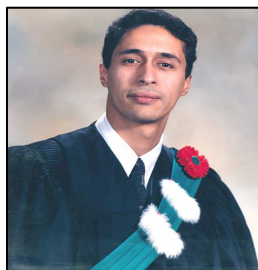




*Université Cadi Ayyad
Faculté des Sciences et Techniques
Marrakech Maroc*

MÉMOIRE

Présenté à la Faculté des Sciences et Techniques pour obtenir
La Licence es Sciences et Techniques
«Eau et Environnement»



en hommage à Monsieur Abdelhay BELKABIR

**Contribution à l'étude de la dynamique de l'enneigement dans le
Haut Atlas Maroc à l'aide des images haute résolution FORMOSAT 2
et du Modèle Numérique de Terrain par télédétection**

Présenté et soutenu par :
Aouade Ghizlane
Amar Hicham

Encadrement :
Lahoucine Hanich
Abdelghani Boudhar

Le 29 Juin 2010

Devant le jury composé de Messieurs :

H. Ibouh	Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech
L. Hanich	Professeur, Faculté des Sciences et Techniques, Marrakech
A. Boudhar	Chercheur associé à l'Institut de Recherche pour le Développement IRD
M. Le page	Ingénieur associé à l'Institut de Recherche pour le Développement IRD

Année universitaire 2009/2010

Remerciements

Au terme de ce travail, il est agréable de nous adresser à toute personne qui a participé de près ou de loin à son élaboration.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Mr Hanich Lahoucine Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences et Techniques, pour son encadrement, sa compréhension et son humanité.

Nous remercions Mr Michel le page, responsable de l'Institut de Recherche pour le Développement à Marrakech d'avoir accepté notre demande de stage.

Nos vifs remerciements s'adressent à Mr Boudhar Abdelghani, Chercheur associé à l'IRD, qui a dirigé ce travail dès les premiers jours de sa réalisation, en nous prodiguant de nombreux conseils et nous faisant profiter de sa large expérience professionnelle.

Nos remerciements à Mr Ibouh Hassan d'avoir accepté de juger ce travail.

Tous les enseignants du département des sciences de la terre, pour leur compétence scientifique, leur profond sens humain et leur sympathie.

Nous remercions également tous nos collègues et amis qui se sont toujours montrés courtois, aimables et coopératifs à notre égard.

C'est enfin, avec émotion que nous tiendrons à rendre un hommage chaleureux à nos parents, à nos frères pour leur sacrifice, leur amour et leur confiance. Ils nous ont sans cesse apporté le soutien moral, matériel, et financier durant toutes nos années d'études.

Sommaire

Liste des figures	5
Liste des tableaux	7
Liste des abréviations	8
Résumé	9
Introduction	10
Chapitre I : Caractéristiques physiographiques et hydro-climatiques de la zone d'étude	11
1.Contexte général de la région d'étude	11
2.Les critères physiographiques de la région d'étude	13
2.1.Le modèle numérique de terrain.....	13
2.2.Les paramètres physiographiques	15
i.La pente	15
ii.Les altitudes	15
iii.Les expositions des versants	16
3. Caractéristiques hydro-climatiques de la région d'étude	17
3.1.Données nivales.....	19
3.2.La température.....	20
3.3.L'humidité relative	21
3.4.Le rayonnement global	22
3.5.la vitesse du vent	23
3.6.les précipitations.....	24
3.7.Débit	25
Chapitre II : Eléments bibliographiques sur les données de la télédétection	31
1.Définition de la télédétection	31
2. Satellites et capteurs	31
2.1.Caractéristiques d'un satellite : orbites et fauchée	32
3. Le spectre électromagnétique	34
4. Résolution spatiale	35
5. Définition de la réflectance	35
5.1.1.Effet directionnel	35
5.1.2.Effet atmosphérique	36
5.1.3.Effet géométrique :(effet topographique).....	37
6. Interaction Rayonnement – cible.....	37
7. Les types de classifications utilisés en télédétection.....	38
7.1.Classification supervisée	38
7.2.Classification non supervisée	39
Chapitre III : Matériel de travail et traitement des données	40
1. Données et outils de traitement	40
1.1.Données FORMOSAT-2	40
1.2. Le logiciel ENVI	41
2. Analyse de la réflectance.....	42
2.1.Réfléctance de la neige	42
2.2.Effet de l'angle d'élévation solaire	44
2.3.Réfléctance en fonction des altitudes	46
2.4.Réfléctance en fonction des expositions	48
3. Classification de la neige.....	49
4. Correction des effets topographiques	53
5. Suivi de la neige selon la topographie.....	55
5.1. Variation du pourcentage de la neige en fonction de l'altitude.....	55

5.2. Variation du pourcentage de la neige en fonction de l'exposition.....	55
Chapitre IV : Relation entre l'enneigement et les paramètres hydro-climatiques	57
1.Introduction	57
2.Effet de la température	57
3.Comparaison « Neige-Pluies-Hauteurs de la neige».....	58
4.Comparaison « Neige-Rayonnement global »	59
5.Comparaison « Neige- Humidité relative ».....	60
6.Comparaison « Neige-Vitesse du vent »	61
7.Comparaison « Neige- Débit ».....	62
8.Corrélation entre la surface de la neige et tous les facteurs climatiques.....	63
Conclusion.....	66
Annexe	69

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude	12
Figure 2 : Image satellite FORMOSAT 2 de la zone d'étude	12
Figure 3: le MNT SRTM80 à gauche (a) et SRTM8 à droite (b).....	14
Figure 4: Variation du pourcentage des surfaces selon le degré de la pente.....	15
Figure 5: variation des pourcentages des surfaces selon les tranches d'altitude.....	16
Figure 6: répartition des expositions des versants de la zone d'étude.	16
Figure 7: localisation des stations météorologiques et hydrométriques sur le bassin versant de la Rheraya.....	18
Figure 8 : station météorologique d'Oukaimden installée à une altitude.....	19
Figure 9: Variation des quantités annuelles des pluies et neiges mesurées dans la station d'Oukaimden CAF depuis 1988 (Boudhar 2009)	20
Figure 10: Variation de la température moyenne journalière en montagne durant la période 01/01/2009 à 30/06/2009.....	21
Figure 11: Variation des moyennes journalières de l'humidité relative en % (01/01/2009-30/06/2009).	22
Figure 12: Variation des moyennes journalières de rayonnement globale en W/m^2 (01/01/2009-30/06/2009).	23
Figure 13: Variation des moyennes journalières des vitesses du vent en m/s (01/01/2009-30/06/2009).	24
Figure 14: Variation des précipitations mensuelles en mm (01/01/2009-30/06/2009).....	25
Figure 15: Limnigramme journalier à la station de Tahnaout (01/01/2009-30/06/2009).	26
Figure 16: Hauteurs d'eaux instantanées à la station de Tahnaout (01/01/2009-30/06/2009).	26
Figure 17: Courbe de tarage 01/01/2009 jusqu'à 14/03/2009.....	27
Figure 18: Courbe de tarage 15/03/2009 jusqu'à 30/06/2009.....	28
Figure 19: Débits journaliers à la station de Tahnaout (01/01/2009-01/06/2009).	28
Figure 20: Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuelles au niveau du sous bassin de la Rhéraya.....	30
Figure 21 : les paramètres de la télédétection (CCT).....	31
Figure 22: photo d'un satellite	32
Figure 23: Les différents types d'orbites (CCT).	32
Figure 24: fauchée d'un capteur (CCT)	33
Figure 25: Schéma du fonctionnement d'un capteur passif	33
Figure 26: Schéma du fonctionnement d'un capteur actif	34
Figure 27: Spectre du rayonnement et transparence de l'atmosphère.....	34
Figure 28: l'effet directionnel (Julien 2006)	36
Figure 29: Perturbations atmosphériques	36
Figure 30: interaction rayonnement - cible (CCT).....	37
Figure 31: Algorithme de classification (Girard 1999).....	39
Figure 32: Les 14 orbites héliosynchrones du satellite FORMOSAT-2	40
Figure 33: réflectance de la neige selon les longueurs d'ondes des bandes spectrales de FORMOSAT 2.	42
Figure 34: Caractères optiques de la neige (Réflectance)	43
Figure 35: Réflectance des nuages et de la neige.	44
Figure 36: Schéma des Angle Solaire	45
Figure 37: variation de la réflectance en fonction des altitudes	47

Figure 38: Réflectance de la végétation et de l'eau selon les longueurs d'ondes (CCT).....	47
Figure 39: Variation de la réflectance en fonction de l'exposition	49
Figure 40: superposition des bandes pour éviter l'effet des nuages.....	50
Figure 41: classification des zones éclairées enneigées (en jaune) et des zones ombragées enneigées (en rouge) selon la date (03/02/2009).....	52
Figure 42 : classification des zones éclairées enneigées (en jaune) selon la date (1/6/2009) ..	52
Figure 43 : diminution du couvert neigeux entre le 8 et le 12 février 2009 vue par le satellite FORMOSAT2.	53
Figure 44 : Principe de correction de l'effet de pente	53
Figure 45: profil de variation des surfaces enneigées en pourcentage en hivers de 2009 avec les données FORMOSAT	54
Figure 47: variation du pourcentage de la neige en fonction des expositions.....	56
Figure 48: variation de la surface de la neige en fonction de la température.....	58
Figure 49: variation de la surface de la neige en fonction des précipitations.	58
Figure 50: variation de la surface de la neige en fonction des hauteurs de la neige.	59
Figure 51: variation de la surface de la neige en fonction du rayonnement global.....	60
Figure 52: variation de la surface de la neige en fonction de l'humidité relative.	61
Figure 53: variation de la surface de la neige en fonction de la vitesse du vent.	62
Figure 54: variation du débit en fonction de la surface de neige	63
Figure 55 : corrélation entre la surface de neige et les paramètres climatiques	65

Liste des tableaux

Tableau 1: caractères du Datum Merchich.....	14
Tableau 2: Paramètres du MNT SRTM avant et après re-échantillonnage.....	14
Tableau 3: résumé des données physiographiques de la région d'étude.....	17
Tableau 4: Altitudes des stations météo utilisées.....	18
Tableau 5: Résumé des instruments de mesure des données dans les stations météorologiques	19
Tableau 6: les lames d'eau écoulée et des pluies mensuelles (janv2009-juin2009).	29
Tableau 7: capteurs spatiales les plus applicables dans la détection de la neige avec les données de spectre électromagnétique (visible+ PIR)	35
Tableau 8: caractéristiques du satellite FORMOSAT 2 (www.satimagingcorp.com).....	41
Tableau 9: bandes spectrales de satellite FORMOSAT 2(www.satimagingcorp.com)	41
Tableau 10: calcul de l'angle solaire ainsi que l'azimuth	45
Tableau 11: répartition des classes d'altitudes au niveau de la zone d'étude	46
Tableau 12: Répartition des tranches d'exposition au niveau de la zone d'étude.....	48
Tableau 13: Avantages et inconvénients des types de classification (Girard 1999)	49

Liste des abréviations

ABHT : Agence de Bassin Hydraulique de Tensift

CAF : Club Alpins Français

CCT : Centre Canadien de Télédétection

ENVI: ENvironment Visualizing Images

HVR : Haute Résolution de Visible

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

MNT : Modèle Numérique de Terrain

MSS: Multispectral Scanner System

NASA: National Aeronautics and Space Administration

NSOP : Nation Spatiale Organization

OROMVAH : Office Régional de Mise en Valeur Agricole de Haouz

PIR: Proche infrarouge

ROI: Region Of Interest

SCA: Snow Cover Areas

TM: Thematic Mapper

VGT: Végétation

Résumé

Dans les plaines arides et semi-arides entourant la chaîne du Haut Atlas, les ressources en eau sont rares et connaissent une exploitation intensive sous l'effet de l'augmentation de la population, activités agricoles et tourisme. En vue de la quantité des précipitations tombées, ces montagnes constituent un véritable château d'eau pour la région. En hiver, ces précipitations sont à la fois sous la forme liquide et solide. Malgré cette importance, la neige dans cette région est peu étudiée. Les données acquises par les satellites de haute résolution spatiale et de haute répétitivité temporelle peuvent être appropriées pour le suivi spatial et temporel de la couverture neigeuse afin de mieux évaluer les ressources hydriques en aval.

L'objectif de cette étude est d'estimer la couverture neigeuse et de suivre son évolution spatio-temporelle à l'aide d'une série de 19 images FORMOSAT2 à haute résolution spatiale (8*8m), et une répétitivité temporelle journalière. En plus de faire une analyse de lien entre l'enneigement et les facteurs hydro-climatiques. Ces images couvrent une surface de 576 Km² et sont réparties sur la période de Janvier à Juin 2009.

La méthodologie adoptée consiste en première phase à déterminer les caractéristiques physiographiques de la zone d'étude (pentes, altitudes, expositions) à l'aide de Modèle Numérique de Terrain, en deuxième phase de détecter la neige à l'aide des images FORMOSAT2. Dans cette phase de traitement, on a effectué une classification supervisée neige/non neige, afin de quantifier la surface du couvert neigeux sur la zone d'étude, suivi par un calcul de la surface neigeuse globale, selon les tranches d'altitude, les pentes et selon l'exposition en utilisant un modèle numérique de terrain de la zone étudiée. La troisième phase est pour but de valider les résultats obtenus, pour cela nous avons comparé les profils des surfaces calculées avec les précipitations liquides et les épaisseurs de la neige mesurées à la station d'Oukaimden à 3226 mètres d'altitude. Cette comparaison montrera ainsi une cohérence entre l'enneigement et les facteurs climatiques.

Cette étude reflète l'intérêt de la télédétection pour l'observation à long terme de la variabilité de l'enneigement dans des régions peu accessibles.

Mots-clés : FORMOSAT 2, dynamique neigeuse, Haut Atlas de Marrakech, Maroc, Télédétection.

Introduction

La neige est considérée comme une importante ressource d'eau dans les zones montagneuses. Elle est la principale source d'eau par la recharge des nappes, le remplissage des barrages et l'alimentation des canaux traditionnelles (seguias). Au Maroc, le Haut Atlas reçoit une grande quantité des précipitations essentiellement sous forme de neige, et joue le rôle de réservoir d'eau pour les plaines arides avoisinantes. C'est le cas de la plaine du Haouz dans la région de Marrakech où les ressources en eau sont exploitées d'une manière intense du fait du développement de l'activité agricole, du tourisme et de l'accroissement démographique. Devant cette situation, la gestion durable de ces ressources est une priorité pour les autorités locales.

Afin de mieux évaluer les apports en eau, il est important de bien comprendre et étudier les composantes du cycle hydrologique. Dans cette zone, la neige est l'un de ses principaux composants.

L'observation du couvert neigeux, l'accumulation de la fonte des neiges, l'estimation de la contribution de la fonte aux débits des oueds : tout cela fait l'objet d'une recherche menée dans le cadre du projet de Sud Med par les chercheurs de l'IRD et leurs partenaires marocains. L'un des objectifs posés par le projet est d'évaluer les ressources en eau disponibles en montagne.

Dans ce cadre, les données de la télédétection sont essentielles. Elles permettent de quantifier la dynamique spatiale et temporelle du couvert neigeux dans les hautes altitudes du Haut Atlas. Elles permettent aussi d'obtenir des observations régulièrement distribuées dans le temps et dans l'espace. Compte tenu de la rapidité de la fonte des neiges, sous l'effet de l'aridité du climat, la majorité des satellites actuels n'ont pas toujours des caractéristiques de revisite et de résolution nécessaires pour suivre l'évolution de couvert neigeux. Dans ce travail, les données issues du satellite FORMOSAT2 ont été utilisées pour cartographier le couvert nival dans le Haut Atlas de Marrakech. Le satellite taiwanais FORMOSAT2 permet de suivre les surfaces enneigées avec une haute résolution et une visite quotidienne.

Chapitre I : Caractéristiques physiographiques et hydro-climatiques de la zone d'étude

1. Contexte général de la région d'étude

Le Haut Atlas marocain est une chaîne montagneuse d'environ 60 km de large sur 800 km de long, orientée NE-SW. Il est le plus haut sommet de l'Afrique du Nord. Du point de vue géologique, le massif atlasique se caractérise par des formations calcaires perméables peu réponsus et des formations marno- gréseuses très peu perméables dans la partie orientale du bassin versant de Tensift. Dans les parties les plus hautes de la chaîne, les formations métamorphiques imperméables prédominent (Boudhar 2009).

Le relief du Haut Atlas se divise en trois entités différentes, d'ouest en est, le Haut Atlas occidental, le Haut Atlas central et le Haut Atlas oriental.

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 4 167 mètres.

Le Haut Atlas central est un massif essentiellement calcaire, morphologiquement dominé par des zones tabulaires culminant à 2 500 mètres d'altitude. Le Jbel M'Goun (4 068 mètres) est le sommet le plus haut de cette partie du Haut Atlas.

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 (3 747 mètres) à Imilchil (province d'Errachidia), où se trouvent le jbel Saghro. L'altitude s'affaiblit vers l'est, où débute le domaine des hamadas (zone présaharienne). (<http://fr.wikipedia.org>).

La partie centrale du Haut Atlas de Marrakech limite la plaine du Haouz au Nord, Souss au Sud et les vallées de Draa et Dades au Sud Est (Figure 1). Le Haut Atlas est considéré comme un véritable réservoir d'eau de ces régions : en moyenne annuelle durant la période de 1970-2003, les précipitations étaient de l'ordre de 536mm à la station d'Aghbalou dans le bassin versant de Tensift. Le réseau des oueds prenant naissance au cœur de la chaîne joue un rôle important dans la recharge des nappes et l'alimentation des barrages en aval.

