(50,400, 'n=%d');', length(SurTotVGT_compall));
eval(com);
```