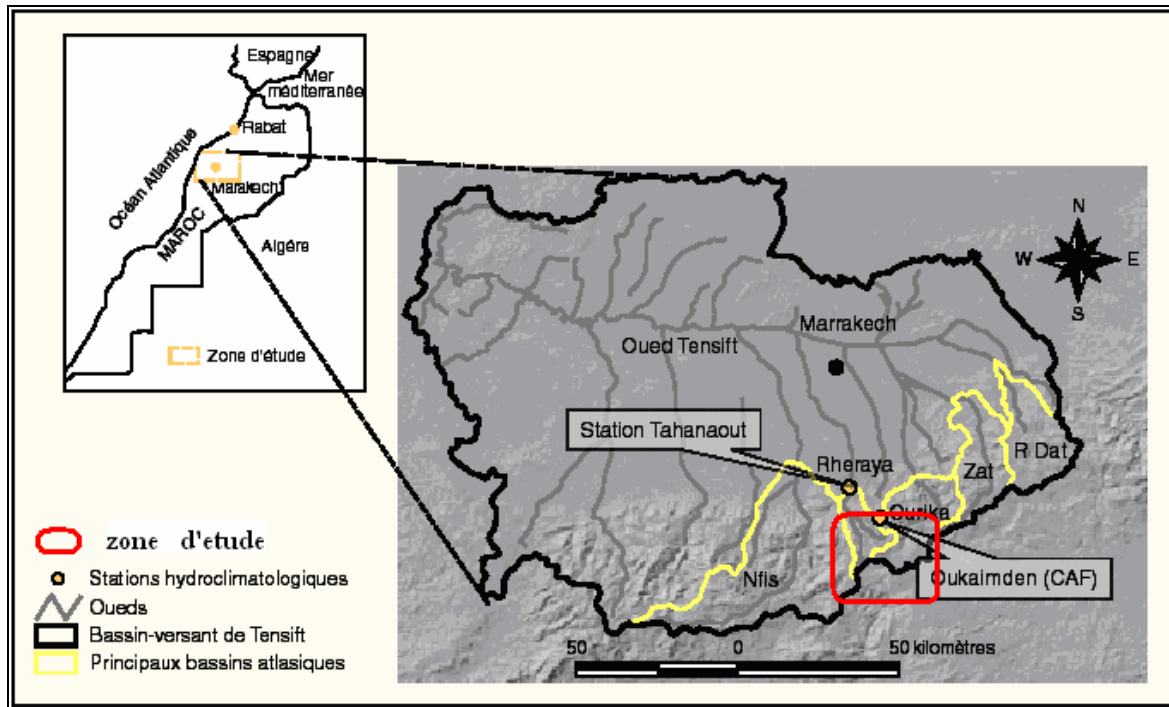


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude

Le présent travail se focalise sur une zone de 24km de large, 24 km de longueur et de 576 Km² de superficie, même surface que la scène FORMOSAT2. Elle se situe à une trentaine de kilomètres au Sud de la ville de Marrakech entre les latitudes 31° et 31°15'N Nord et les longitudes 8°05' et 7°45' Ouest.

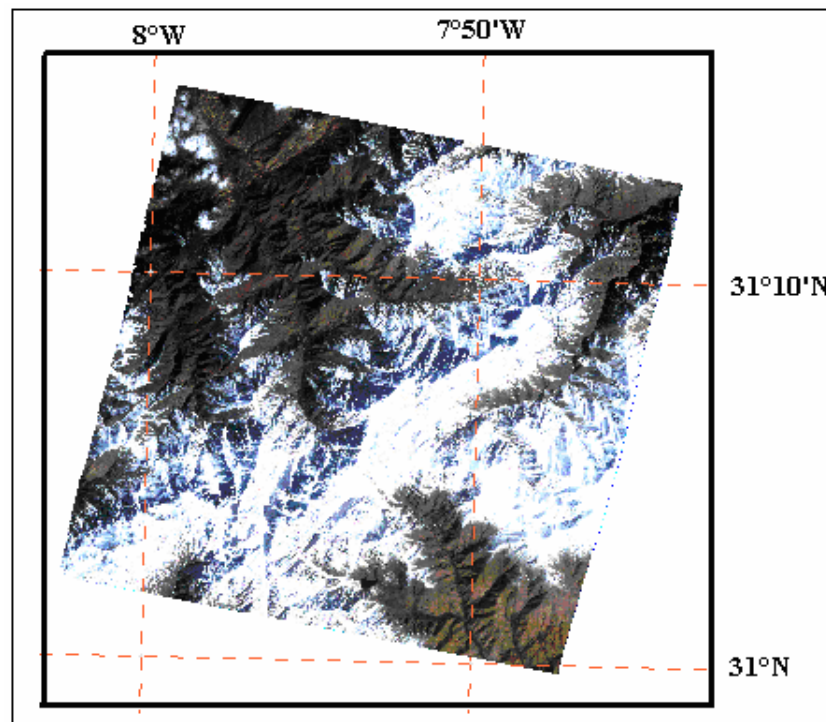


Figure 2 : Image satellite FORMOSAT 2 de la zone d'étude

2. Les critères physiographiques de la région d'étude

L'étude physiographique de la zone d'étude renseigne sur les modalités de l'écoulement superficiel et notamment sur le régime d'écoulement en période de crue ou d'étiage.

Ces caractères sont extraits d'un Modèle Numérique du Terrain (MNT) de 80 de résolution et ces dérivés (cartes des pentes, expositions et ombre).

2.1. Le modèle numérique de terrain

L'analyse de la morphologie de la zone d'étude constitue une partie importante pour la compréhension de son fonctionnement hydrologique. Ces caractéristiques interviennent dans les modalités de l'écoulement superficiel.

Un modèle numérique de terrain représente la topographie d'une zone terrestre. Selon la zone couverte, les MNT utilisent un maillage carré pour les petites zones et un maillage pseudo carré pour les grandes zones dont les méridiens et les parallèles sont des cotés où les pixels dans représentant les altitudes dans le Modèle Numérique de Terrain.

Trois caractéristiques principales permettent d'avoir une idée sur un modèle numérique de terrain:

- Sa résolution, c'est-à-dire la distance entre deux points adjacents du MNT ; taille de pixel en m².
- Sa couverture géographique : les zones géographiques pour lesquelles des données sont disponibles (80 % des terres émergées) ;
- La qualité des données : elle dépend de l'application ou non de traitement de correction des données après leur récupération.

Il permet de calculer les surfaces et les volumes ainsi de manipuler d'une manière quantitative le terrain étudié.

Le MNT utilisé pour cette étude fournit les altitudes sur le Haut Atlas et est de type SRTM (**Shuttle Radar Topography Mission**) .Afin d'utiliser ce MNT pour notre région d'étude, nous l'avons projeté en Lambert Nord Maroc Zone I , Datum Merchich. Les caractéristiques de ce dernier sont décrites dans le tableau suivant (Tableau 4). Un ré-échantillonnage du MNT à la même résolution des images FORMOSAT a été réalisé (Figure3), ensuite une extraction des cartes des pentes, expositions et des ombres était nécessaire. Ces cartes ont servi pour analyser la dynamique spatiale de l'enneigement.

Projection	Lambert_Nord_Maroc Zone I (conique_conforme)
DATUM	Merchich
Clarke	1880
False Easting	500000
False Northing	300000
Central Meridian	-5.4
Standard_Parallel_1	31.727866
Standard_Parallel_2	34.871727
Latitude d'origine	33.33

Tableau 1: caractères du Datum Marocain Merchich

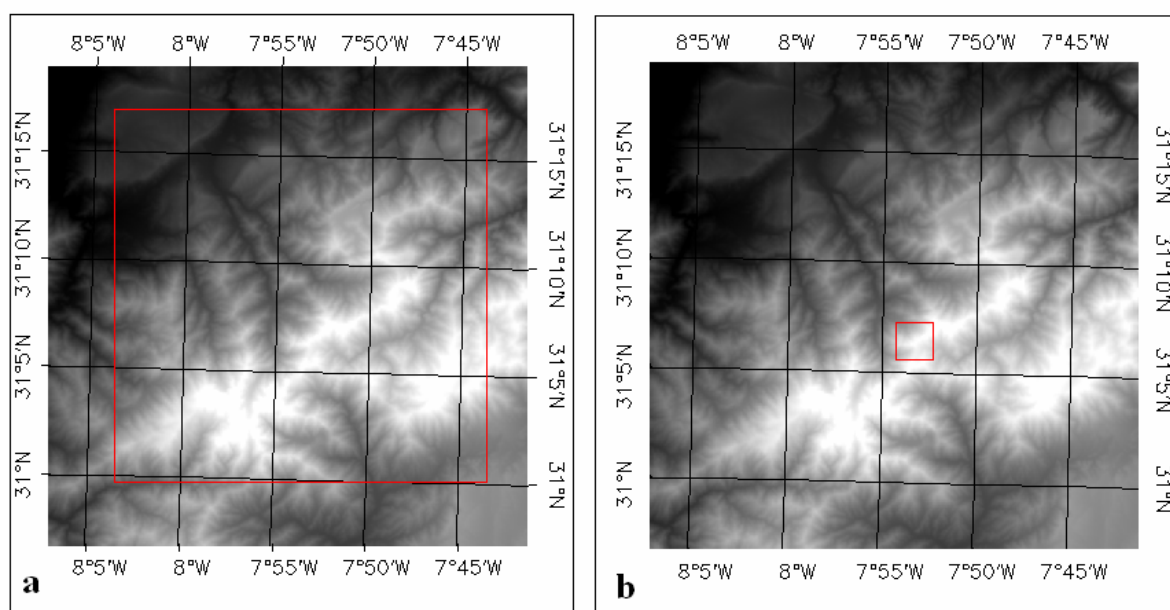


Figure 3: le MNT SRTM80 à gauche (a) et SRTM8 à droite (b)

La différence entre les critères du MNT avant et après ré-échantillonnage est représentée dans le tableau 2 :

Critères	MNT SRTM avant ré-échantillonnage	SRTM après ré-échantillonnage
Résolution spatiale	80m*80m	8m*8m
Nombre de lignes	514	5120
Nombre de colonnes	514	5120

Tableau 2: Paramètres du MNT SRTM avant et après ré-échantillonnage

2.2. Les paramètres physiographiques

Le MNT est utilisé pour calculer les caractéristiques topographiques telles que la pente, les expositions des versants et les cartes d'ombres.

i. La pente

La pente a une relation étroite avec la vitesse d'écoulement de l'eau. Les pentes faibles engendrent plus d'infiltration de l'eau que les pentes fortes qui sont caractérisées par les ruissellements avec caractère torrentiel et par conséquent un grand débit.

On note que pour le cas de notre zone d'étude, le degré de la pente le plus dominant est compris entre 50 et 60° (Figure 4).

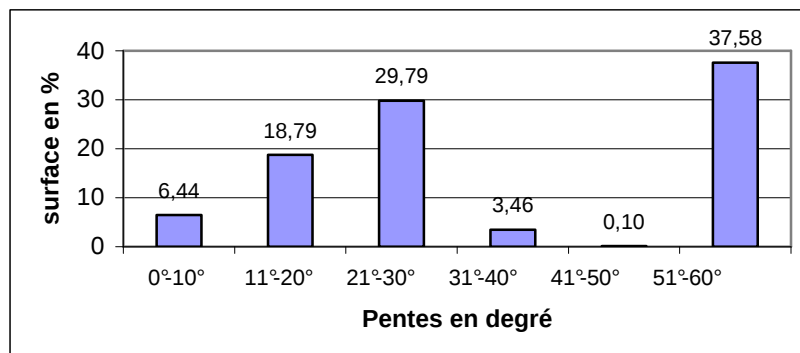


Figure 4: Variation du pourcentage des surfaces selon le degré de la pente.

ii. Les altitudes

Les altitudes donnent une idée sur la morphologie de la zone d'étude, et jouent un rôle sur la nature et l'intensité des précipitations. Ces derniers ont une relation étroite avec le débit enregistré à l'exutoire du bassin. La figure ci-dessous (Figure5) montre la répartition du pourcentage des surfaces selon des tranches d'altitude allant de 500 jusqu'à 3300m. On remarque que les tranches d'altitudes comprises entre 2500m et 2900m sont les plus dominantes sur la zone d'étude.

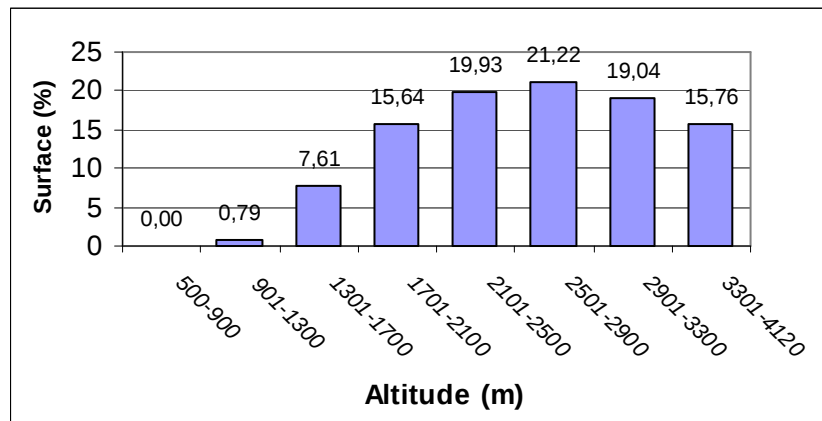


Figure 5: variation des pourcentages des surfaces selon les tranches d'altitude.

iii. Les expositions des versants

Les expositions sont les angles d'orientation des versants par rapport au Nord. Ce facteur détermine la durée d'ensoleillement et l'intensité des radiations reçus par unité de surface. Dans le cas du Haut Atlas, ces paramètres sont plus contrastés. La diminution du rayonnement solaire dans les zones qui sont dans l'ombre permet de conserver l'humidité du sol et diminue le pouvoir évaporant de l'air. Ce paramètre a une grande influence sur le processus de la fonte des neiges. Le graphe représenté sur la figure 6 présente la répartition des classes d'exposition dans la zone d'étude (Nord, Est, Sud et Ouest). On remarque que les expositions Ouest sont les plus dominantes avec un pourcentage de 30%, alors que les autres expositions (Nord, Est, Sud) varient entre 22% et 25%.

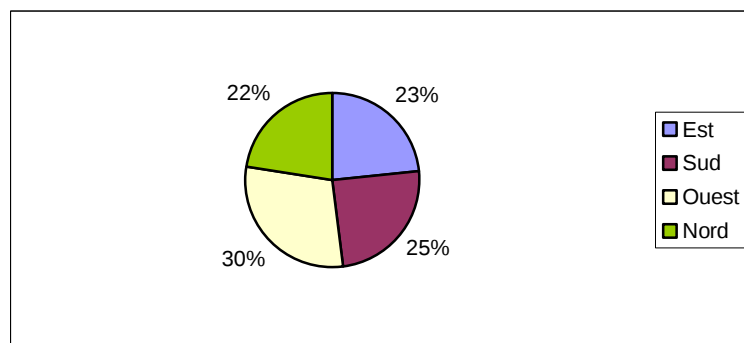


Figure 6: répartition des expositions des versants de la zone d'étude.

Le tableau ci-dessous (Tableau3) résume les caractéristiques physiographiques de la zone d'étude :

Zone d'étude	Surface en (Km²)	Périmètre en (Km)	Altitude max (m)	Exposition Dominante
	576	96	4120	Ouest

Tableau 3: résumé des données physiographiques de la région d'étude

3. Caractéristiques hydro-climatiques de la région d'étude

Le climat de la zone d'étude est classé semi aride et influencé par la présence du relief. Les données climatiques issues des stations météorologiques installées dans la région d'étude ont été utilisées. A partir de ces données une description de la répartition spatiale et temporelle des températures et des précipitations dans la région a été effectuée. Les stations utilisées pour collecter les données ont été installées dans le cadre du projet Sud Med et sont représentées sur la figure ci-dessous (Figure7). Il s'agit de la station d'Oukaimden, Tachdert, Armed, Neltner, Imskerbour et Asni réparties sur le bassin versant de Rhéraya. Les altitudes de ces stations sont présentées dans le tableau 4.

Les paramètres climatiques sont mesurés automatiquement à un pas de temps semi horaire. Le tableau 5 résume les différents instruments de mesures de température de l'air, précipitations, vitesse du vent, rayonnement globale et humidité de l'air.

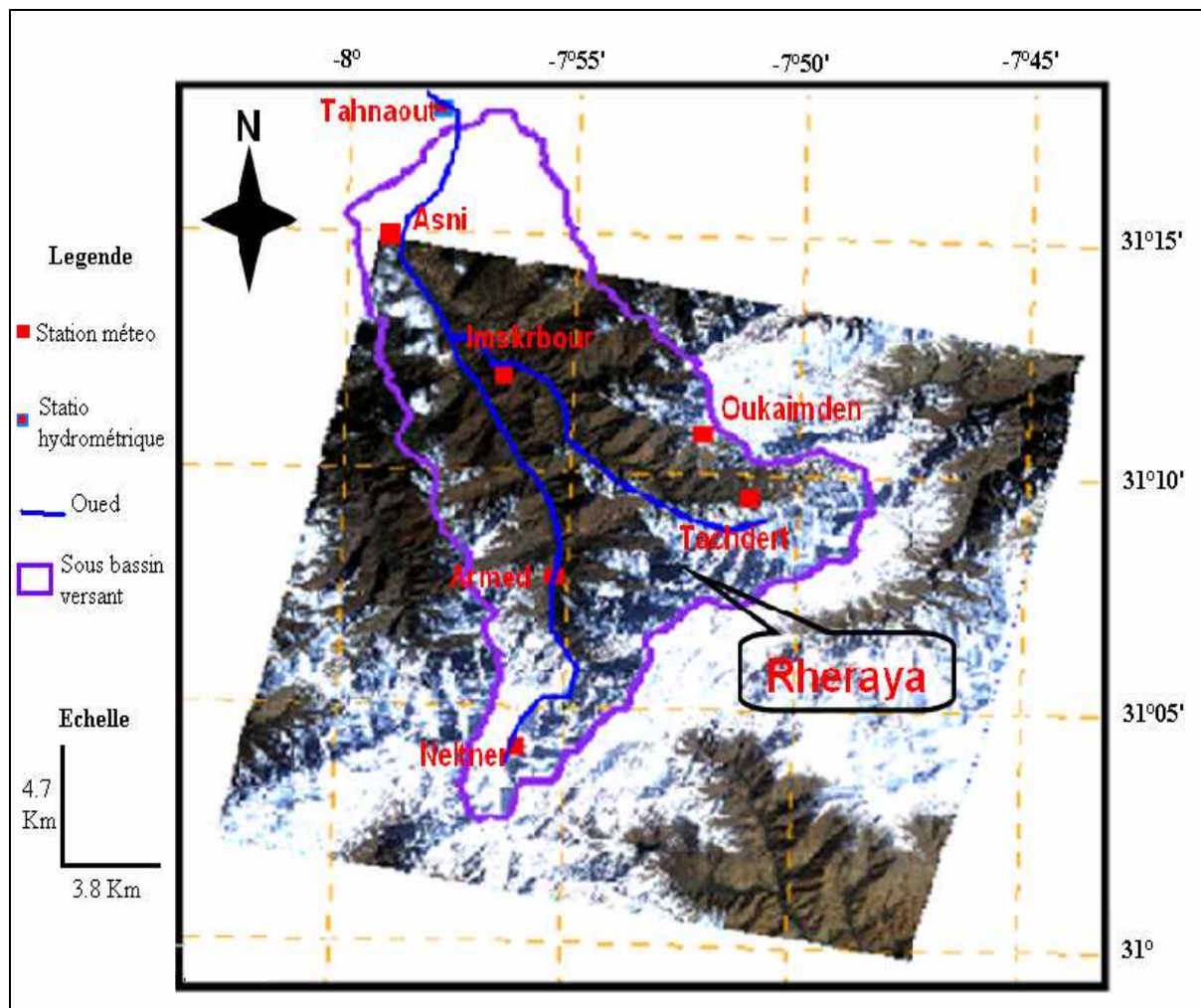


Figure 7: localisation des stations météorologiques et hydrométriques sur le bassin versant de la Rheraya

Station	Altitude en m
Oukaimden	3226
Tachdert	2350
Armed	1970
Neltner	3184
Imskerbour	1422

Tableau 4: Altitudes des stations météorologiques utilisées.

Données météorologiques	Instrument	Unité
Hauteur de la neige	Sonde ultrasonique	M
Température de l'air	Thermo sonde	°C
Rayonnement global	Pyranomètre	W/m2
Vitesse du vent	Anémomètre	m/s
Humidité relative	Hygromètre à condensateur	%
pluie	Pluviomètre à augets basculeurs	Mm

Tableau 5: Résumé des instruments de mesure des données dans les stations météorologiques

3.1. Données nivales

La station nivo- météorologique d'Oukaimden est installée à une altitude de 3200 mètres près (Figure 8), celle-ci comprend des instrument 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.

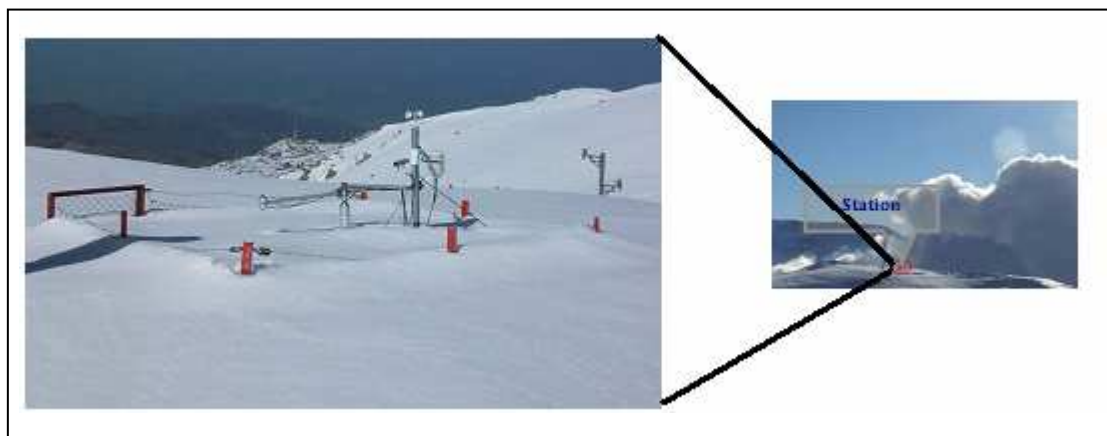


Figure 8 : station météorologique d'Oukaimden installée à une altitude de 3200 m (Boudhar 2009)

L'analyse d'une longue série des données des précipitations enregistrées au niveau de la station d'Oukaimden CAF, situé à 2600 mètres d'altitude, montre que le pourcentage de la neige depuis l'année 1988 jusqu'à 2002 peut atteindre 80% des précipitations totales (Figure 9). C'est pour cela que la chaîne du Haut Atlas est considérée comme un château d'eau pour la région (Boudhar 2009).

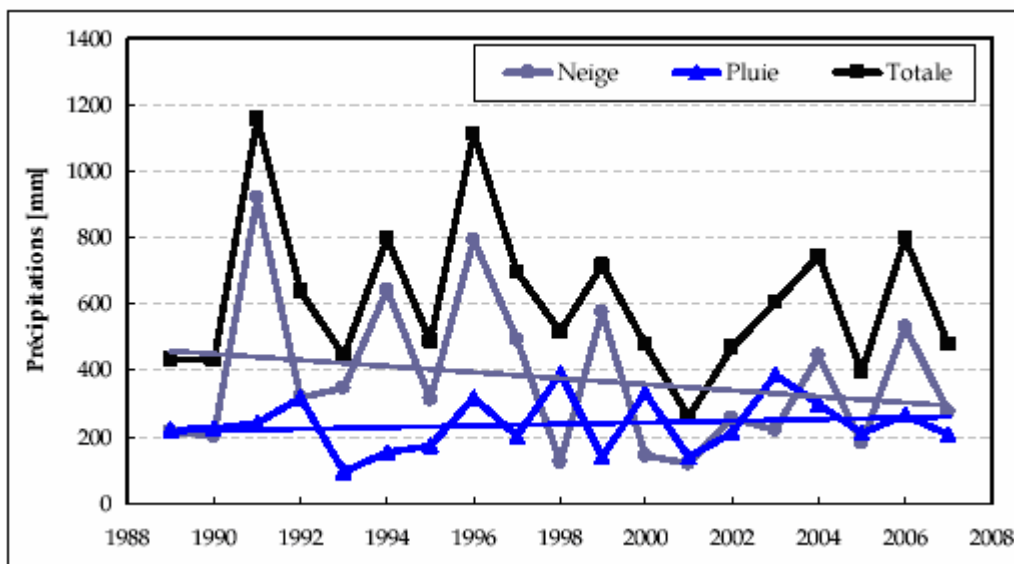


Figure 9: Variation des quantités annuelles des pluies et neiges mesurées dans la station d'Oukaimden CAF depuis 1988 (Boudhar 2009)

3.2. La température

La température est un facteur climatique beaucoup plus régulier à l'échelle temporelle, généralement maximale durant les mois d'été, et minimale durant les mois d'hiver. Cette variation de la température influence sur le taux d'évaporation et alors sur la quantité d'eau issue de la fonte des neiges. La figure 10 illustre la variation de la température moyenne journalière enregistrée au niveau de trois stations en montagne durant la période d'étude, entre 1 janvier et 30 juin 2009. Il s'agit de la station d'Imkerbour, Armed et Oukaimden où les altitudes sont 1422, 1970 et 3226 mètres respectivement. On constate que la température est liée étroitement à l'altitude, elle diminue avec l'augmentation de l'altitude. Le gradient moyen calculé entre les trois stations est de $-0.59^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. De janvier à juin, la température a une tendance générale à l'augmentation. Les valeurs minimales sont enregistrées en mois de janvier et sont en dessous de 5°C en générale, avec des températures plus basses (jusqu'à -10°C) à Oukaimden. Alors que les valeurs maximales atteignent environ 25°C en basse altitude (station d'Imkerbour) et moins de 10°C en haute montagne (station d'Oukaimden).

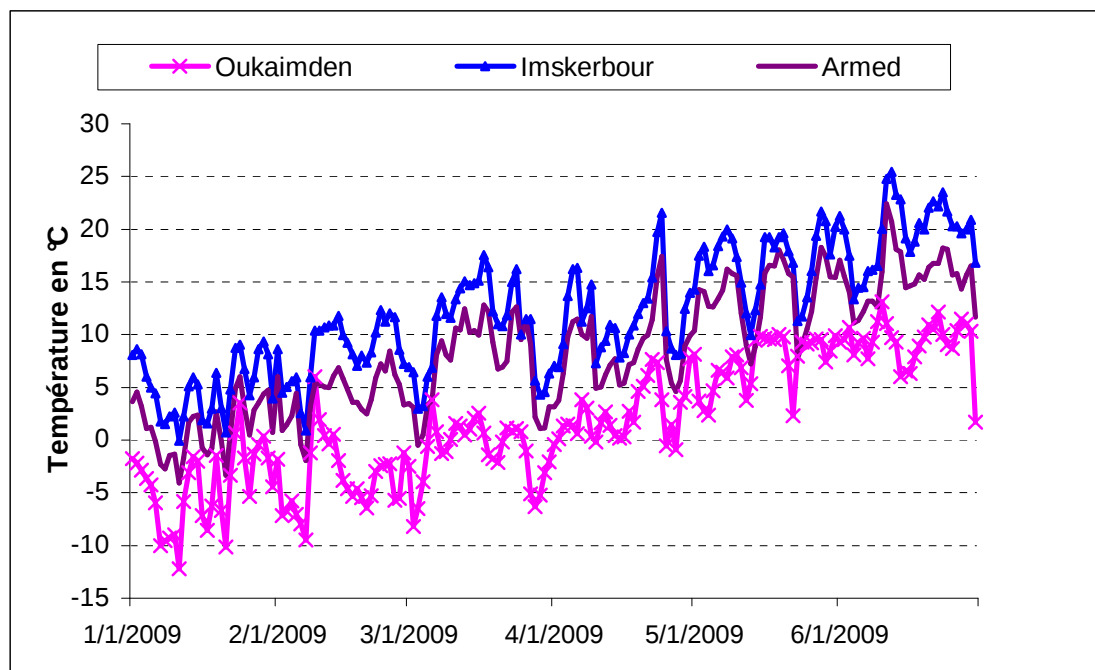


Figure 10: Variation de la température moyenne journalière en montagne durant la période 01/01/2009 à 30/06/2009.

3.3. L'humidité relative

L'humidité relative compare la quantité d'eau présente dans l'air à la quantité qu'il faudrait pour saturer cet air à une température donnée. Entre autres, elle nous renseigne sur la possibilité de formation de nuages et de précipitations.

La variation de l'humidité relative dans les mêmes stations abordées pour la température entre le mois de janvier au mois de juin de l'année 2009 montre des chutes et des augmentations brusques et répétitives de l'humidité relative pendant le même mois (Figure 11). Le maximum de pourcentage de l'humidité atteint les limites de 90% et un minimum de 10% durant la période étudiée. Ceci fait que l'air devient de plus en plus humide et alors se sature en particules liquides et donne naissance à des précipitations. D'une station à autre, on note aussi une hétérogénéité très marquée, cela peut être expliqué par l'effet de l'altitude et peut refléter la variabilité des conditions météorologiques même à l'échelle du bassin versant, c'est la caractéristique d'un climat aride.

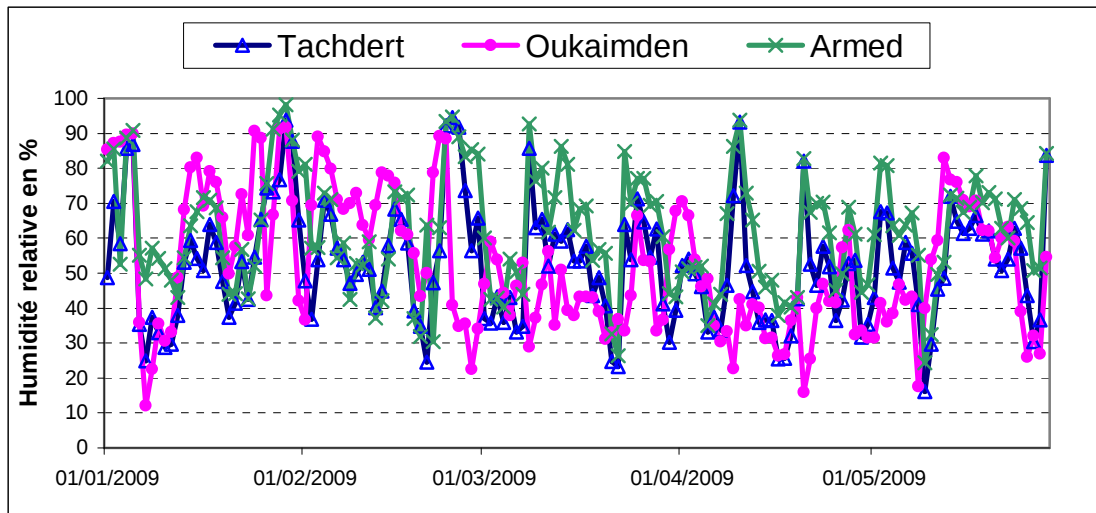


Figure 11: Variation des moyennes journalières de l'humidité relative en % (01/01/2009-30/06/2009).

3.4. Le rayonnement global

Le rayonnement global correspond à l'éclairement énergétique d'une surface horizontale unitaire pendant une période donnée.

Le flux énergétique ou la puissance s'exprime par le relation suivante : $\phi = d\phi / dt$

Emittance ou le pouvoir émissif est la puissance émise dans un hémisphère par unité de surface de la source : $M = d\phi / ds$.

Pour notre cas d'étude et selon la figure ci-dessous (Figure12), on peut constater que ce rayonnement varie légèrement d'une date à une autre et atteint son maximum pendant la période d'été (400 W/m²), suite à l'important angle que forment les rayons du soleil avec le sol durant cette période. Par contre, en hiver le rayonnement a des valeurs faibles (varient de 50 à 300 W/m²). Cela est du à la position de la terre par rapport au soleil pendant l'hiver car l'angle de rayonnement sur le sol diminue en hiver et augmente en été. Entre les deux stations étudiées (Oukiamden et Armed), les rayonnements reçus sont plus importants en haute altitude (3200 m) qu'au moyen altitude (2600). La diminution de la couche atmosphérique avec l'augmentation de l'altitude engendre le passage de plus de rayonnement.

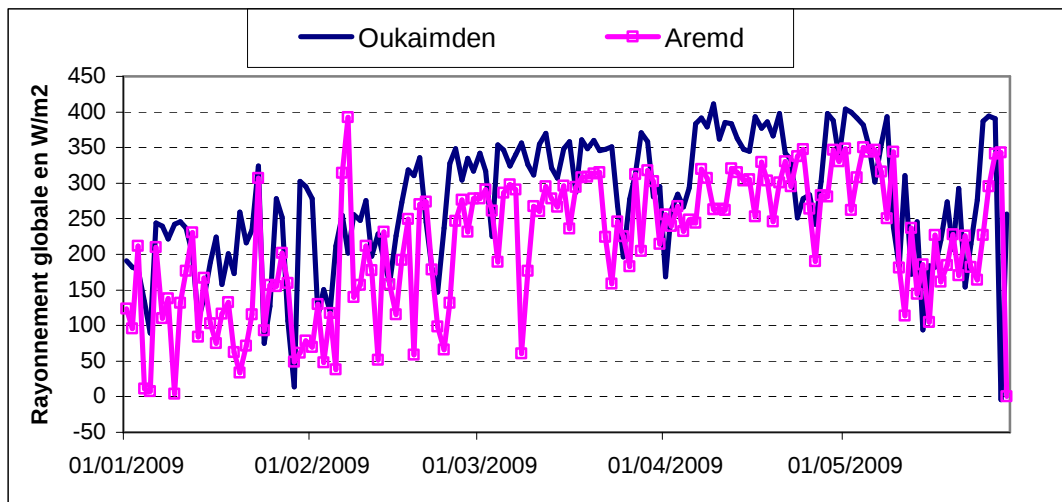


Figure 12: Variation des moyennes journalières de rayonnement globale en W/m^2 (01/01/2009-30/06/2009).

3.5. la vitesse du vent

La vitesse du vent est exprimée en m/s et mesurée via un anémomètre. Elle est considérée comme variante et surtout grande au niveau de la station d'Oukaimden et atteint son maximum en hivers (Figure13). Ce paramètre a un effet intéressant sur le déplacement de la neige pendant et après sa chute.

On voit clairement que la vitesse du vent varie en fonction de l'altitude, elle est généralement forte au niveau des hautes altitudes (station d'Oukaimden) et faible dans les basses altitudes (station d'Armed) en raison de l'effet de barrière en basse altitude par les montagnes adjacentes.

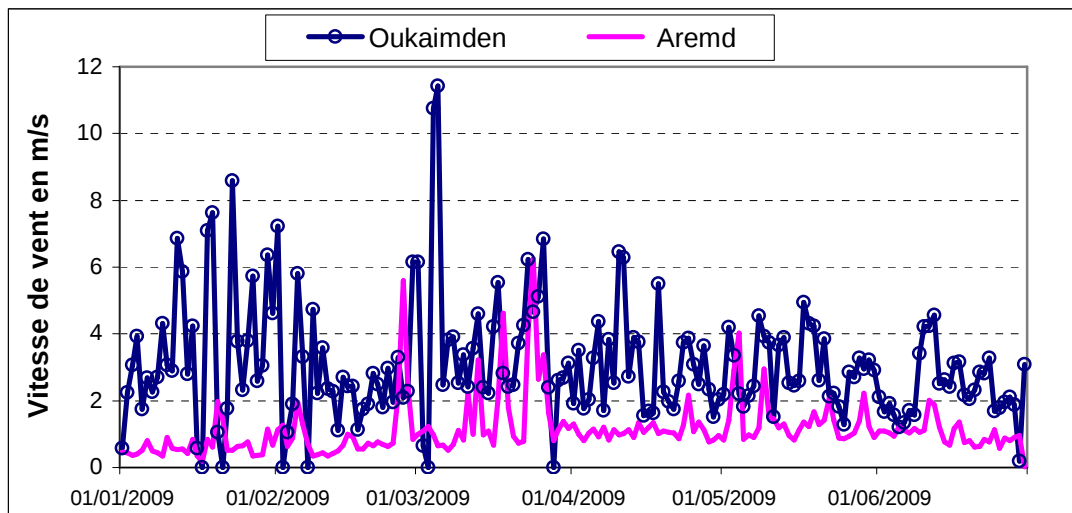


Figure 13: Variation des moyennes journalières des vitesses du vent en m/s (01/01/2009-30/06/2009).

3.6. les précipitations

L'étude des précipitations est basée sur l'exploitation des données pluviométriques enregistrées au niveau de cinq stations (Asni, Tachdert, Neltner, Imskerbour et Armed). Les précipitations sont généralement faibles et caractérisés par une grande variabilité spatio-temporelle (Figure 14).

La plupart des précipitations détectées au niveau du Haut Atlas sont des précipitations nivales.

La distribution moyenne mensuelle selon les cinq stations met en évidence deux périodes bien marquées : une période pluvieuse qui s'étale du mois de janvier au mois de Mars avec un maximum de 138 mm au niveau de la station d'Imskerbour et une période sèche qui apparaît du mois d'Avril au mois de Juin avec un maximum de 112 mm au niveau de la station d'Armed.

Les précipitations détectées sur les autres stations (Armed, Asni, Tachdert) sont généralement moyennes durant les mois (Janvier, Février, Mars, Juin) et très faibles durant les mois (Avril, Mai).

L'importance des précipitations au niveau des hautes altitudes, est liée aux baisses des températures et à l'orographie, avec une part importante des chutes des neiges.

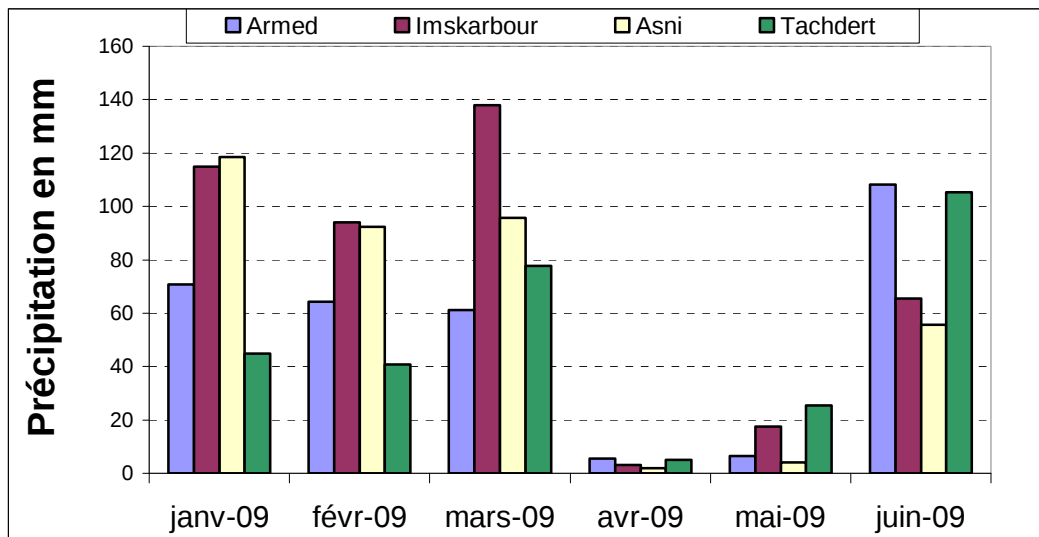


Figure 14: Variation des précipitations mensuelles en mm (01/01/2009-30/06/2009).

3.7. Débit

3.7.1. Débits disponibles

L'agence du Bassin Hydraulique mesure les débits à l'exutoire de chaque bassin versant, tel que les hauteurs d'eau sont mesurées 3 fois par jour (8h, 12h, 18h), tandis que les jaugeages sont en principe mensuelles et réalisés par la technique d'exploration des champs de vitesse.

Puisque l'ABHT manque de points en hautes eaux pour tracer une courbe de tarage adéquat, cette dernière et l'IRD ont effectué des campagnes de jaugeage durant la période allant de 22/09/2008 jusqu'au 09/02/2010 dans le but d'améliorer la précision des mesures des débits à la station de Tahnaout, exutoire du sous bassin « Rheraya ». A l'aide des mesures des débits, on peut établir donc la courbe de tarage qui relie les hauteurs d'eaux aux débits.

3.7.2. Correction des débits

Les hauteurs mesurées chaque jour par l'opérateur, nous permet d'établir un limnigramme. (Figure15). C'est une représentation de la variation des hauteurs d'eau en fonction des dates. On remarque que cette variation est importante la fin du mois juin dont elle atteint les 80 cm et que la plus faible valeur de la hauteur est de l'ordre de 45cm mesurée le mois de Mars.

Cette différence des hauteurs est due à la quantité d'eau issue de la fonte des neiges qui dépend du degré de la température variant d'une date à une autre et provoquant ainsi une fonte totale de la neige durant les deux mois (Juin et Juillet) en raison des plus fortes températures mesurées selon ces deux dates.

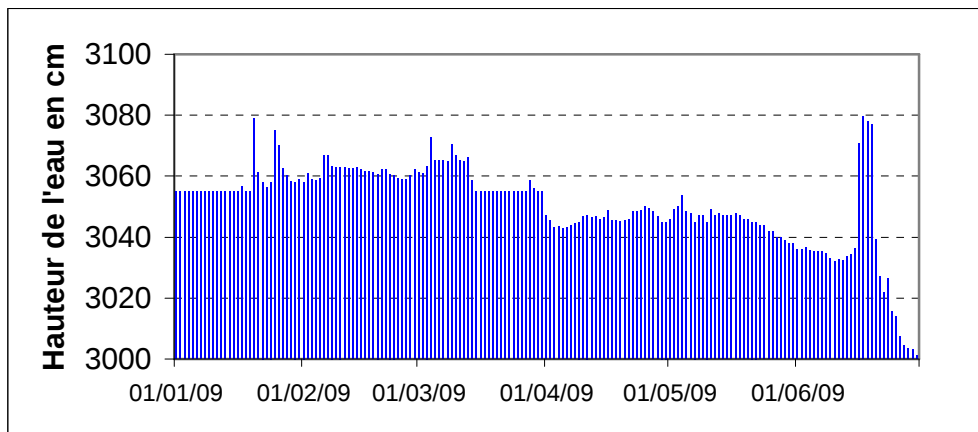


Figure 15: Linnigramme journalier à la station de Tahnaout (01/01/2009-30/06/2009).

Les relations Hauteur(H)-Débit (Q) sont très compliquées en milieu semi aride torrentiel, où la section de jaugeage est rapidement comblée par des galets et autres charges solides. Les hauteurs d'eau ne sont donc pas tout à fait exactes.

La chute de la hauteur d'eau mentionnée précédemment et qui est détectée le 15 Mars, nous a permis de diviser notre période, en deux phases : une avant le 15 mars et une autre allant du 15mars jusqu'à 30/06/2009 (Figure 16).

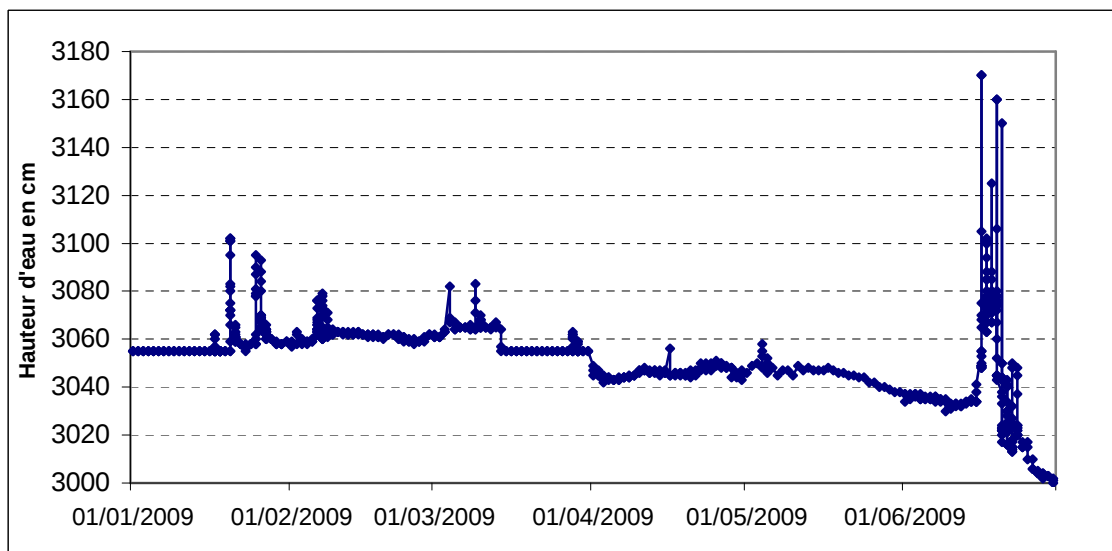


Figure 16: Hauteurs d'eaux instantanées à la station de Tahnaout (01/01/2009-30/06/2009).

Remarque : le nombre en gras **3050** est un indice de référence de l' ABHT.

Exemple $H=3050$ cela signifie que $H=50\text{cm}$.

Le coefficient de détermination extrait de la courbe de tarage représentant le débit en fonction de la variation des hauteurs d'eau selon la période allant du 1 Janvier au 14 mars (Figure 17) montre une grande corrélation ($R^2=0,96$) entre la variation des hauteurs de l'eau et celle des débits. Les grands débits qui atteignent les 6m³/s correspondent à des hauteurs d'eau de valeur de 68cm tandis que les faibles débits (1m³/s) coïncident avec des hauteurs de l'ordre de 47cm.

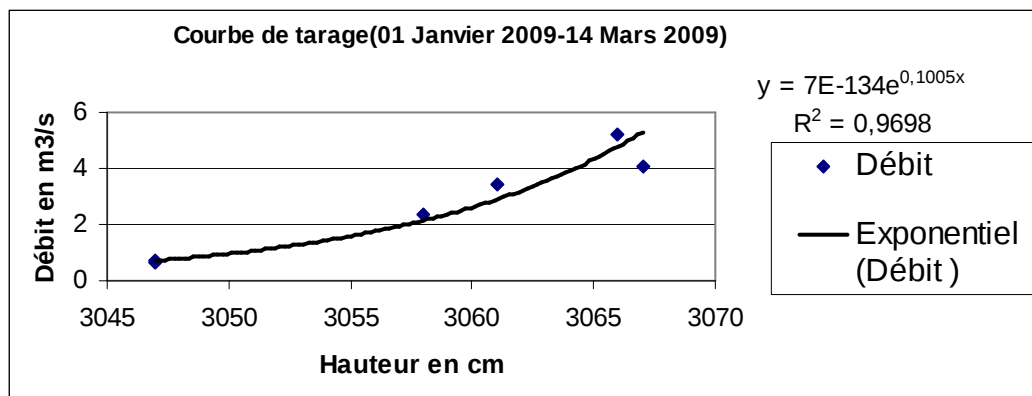


Figure 17: Courbe de tarage 01/01/2009 jusqu'à 14/03/2009

La correction des débits est faite à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Débit en m}^3/\text{s} = 7 \cdot 10^{-134} \cdot \text{Exp.} (0.1005 \cdot \text{hauteur d'eau en cm})$$

La courbe de tarage représentant la variation des débits en fonction des hauteurs d'eau durant la période allant du 14 Mars jusqu'à 30 Juin montre une corrélation moyenne entre les deux (Figure 18). Le coefficient de détermination est de l'ordre de 0,60 et pour le même débit mesuré durant la période précédente, la nouvelle hauteur d'eau correspondante n'est plus la même. Cette dernière est plus faible (55cm) que celle mesurée durant l'autre période (68cm) mais donnant ainsi le même débit (6m³/s).

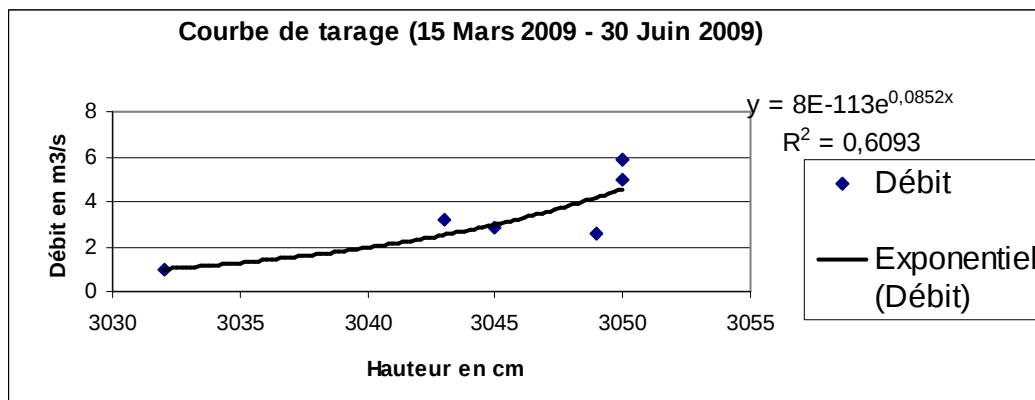


Figure 18: Courbe de tarage 15/03/2009 jusqu'à 30/06/2009.

La correction des débits est faite à l'aide de l'équation suivante :

$$\text{Débit en m}^3/\text{s} = 8 \cdot 10^{-113} \cdot \text{Exp.} (0.0852 \cdot \text{hauteur d'eau en cm})$$

Cette courbe de tarage permettra ainsi de corriger les débits calculés pour les différentes hauteurs et qui seront transformées par la suite en débits journaliers (Hydrogramme) (Figure 19). Ces débits montrent que le maximum est enregistré pendant les 2 mois Janvier et Juin (crue pour le mois Juin) suite aux fortes précipitations et à la quantité importante des eaux issus de la fonte des neiges.

Les périodes des hautes eaux correspondent à la période pluvieuse du mois de Janvier et le mois de Juin où la fonte est bien marquée, avec une valeur supérieure à 17 m³/s. Alors que la période des basses eaux a eu lieu le mois de Février et Mai avec un minimum de 3 m³/s (Figure 19).

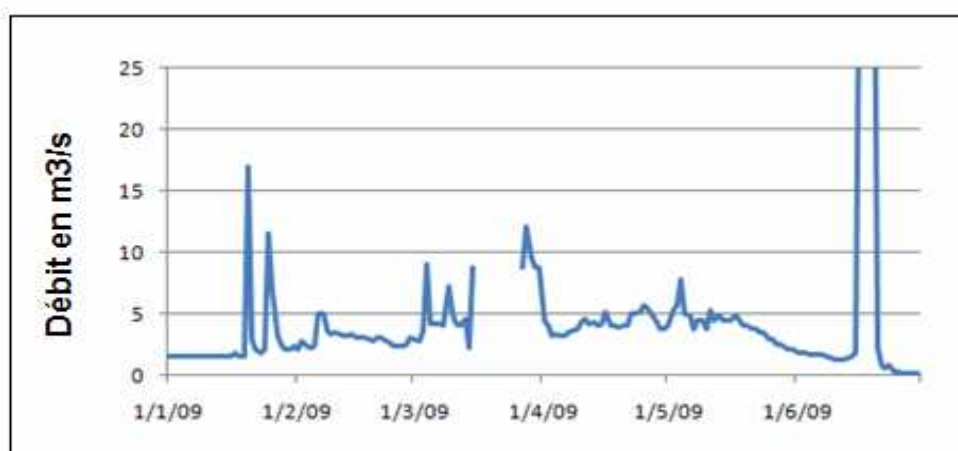


Figure 19: Débits journaliers à la station de Tahnaout (01/01/2009-01/06/2009).

3.7.3. Corrélation débit _ pluie

Afin d'effectuer une analyse qualitative de la contribution de la pluie sur les débits à l'exutoire, il est nécessaire de faire une corrélation entre les précipitations et les débits avec des pas de temps mensuels.

On a travaillé avec les précipitations des quatre stations représentant le bassin versant de Rheraya (Armed, Imskerbour, Asni et Tachdert) et les lames d'eau écoulée en mm dans la station de Tahnaout.

La lame d'eau écoulée est calculée par la formule suivante :

$$Q \text{ (mm)} = (Q \text{ (m}^3\text{/s)} * 1000) / \text{surface de bassin versant en Km}^2$$

Le tableau ci-dessous résume les mesures des lames d'eau écoulée ainsi que les pluies selon la période d'étude (Tableau 6).

Mois	lame d'eau écoulée en mm	Pluie en mm
janv-09	12,32	87,30
févr-09	13,32	72,90
mars-09	30,90	93,20
avr-09	18,64	3,90
mai-09	18,05	13,35
juin-09	37,45	83,70

Tableau 6: les lames d'eau écoulée et des pluies mensuelles (janv2009-juin2009).

D'après la figure 20, on note la relation pluie-débit mensuel au niveau de l'exutoire du bassin versant de la Rheraya. On remarque que les pluies et les débits n'ont aucune corrélation dans le sous bassin Rheraya tel que le coefficient de détermination R^2 est de l'ordre de 0,1063. Les points entourés par le cercle (pluie _ lame d'eau écoulée des mois d'Avril et de Mai) présente une anomalie : faible précipitation et des lames d'eau écoulée importante. Ceci peut être expliqué par la fonte de la neige à partir du 15 Mars2009.

Le décalage entre la pluie et les débits peut être expliqué par : les pertes d'eaux dans le sous bassin liées à l'évaporation, aux prélèvements des eaux par les cours d'eaux « seguias » destinées à l'irrigation, à l'infiltration au cours de l'écoulement, ainsi qu'aux stocks neigeux installés aux hautes altitudes.

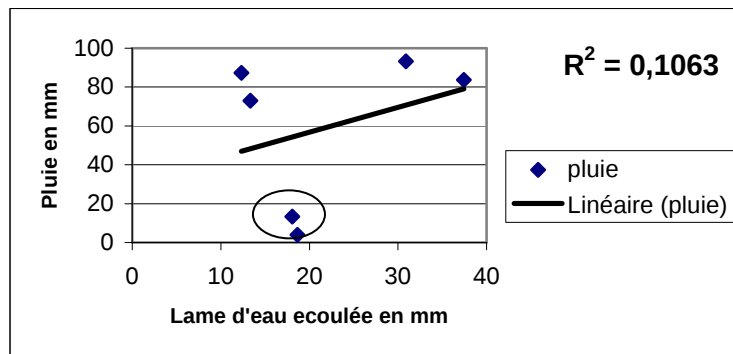


Figure 20: Corrélation entre les précipitations et les débits moyens mensuelles au niveau du sous bassin de la Rhéraya

Chapitre II : Eléments bibliographiques sur les données de la télédétection

1. Définition de la télédétection

La télédétection est une méthode qui permet d'obtenir des informations sur des objets sur terre en analysant des données sans avoir un contact direct entre cet objet et l'instrument aérospatial (CCT).

La télédétection nécessite la présence d'une source d'énergie qui illumine la cible par l'émission d'une onde électromagnétique (Figure 21). Au cours de ce trajet, le rayon traverse une certaine épaisseur de l'atmosphère. La cible est l'objet terrestre observée par le satellite.

En général, la télédétection est un moyen pour l'observation de la terre, ses océans, son atmosphère et sa dynamique depuis l'espace à différentes échelles.

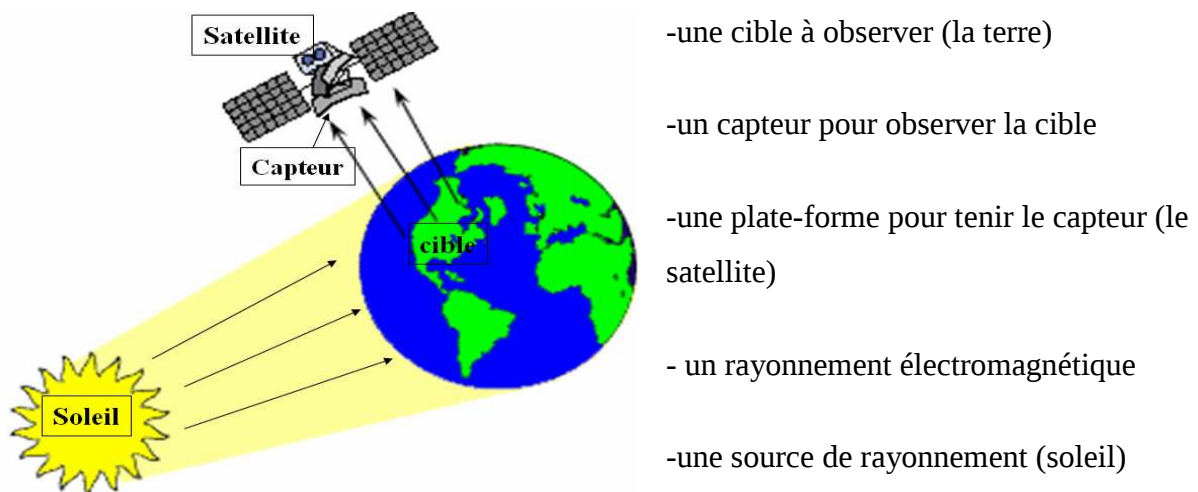


Figure 21 : les paramètres de la télédétection (CCT)

2. Satellites et capteurs

Les satellites sont des plates-formes utilisés en télédétection (Figure 22). Ils se déplacent suivant un orbite qui a généralement une forme quasi-circulaire.

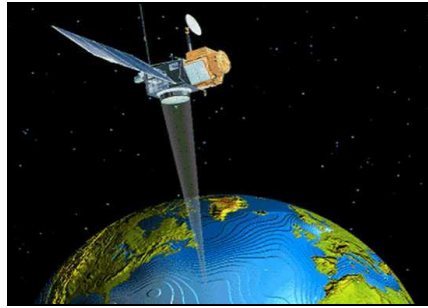


Figure 22: photo d'un satellite

2.1. Caractéristiques d'un satellite : orbites et fauchée

Les satellites fournissent la principale partie des données recueillies par la télédétection. Le chemin effectué par le satellite autour de la terre est appelé orbite. Le choix de l'orbite est fait à partir de la capacité du capteur et l'objectif de la mission. Il est aussi déterminé par l'altitude, l'orientation et la rotation du satellite par rapport à la terre. On distingue deux types des orbites, **l'orbite géostationnaire** : il est décrit quand le satellite est à une altitude élevée et regarde toujours la même zone de la surface de la terre (Figure 23a). Le satellite peut suivre une **orbite polaire** allant du Nord au Sud ou vice versa, et ne fonctionne qu'au cours d'une certaine période. Il observe la presque totalité de la terre (Figure 23b).

La majorité des satellites ont une **orbite quasi-polaire héliosynchrone** (solaire synchrone), ils observent une région de la terre à la même heure locale solaire (Figure 23c).

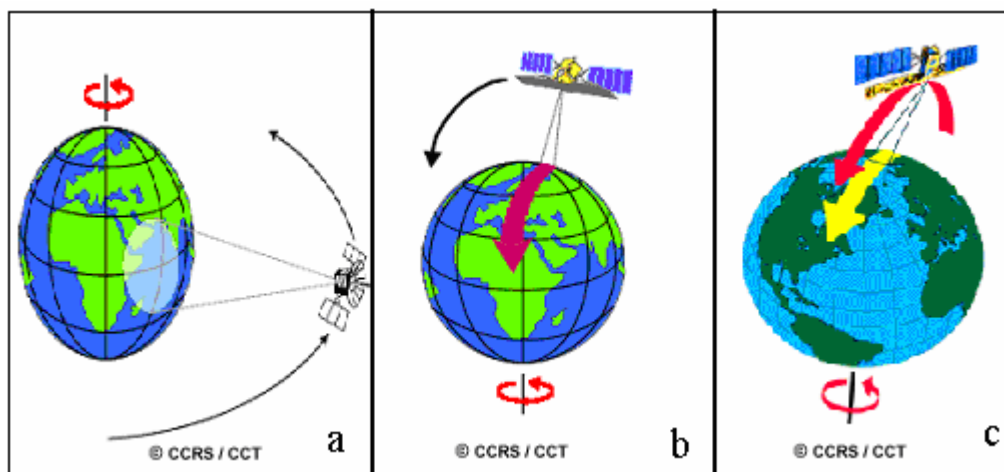


Figure 23: Les différents types d'orbites (CCT).

Lorsque le satellite est autour de la terre, le capteur n'observe qu'une partie de la surface terrestre (champ de vue). Cette surface s'appelle fauchée (Figure 24).

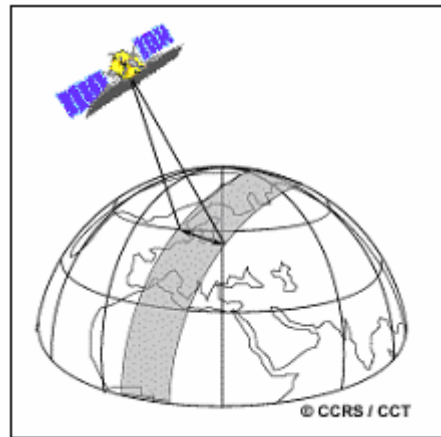


Figure 24: fauchée d'un capteur (CCT)

2.2. Les capteurs

Les Capteurs : permettent d'acquérir les données concernant les objets étudiés dans une bande de longueur d'onde donnée.

Il existe deux types de capteurs :

- Les capteurs passifs : sont uniquement récepteurs, et la source d'énergie est le plus souvent le soleil (Figure 25).

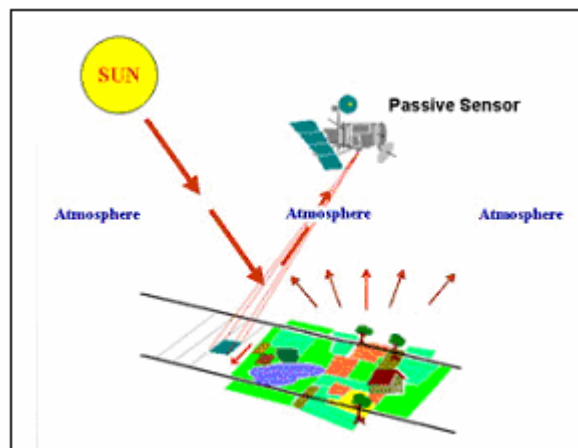


Figure 25: Schéma du fonctionnement d'un capteur passif

- Les capteurs actifs : émettent eux même les rayonnements pour « illuminer » les objets de manière à ce que l'énergie réfléchie puisse être mesurée (RADAR) (Figure 26).

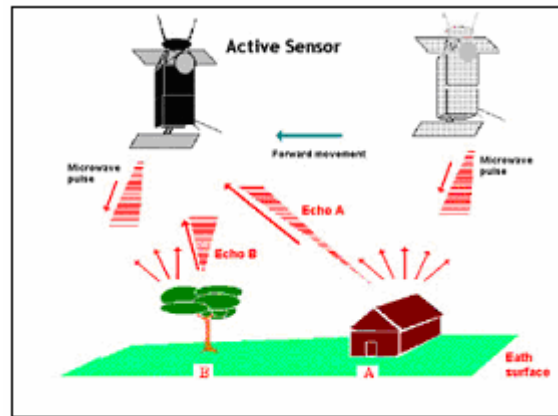


Figure 26: Schéma du fonctionnement d'un capteur actif

3. Le spectre électromagnétique

Les objets reflètent une partie de lumière qui les atteint. C'est généralement cette portion de lumière qui donne la couleur aux objets. La lumière est émise et réfléchiée par les objets sous forme de rayonnement.

Un rayonnement est l'énergie qui se propage dans la matière ou dans l'espace sous forme de champs électromagnétiques. L'ensemble de toutes les longueurs d'ondes possibles constitue le spectre électromagnétique.

Les ondes électromagnétiques sont caractérisées par différentes longueurs d'ondes (Figure 27).

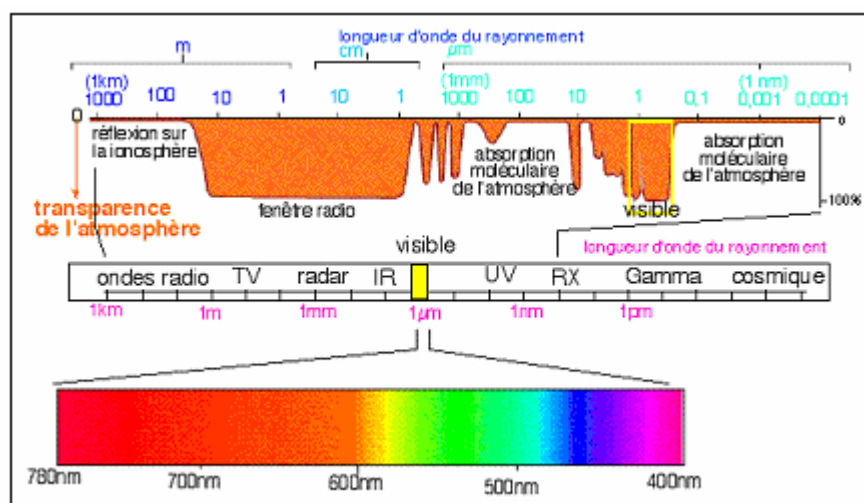


Figure 27: Spectre du rayonnement et transparence de l'atmosphère

4. Résolution spatiale

Une image satellite est composée de nombreux carrés appelés pixels. Le pixel représente la plus petite unité figurant sur une image satellite. Le premier fait important à connaître concernant une image satellite, est sa résolution.

La résolution d'une image est la plus petite distance entre deux objets adjacents que le capteur puisse identifier. Les capteurs les plus utilisés dans la détection des surfaces neigeuses qui s'opèrent dans les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge sont résumés dans le tableau 7:

Satellite	Capteur	Résolution spatiale en m	Largeurs de fauchée en Km	Année de lancement
Landsat	MSS	80	185	1972
	TM	30	185	1982
Terra /Aqua	ASTER	15,30	60	1999
Spot	VGT	1000	2200	1988
Formosat 2	—	8	24	2004

Tableau 7: capteurs spatiales les plus applicables dans la détection de la neige avec les données de spectre électromagnétique (visible+ PIR)

5. Définition de la réflectance

La réflectance est le quotient de l'intensité du rayonnement réfléchi sur l'intensité du rayonnement incident.

$$\rho = \text{RR} / \text{RI}$$

RR : Rayon réfléchi

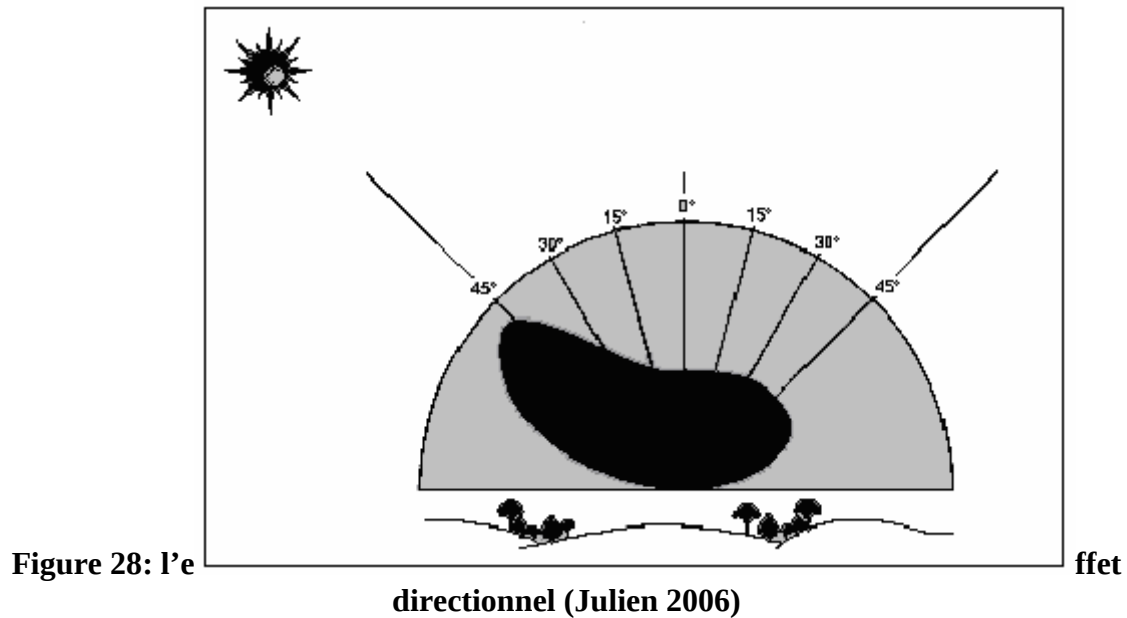
RI : Rayon Incident

5.1. Facteurs de la variation de la réflectance

La réflectance est soumise à certaines variations dues aux effets suivants :

5.1.1. 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 (Figure 28).



5.1.2. 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 (Figure 29).

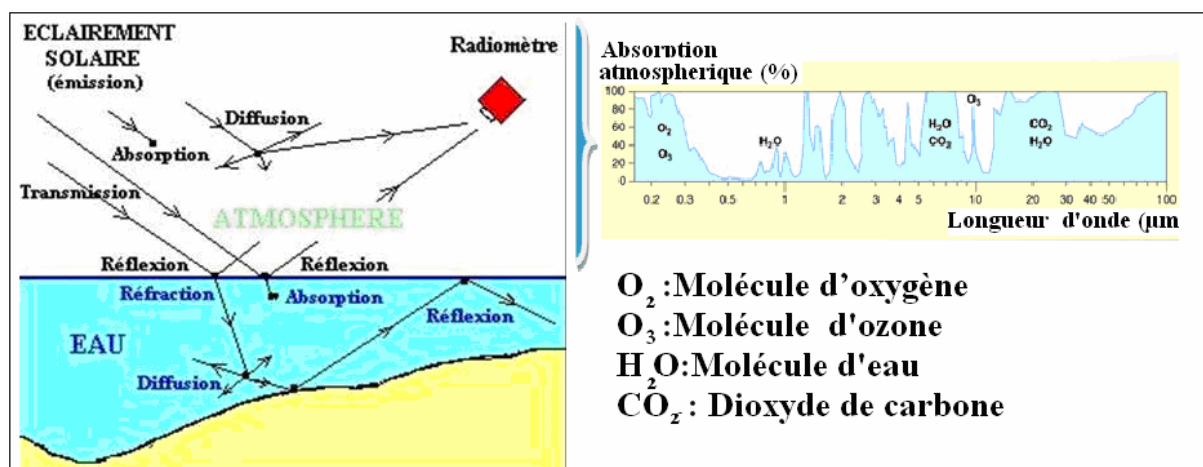


Figure 29: Perturbations atmosphériques

5.1.3. 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.

D'autre part les zones soumises au soleil seront bien éclairées et alors elles auront une réflectance maximale, tandis que celles ombragées auront une réflectance faible voire même nulle.

6. Interaction Rayonnement – cible

Le rayonnement traversant l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber l'énergie (A), la transmettre (T) ou réfléchir (R) l'énergie incidente (Figure 30). L'énergie incidente totale interagira avec la surface selon l'une ou l'autre de ces trois modes d'interaction. 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 (surface lisses ou rugueuses, période humide ou sèche).

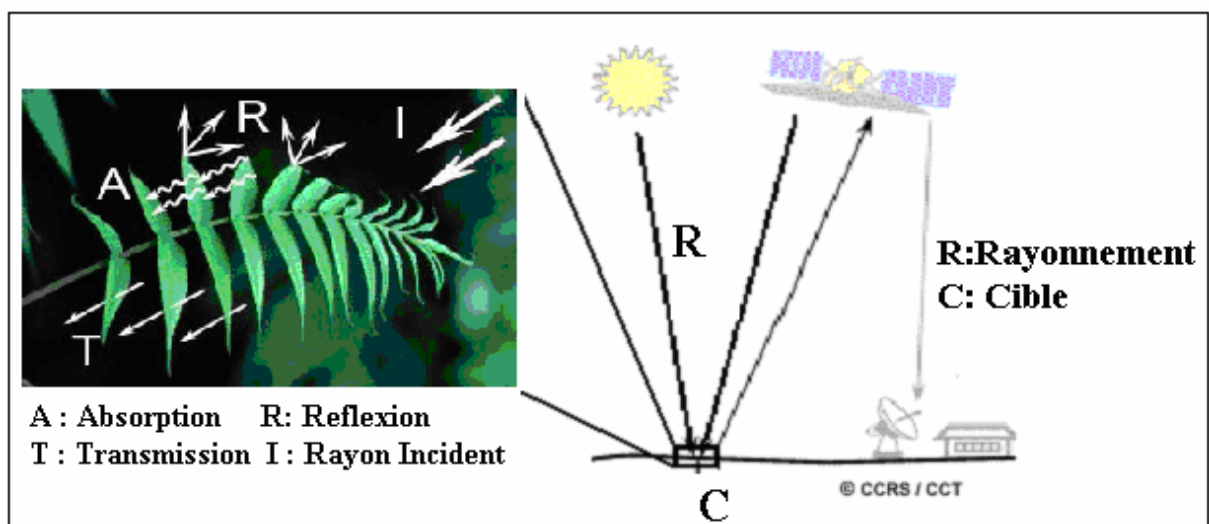


Figure 30: interaction rayonnement - cible (CCT).

7. Les types de classifications utilisés en télédétection

7.1. Classification supervisée

Les données sont classées vis-à-vis d'un objet de référence choisis par l'interprète. C'est une méthode utile pour réaliser une première segmentation des images en grands thèmes d'occupation du sol. Cette segmentation pourra être utilisée pour réaliser un masquage des thèmes non concernés par l'étude (dans notre cas on ne s'intéresse qu'à la neige).

Plusieurs aspects doivent être pris en considération lorsqu'on effectue une classification supervisée. On doit d'abord déterminer le plan de classification approprié, ensuite les sites d'entraînement doivent être choisis pour chacun des thèmes, suivi par le calcul des statistiques (Figure 31).

Le choix de l'algorithme de classification ainsi que la classification de chaque pixel de l'image (incluant ceux qui ont servi aux sites d'entraînement) sont des étapes importantes, qui seront achevés par l'évaluation de la précision de la classification.

- Données images : choisir celles où le phénomène étudié est le plus visible.
- Phase d'apprentissage : choisir des zones d'apprentissage pour caractériser toutes les classes représentatives de celles-ci. Les zones d'apprentissages doivent être spectralement les plus homogènes possibles et distribuées un peu partout sur la scène étudiée.
- Phase de classification : comparaison des pixels indéterminés aux comptes numériques de référence (affectation à la classe la plus proche).
- Documents finaux : la forme de restitution doit être choisie en fonction de l'utilisation des résultats. Le choix des couleurs et des figurés est important pour assurer la lisibilité et une compréhension rapide des résultats.

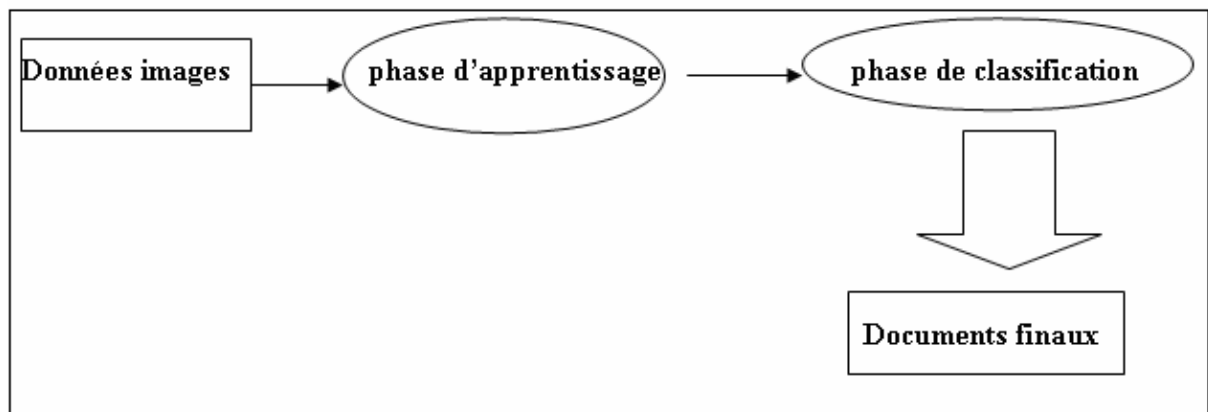


Figure 31: Algorithme de classification (Girard 1999)

7.2. Classification non supervisée

Les données sont classées en fonction de leurs caractéristiques spectrales, sans aucune information a priori sur la nature des objets. Elle se base sur :

- la distinction des zones de l'image avec des caractères spectrales différents (classes).
- Etablissement des cartes de ces classes.
- Sortie sur terrain pour déterminer la nature des subdivisions effectuées par le logiciel.

Chapitre III :Materiel de travail et traitement des données

1. Données et outils de traitement

1.1. Données FORMOSAT-2

FORMOSAT-2 est un satellite taiwanais lancé par l'agence spatiale taiwanaise NSOP (National Space Organization) en 20 Mai 2004. Les systèmes d'observation de la terre possèdent une capacité limitée de la revisite d'un site.

Le satellite FORMOSAT 2 à haute résolution vient pour éliminer cette limitation et avoir la capacité d'enregistrer chaque jour le même site. Il englobe un système imageur de quatre bandes spectrales (bleu, vert, rouge et le proche infrarouge), son champs d'ouverture est de 0° à 45° de part et d'autre de la trace du satellite au sol, ce qui permet l'acquisition des données sur une largeur de bande du sol d'environ 24 Km. La taille du pixel est de l'ordre de 8*8m.

Le satellite FORMOSAT 2 permet une détection des changements que peut subir la terre, et une surveillance ciblée en plus de prévision et de gestion des phénomènes naturels. Il suit un orbite héliosynchrone incliné de 99,1° par rapport à l'équateur à une hauteur d'environ 888 Km et il décrit exactement 14 orbites par jour (Figure32).

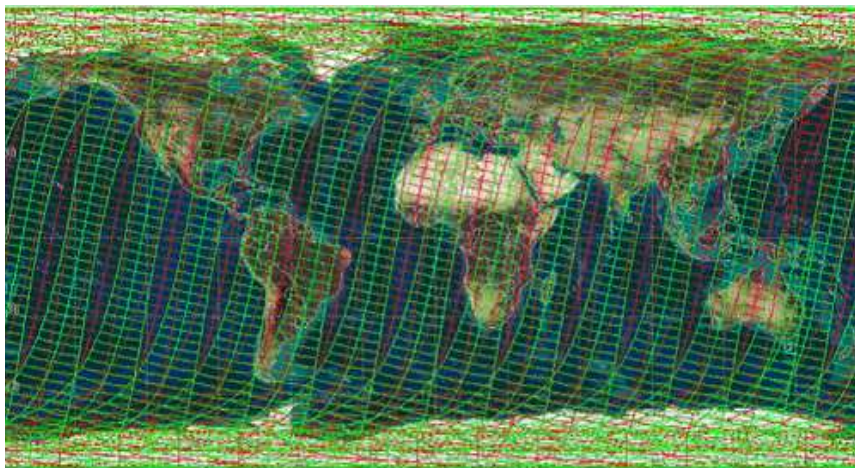


Figure 32: Les 14 orbites héliosynchrones du satellite FORMOSAT-2

Cette combinaison « haute résolution/revisite quotidienne » est aujourd'hui une caractéristique très spécifique dans le domaine des satellites civils d'observation de la Terre.

Les deux tableaux 8 et 9 résument les caractéristiques du satellite FORMOSAT2 qui les rend différent des autres satellites et les bandes spectrales selon lesquelles ce satellite est capable de fonctionner.

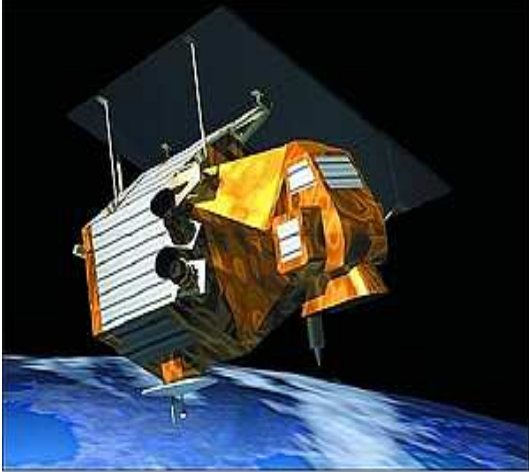
	Lancement	2004
	Altitude	888 Km
	Orbite	Héliosynchrone
	Heure de passage à l'équateur	9h30 am
	Champ de vue	24 Km
	Résolution spatiale	8 m
	Période de revisite	1 jour

Tableau 8: caractéristiques du satellite FORMOSAT 2 (www.satimagingcorp.com)

Bande	couleur	Longueur d'onde
bande 1	bleu	0,45 – 0,52 μm
bande 2	vert	0,52 – 0,60 μm
bande 3	rouge	0,63 – 0,69 μm
bande 4	proche infrarouge	0,76 – 0,90 μm

Tableau 9: bandes spectrales de satellite FORMOSAT 2(www.satimagingcorp.com)

1.2. Le logiciel ENVI

ENVI (The ENvironment for Visualizing Images) est un système de traitement d'images nouveau et performant. Il répond aux besoins des utilisateurs d'images satellites ou aéroportées et permet de visualiser les données de manière compréhensible et de les analyser à partir d'images de taille et de type variés (Lacombe 2005).

Les images traitées sont des images du haut Atlas prises selon des dates et heures différentes.

Le MNT (Modèle Numérique du Terrain) utilisé ici fournit les altitudes sur le Haut Atlas avec une résolution de 8 m et une projection Lambert Nord Maroc. Il a permis de segmenter la région d'étude par tranches d'altitude de 148,5m, par classes d'exposition de pas de 45° et par

classes de pentes de 10°. Les pixels peuvent ainsi être classifiés par secteurs d'étude qui leur est associée.

2. Analyse de la réflectance

2.1. Réflectance de la neige

La réflectance qui nous intéresse est celle de la neige. Cette dernière est très élevée dans le visible et le proche infrarouge, très faible dans le domaine du moyen infrarouge (Figure 33).

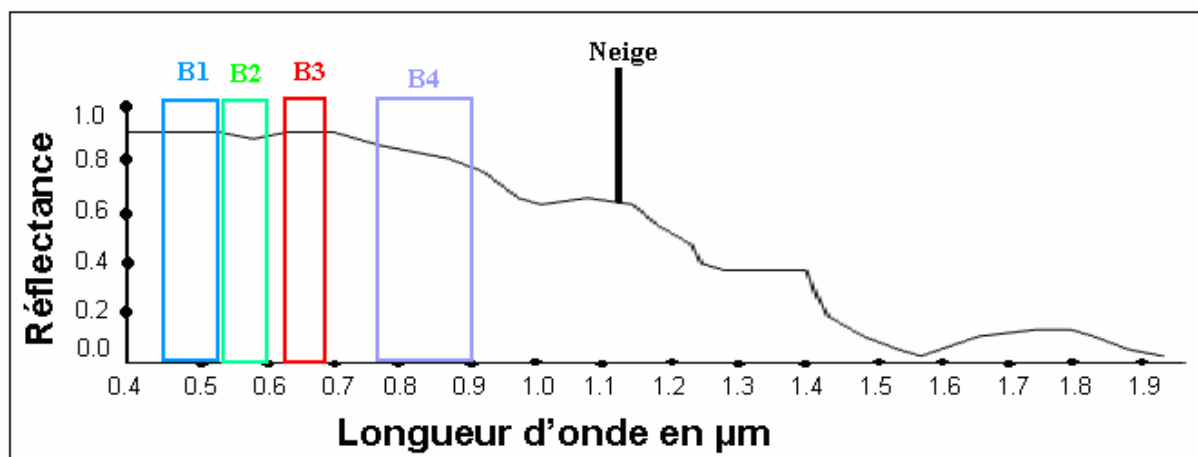
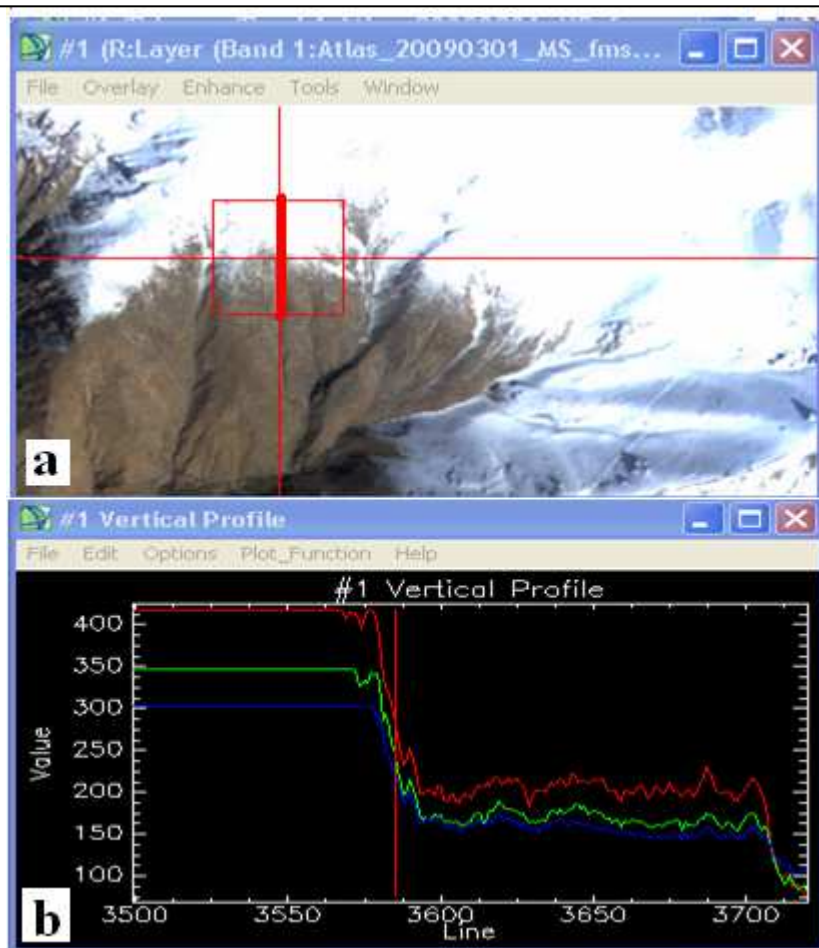


Figure 33: réflectance de la neige selon les longueurs d'ondes des bandes spectrales de FORMOSAT 2.

La réflectance de la neige (Figure 34) est représentée à gauche de la ligne rouge, caractérisée par des valeurs fortes et constantes (selon les trois bandes « rouge-bleu-vert »), tandis qu'à droite, on trouve la réflectance du sol nu, représentée par des courbes variantes et des réflectance faibles par rapport à celle de la neige.

Cette variation de la réflectance est due principalement à la couleur des deux qui donne à chaque élément sa propriété absorbante ou réfléchissante.



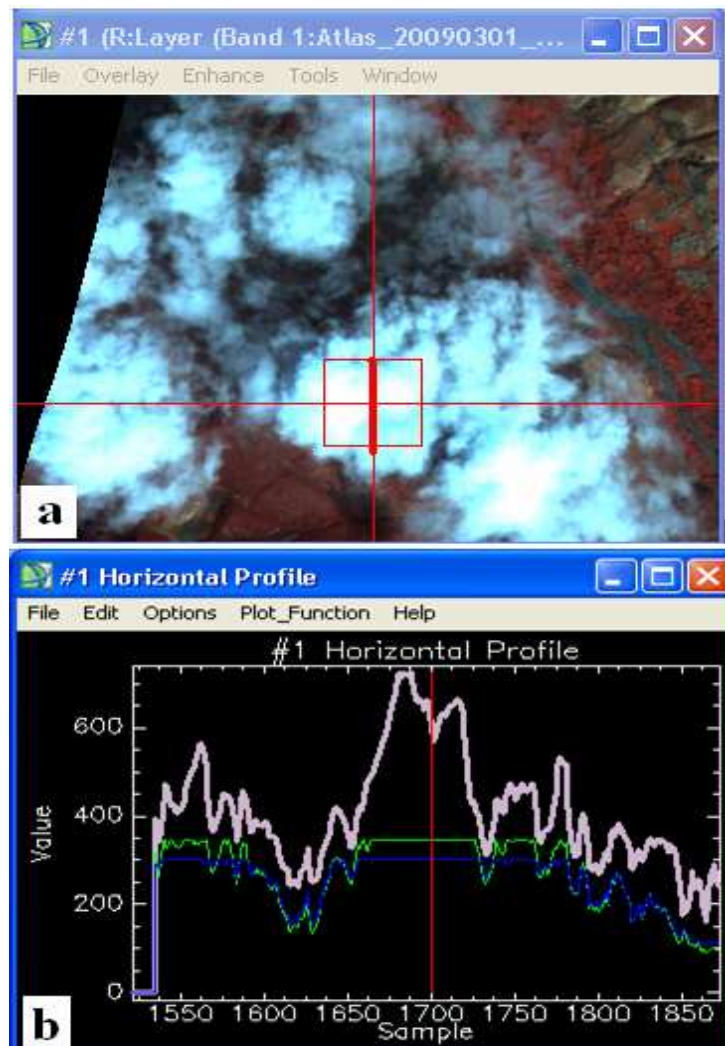
a : composition colorée (Rouge, Vert et Bleu)

b : Réflectance selon le profil vertical

Figure 34: Caractères optiques de la neige (Réflectance)

La discrimination de la neige des autres surfaces est relativement aisée, car neige et glace sont les seuls types de surfaces qui réfléchissent fortement le rayonnement dans le domaine solaire et absorbent fortement le rayonnement dans le moyen infrarouge.

La figure 35 montre la variation de la réflectance des nuages avec celle de la neige selon les bandes « Proche infrarouge – Vert -Bleu », tel que l'augmentation surprenante de la réflectance au niveau de la bande du Proche infrarouge est due à l'existence de la neige sous les nuages.



a : composition colorée (Proche infrarouge, Vert et Bleu)

b : Réflectance selon le profil vertical

Figure 35: Réflectance des nuages et de la neige.

2.2.Effet de l'angle d'élévation solaire

L'angle d'élévation solaire au niveau d'un point de la terre est l'angle entre la direction du rayon solaire et l'horizontale au point. Il est fonction du temps (du jour et du mois) et de la latitude (figure 36).

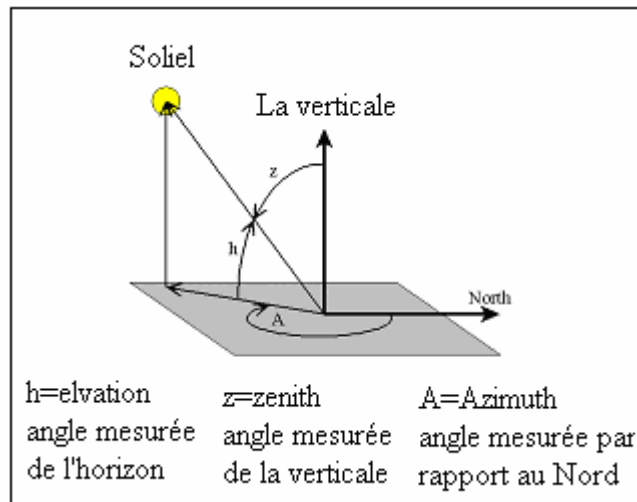


Figure 36: Schéma des Angle Solaire

Les valeurs des deux angles, élévation solaire et azimuth, sont représentées sur le tableau ci-dessous (tableau 10).

L'image concernée	L'heure de la prise de l'image	La date de la prise de l'image	Elévation du soleil	Azimuth
Image 1	(10 :25 :08)	3/02 /2009	31	143
Image 2	(10 :24 :51)	8/02/2009	32	142
Image 3	(10 :24 :47)	09/02/2009	33	141
Image 4	(10 :24 :33)	12/02/2009	33	141
Image 5	(10 :23 :29)	22/02/2009	36	138
Image 6	(10 :23 :18)	01/03/2009	38	136
Image 7	(10 :21 :54)	21/03/2009	45	131
Image 8	(10 :21 :50)	22/03/2009	46	131
Image 9	(10 :21 :17)	30/03/2009	48	128
Image 10	(10 :21 :10)	01/04/2009	49	128
Image 11	(10 :21 :02)	03/04/2009	50	127
Image 12	(10 :20 :43)	08/04/2009	51	125
Image 13	(10 :20 :33)	11/04/2009	52	124
Image 14	(10 :20 :01)	19/04/2009	54	121
Image 15	(10 :19 :37)	24/04/2009	56	119
Image 16	(10 :19 :45)	30/04/2009	57	117
Image 17	(10 :18 :45)	10/05/2009	58	115
Image 18	(10 :18 :55)	14/05/2009	59	111
Image 19	(10 :17 :31)	01/06/2009	61	104

Tableau 10: calcul de l'angle solaire ainsi que l'azimuth

L'angle solaire a une effet sur la variabilité de la température durant la période d'étude car on note une augmentation de cet angle de 30° allant de 03 Février au 01 Juin 2009. cela aura un effet direct avec la fonte de la surfa ce de la neige.

2.3. Réflectance en fonction des altitudes

La réflectance augmente avec l'altitude, en raison de la plus faible épaisseur d'atmosphère traversée.

Le travail effectué sous ENVI, se basait sur la superposition de chaque image avec les 20 classes d'altitudes (Allant de 900 jusqu'à 4120 mètres et préalablement classées à partir du MNT), de telle sorte à avoir la moyenne de la réflectance sur chaque tranche d'altitude.

Classes	Altitude	Classes	Altitude
1	1150-1298,5	11	2635-2783,5
2	1298,5-1447	12	2783,5-2930
3	1447-1595,5	13	2930-3080,5
4	1595,5-1744	14	3080,5-3229
5	1744-1892,5	15	3229-3377,5
6	1892,5-2041	16	3377,5-3526
7	2041-2189,5	17	3526-3674,5
8	2189,5-2338	18	3674,5-3823
9	2338-2486,5	19	3823-3971
10	2486,5-2635	20	3971-4120

Tableau 11: répartition des classes d'altitudes

Les figures ci-dessous (Figure 37) résument la variation de la réflectance dans les trois bandes du visible et du proche infrarouge. .

Sur la figure (37, a et b), on remarque une évolution proportionnelle de la réflectance moyenne en fonction de l'altitude, avec une petite anomalie (pour les tranches N°15 à N°18) caractérisée par une baisse de la réflectance, suivie par une augmentation. Ceci peut être expliqué par le fait que sur la même classe d'altitude, on a des expositions différentes qui provoquent la variation de la réflectance.

Sur la figure (37, c), on remarque une évolution logique de la réflectance en fonction de l'altitude.

D'après la figure (37, d), on observe une évolution identique au niveau des 3 bandes du visible (augmentation légère due à la présence d'une petite superficie de neige), mais inverse au niveau de la bande du proche infrarouge (tel que la réflectance diminue avec l'altitude).

La diminution de la réflectance au niveau de la bande du proche infrarouge est due à l'apparition de la végétation dans les vallées après le mois d'avril (Figure 38).

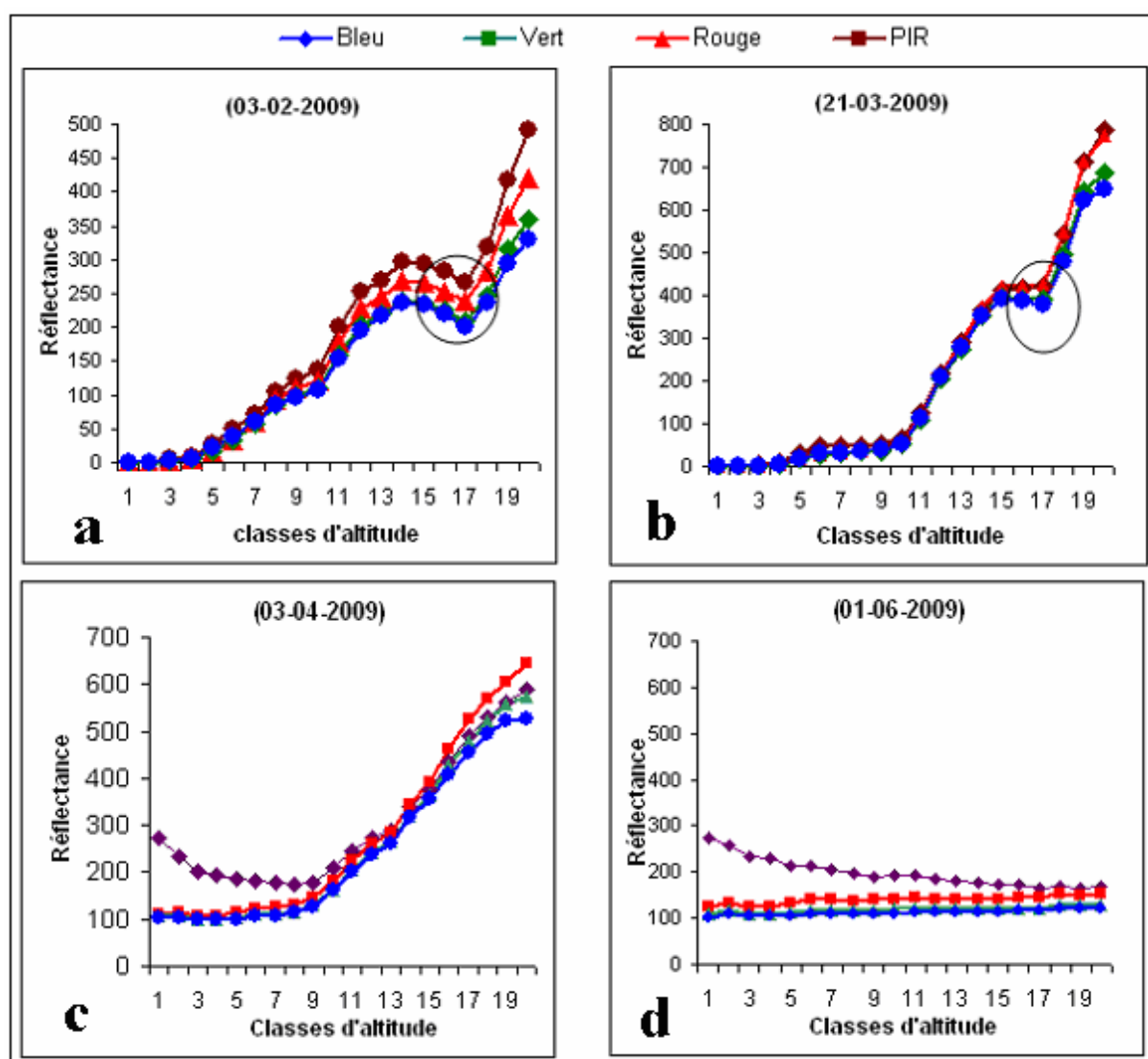


Figure 37: variation de la réflectance en fonction des altitudes

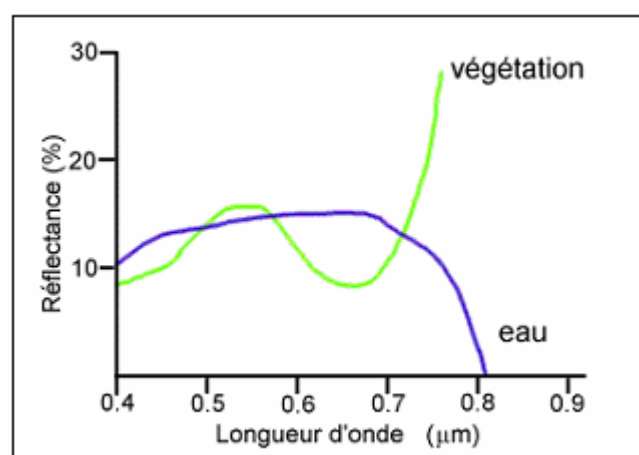


Figure 38: Réflectance de la végétation et de l'eau selon les longueurs d'ondes (CCT)

2.4. Réflectance en fonction des expositions

L'analyse de la réflectance selon les tranches d'exposition, montre une grande variation selon l'orientation et logiquement on doit s'attendre à une augmentation de cette dernière sur la tranche Sud, versant plus éclairées dans le Haut Atlas. Le tableau 12 représente les classes des expositions utilisées dans ce travail.

classes	1	0°----45°	NORD
	2	45°----90°	EST
	3	90°----135°	
	4	135°----180°	SUD
	5	180°----215°	
	6	215°----260°	OUEST
	7	260°----315°	
	8	315°----360°	NORD

Tableau 12: Répartition des tranches d'exposition au niveau de la zone d'étude

La superposition des images satellitaires avec les tranches de l'exposition a donné les résultats représentés sur la figure 39.

D'après cette figure, on remarque une variation de la réflectance d'une orientation à l'autre, ce qui montre l'effet important des perturbations.

La variation de la réflectance sur la figure (39, a) est inversement proportionnelle à celle représentée sur la figure (39).

Ceci peut être expliqué par le changement de la surface de la neige sur chaque tranche selon la date, soit par la fonte des neiges et alors la diminution de la réflectance, ou par l'accumulation de ce dernier et alors l'augmentation de la réflectance.

Ce qu'on a prévu avant la manipulation n'est pas acquis (le maximum de la réflectance sur la tranche Sud), ceci peut être dû à la variation de l'angle solaire ainsi que l'azimut.

La réflectance représentée sur la figure (39, c) varie légèrement d'une tranche à une autre selon les trois bandes du visible, avec des valeurs moyennes au niveau de la bande du proche infrarouge. Ceci peut être dû à l'apparition de la végétation selon cette date et à la petite surface de la neige qui reste, ce qui donne des valeurs de réflectance qui sont généralement faibles par rapport à celles obtenues selon la date (03/02/2009) la plus enneigée.

La figure 38 représente la variation du pourcentage de la réflectance de la végétation ainsi que celui de l'eau en fonction des longueurs d'ondes.

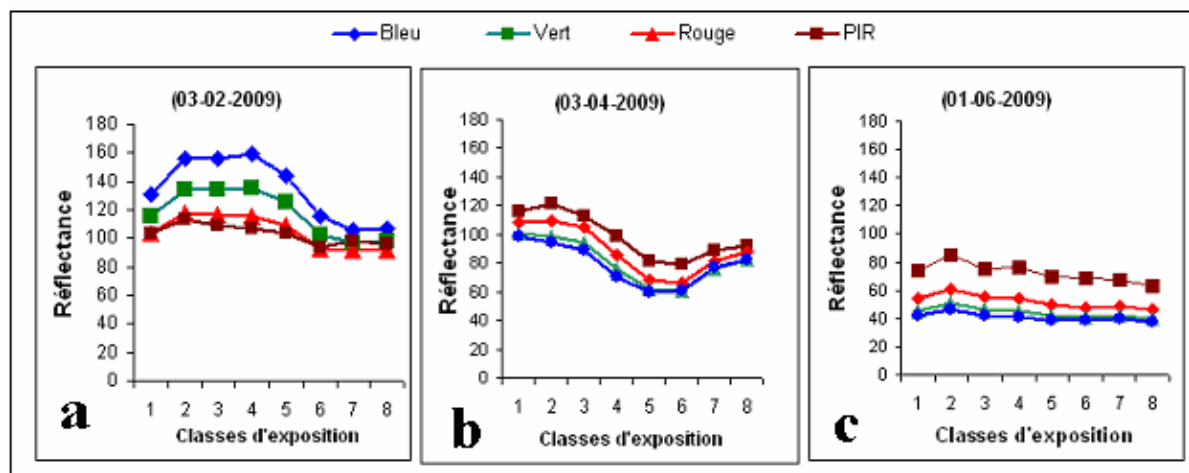


Figure 39: Variation de la réflectance en fonction de l'exposition

3. Classification de la neige

Il existe deux techniques de classification, supervisée et non supervisée. Le tableau 13 résume les avantages et les inconvénients de chaque méthode.

Dans ce travail nous avons adopté la technique de classification supervisée, cette classification est appliquée quand le thème (neige) est défini précédemment et le logiciel ENVI s'occupe de la généralisation du caractère (choisi selon les ROI (Zone d'intérêt)) sur toute l'image.

Le choix de la classification supervisée s'est basé sur la connaissance préalable des zones à étudier.

Classifications	Avantages	Inconvénients
Supervisée	Les classes obtenues ont une signification thématique précise	Le temps de réalisation est très long ; en particulier pour le choix des ROIs
Non supervisée	Utiles pour réaliser une segmentation des images en grands thèmes d'occupation de sols	Le regroupement des valeurs crée des classes dont la signification est parfois difficile à identifier

Tableau 13: Avantages et inconvénients des types de classification (Girard 1999)

Avant de commencer la classification, nous avons préparé la liste des images. Au lieu de travailler avec une image avec des bandes séparées, on procède à une étape de regroupement des bandes par l'option « layer stacking », suivi par le choix des ROI sur la nouvelle image.

Lors de la réalisation de la classification, on n'affiche que les trois bandes (bande1 : bleu, bande 2 : vert et bande 3 : rouge) (Figure 40). L'image multi-spectrale avec laquelle on a travaillé résulte de la superposition de trois bandes de visible.

Durant le traitement plusieurs images satellites de même capteur apparaissent à des bandes différentes sont souvent combinées pour créer une image colorée.

Par exemple trois images peuvent être prises dans trois bandes différentes (plages de longueur d'onde différente) par le même capteur, puis réunies. A chacune des bandes est attribuée une couleur (le Rouge : bande 3, le Bleu : bande 1 et le Vert : bande 2) pour produire une image en couleur (Figure 40).

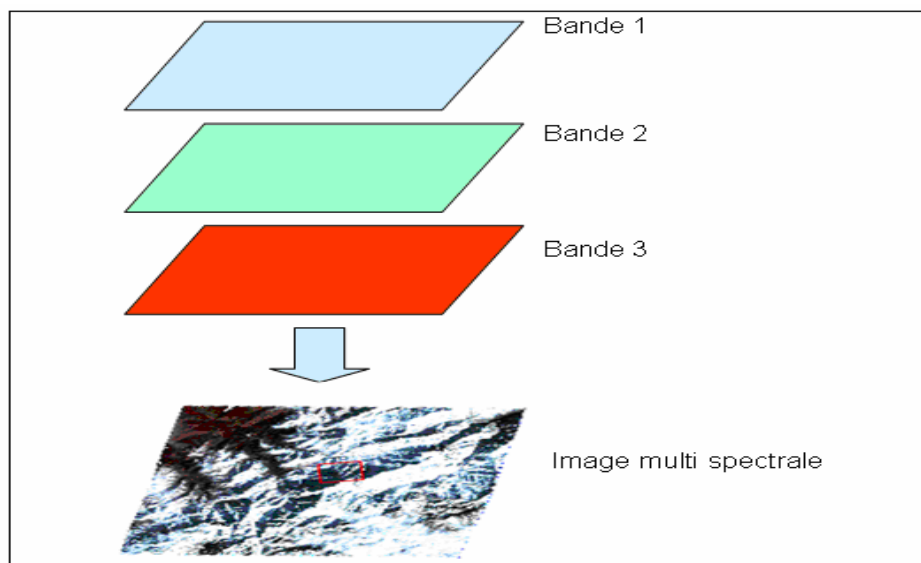
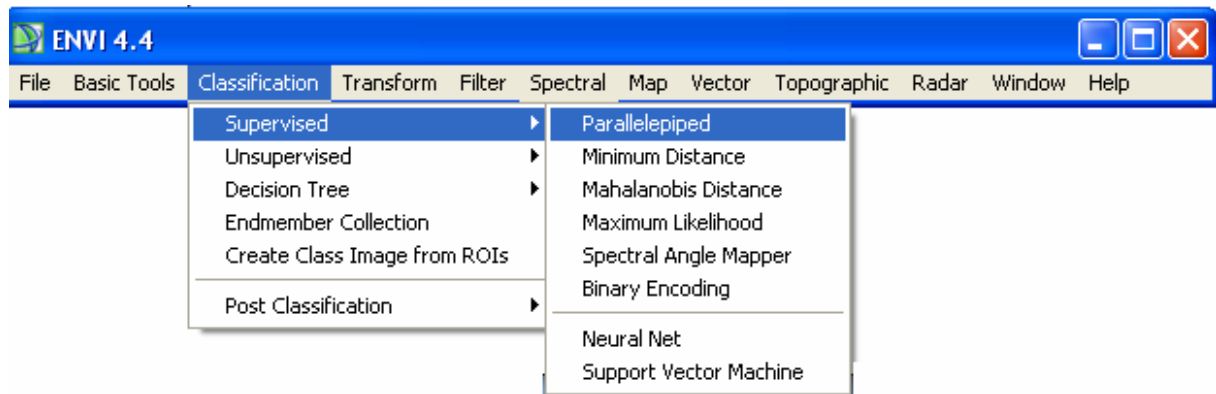


Figure 40: superposition des bandes pour éviter l'effet des nuages

Pour diminuer l'intervalle d'incertitude, on choisit plusieurs ROI dont le thème est le même (zone éclairée enneigée ou zone ombragée enneigée), de telle sorte à avoir le maximum de ROI représentées.

Cette étape est achevée par l'option classification supervisée « parallélépipède » et tout pixel dont les valeurs s'inscrivent à l'intérieur d'un parallélépipède sera affecté à la classe correspondante. Il est possible d'avoir des pixels non affectés, c'est à dire non classées.



Les figures 41 et 42 représentent un exemple de deux images classifiées selon les zones éclairées enneigées et ombragées enneigées, avec : SCA1 (en km^2) est la surface d'enneigement dans la zone 1 éclairée. Pour la date de 03/02/2009 (Figure 41), elle est de L'ordre de 256km^2 et de 11km^2 selon la date 01/06/2009 (Figure 42) et sont représentées sur les deux images par le jaune.

SCA2 (en km^2) représente la surface d'enneigement dans la zone 2 ombragée. Elle occupe 202km^2 pour le 03/02/2009 et 0km^2 selon le 01/06/2009 (Absence de la neige dans les zones ombragées) et est représentée sur la figure 41 par le rouge.

SCAT (en km^2) est la surface totale d'enneigement. Il s'agit de la surface de neige qui couvre toutes les zones de l'image (à la fois les zones éclairées et ombragées) et elle est la somme de SCA1 et SCA2

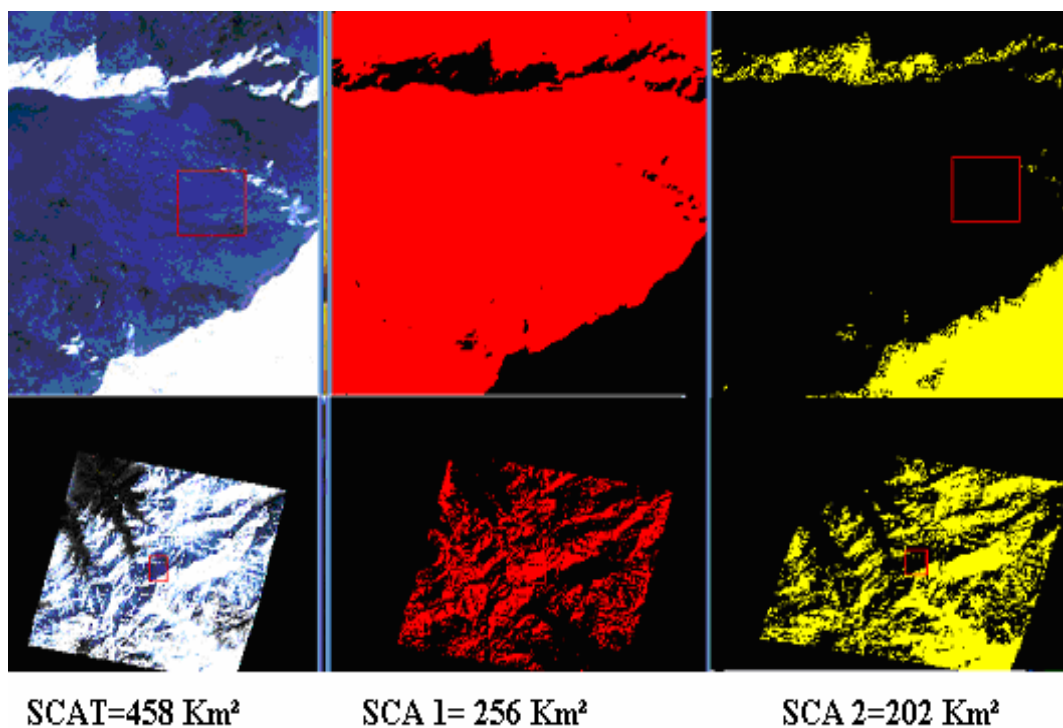


Figure 41: classification des zones éclairées enneigées (en jaune) et des zones ombragées enneigées (en rouge) selon la date (03/02/2009)

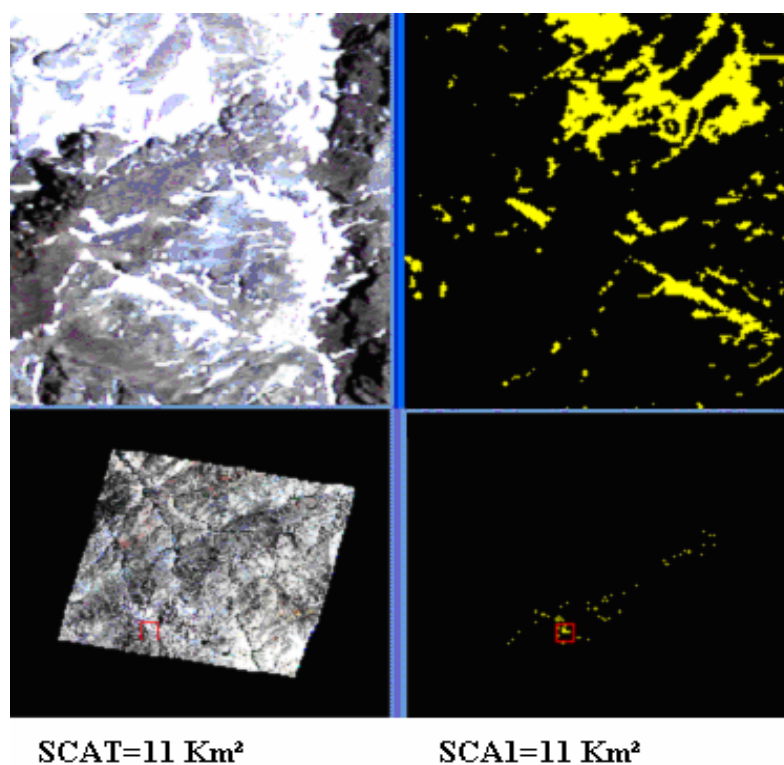


Figure 42 : classification des zones éclairées enneigées (en jaune) selon la date (1/6/2009)

La diminution de la surface enneigée était importante durant le mois de Février (Figure 43), la fin d'Avril et durant le mois de Juin.

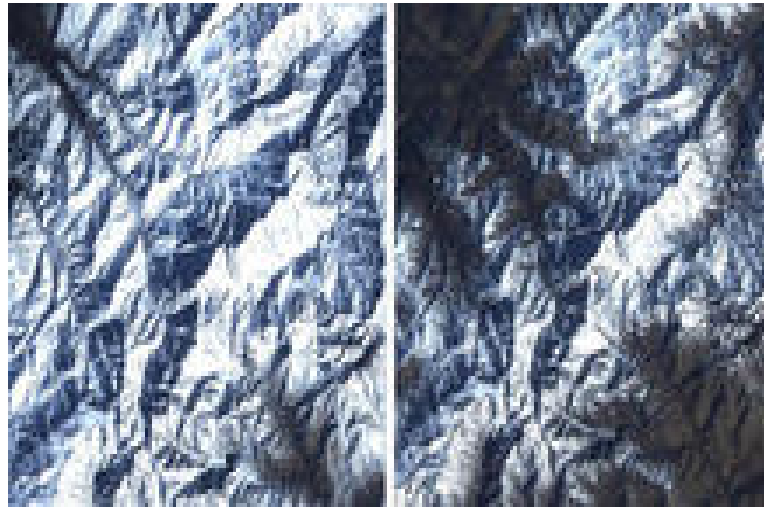


Figure 43 : diminution du couvert neigeux entre le 8 et le 12 février 2009 vue par le satellite FORMOSAT2.

4. Correction des effets topographiques

En calculant la surface de la neige, il faut tenir compte de l'effet de la topographie qui influence les résultats obtenus car la surface vue de ciel est différente de celle tenant compte de la pente (Figure 44).

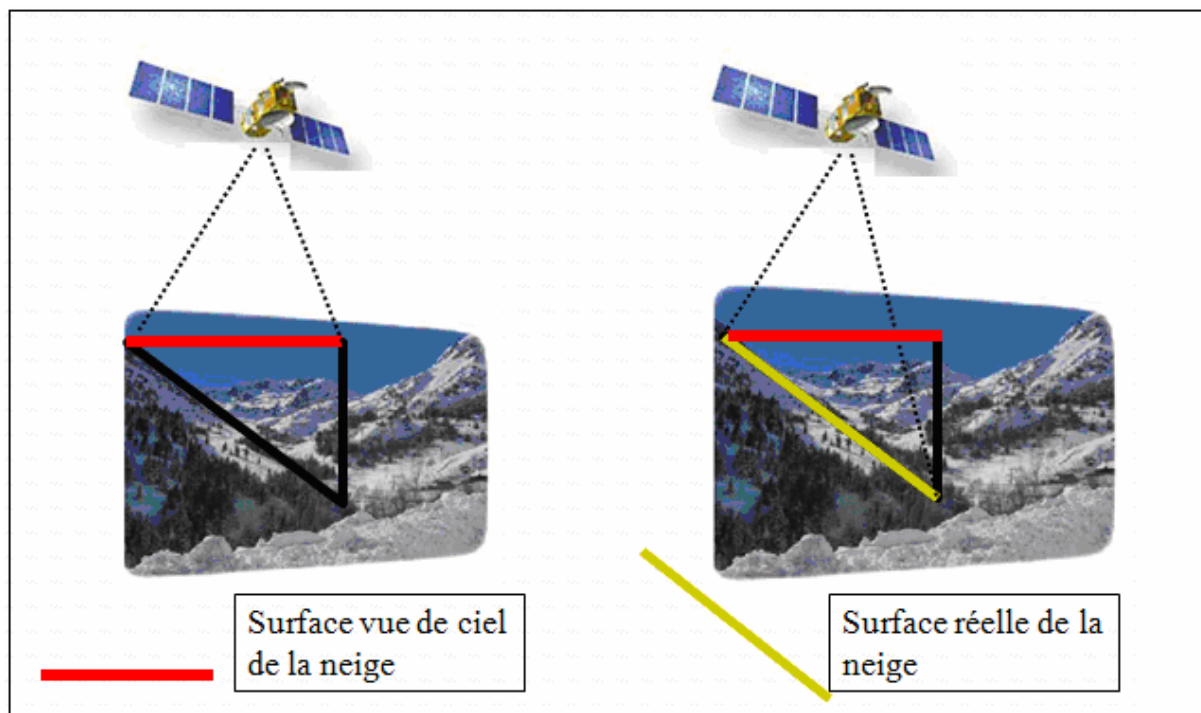


Figure 44 : Principe de correction de l'effet de pente

Dans le but de s'approcher de la réalité, on a procédé à une correction des estimations des surfaces enneigées via l'équation suivante :

$$\text{Taux d'enneigement} = S / \cos(\text{pente})$$

Avec : S est la surface de neige vue du ciel. (Surface non corrigée).

$$\cos(\text{pente}) = \cos((\text{pente} * 3,14) / 180)).$$

Les pentes qui sont en degré doivent être converties en radian.

La figure 45 montre le profil de variation des surfaces de neige calculées à partir de 19 images FORMOSAT durant la période de janvier à juin 2009. On note une grande variation de la surface de la neige d'une date à une autre. La neige couvre une superficie maximale de l'ordre de 458 km² sur la zone étudiée (en 79%) au début du mois de janvier et atteint un minimum en juin. Ainsi, des fluctuations sont marquées d'une date à autre montrant des périodes de fonte et d'accumulation de la neige. Ces variations sont dues à l'effet des facteurs climatiques (température de l'air, humidité, précipitations, rayonnement global).

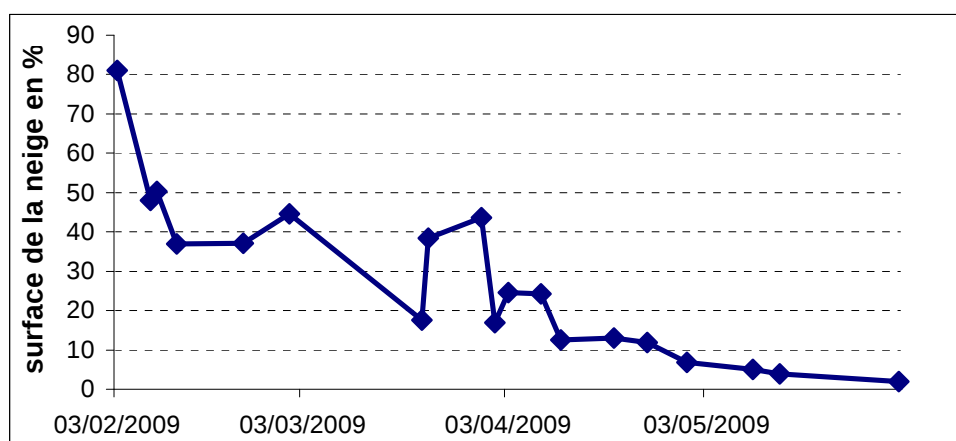


Figure 45: profil de variation des surfaces enneigées en pourcentage en hivers de 2009 avec les données FORMOSAT

5. Suivi de la neige selon la topographie

5.1. Variation de l'enneigement en fonction de l'altitude

La figure 46 illustre la variation des surfaces de la neige par tranche d'altitude sur l'ensemble de la zone d'étude, durant la période allant de 03/02/2009 à 01/06/2009. Le taux d'enneigement croît avec l'altitude, il atteint son maximum le 03/02/2009 vers les altitudes allant de 2600 à 3000m. Si on raisonne sur l'ensemble des courbes représentées, on constatera que le taux d'enneigement est toujours supérieur à 50% pour la période allant de 03/02/2009 jusqu'à 08/04/2009 sur des altitudes supérieures à 3000m. Les altitudes d'enneigement minimales sont de l'ordre de 1100m pour les saisons humides contre 1900m pour les saisons sèches.

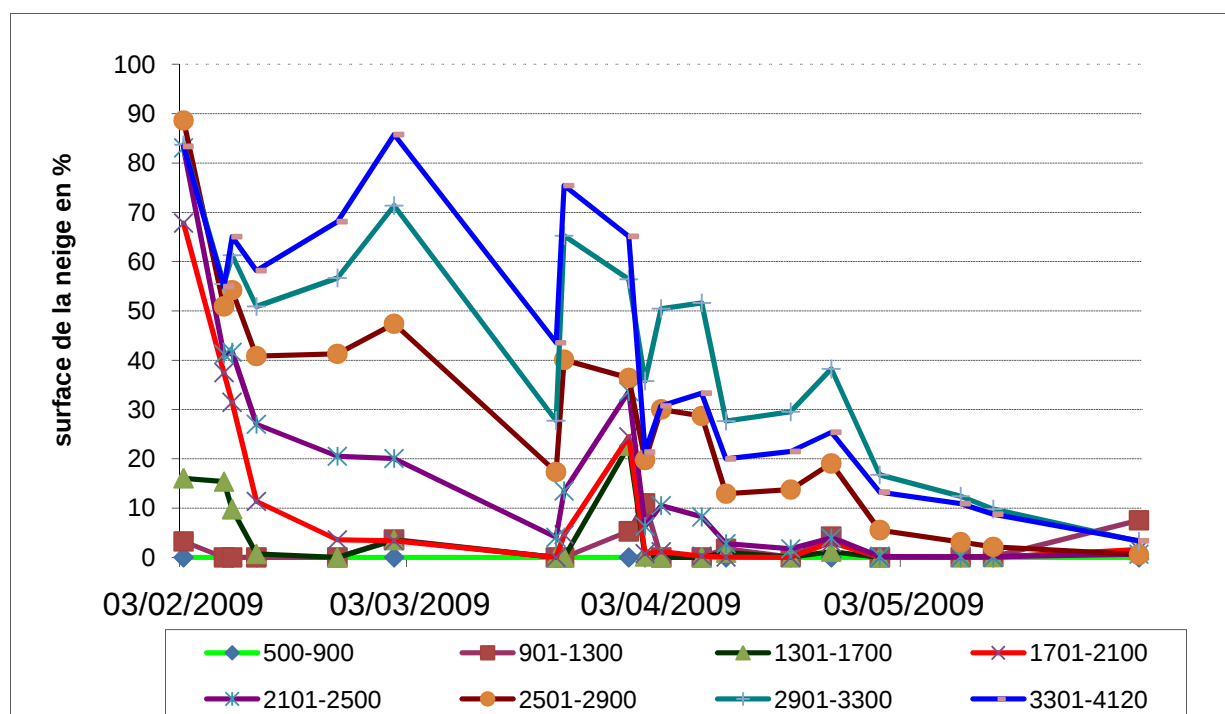


Figure 46: variation du pourcentage de la neige selon l'altitude

5.2. Variation du pourcentage de la neige en fonction de l'exposition

La figure 47 représente la variation du pourcentage de la neige en fonction de l'exposition. On remarque que le pourcentage d'enneigement atteint son maximum (80%) durant la période d'hiver et selon l'orientation Nord, en raison de l'exposition de cette dernière aux perturbations pluvieuses provenant de l'Océan Atlantique avec une direction Nord-Ouest.

Le pourcentage de la surface de la neige est presque confondu selon les deux orientations Nord et Sud durant la période hivernale et commence à se différencier selon les deux au début de la période estivale en raison de la fonte des neiges.

Les versants Sud ne sont pas affectés par ces perturbations car ils sont protégés par les sommets centraux du Haut Atlas qui forment un obstacle devant les perturbations pluvieuses et sont caractérisés par une longue durée d'ensoleillement au cours de l'année, ce qui leur rend plus chauffés et alors ne peuvent pas contenir beaucoup de neige.

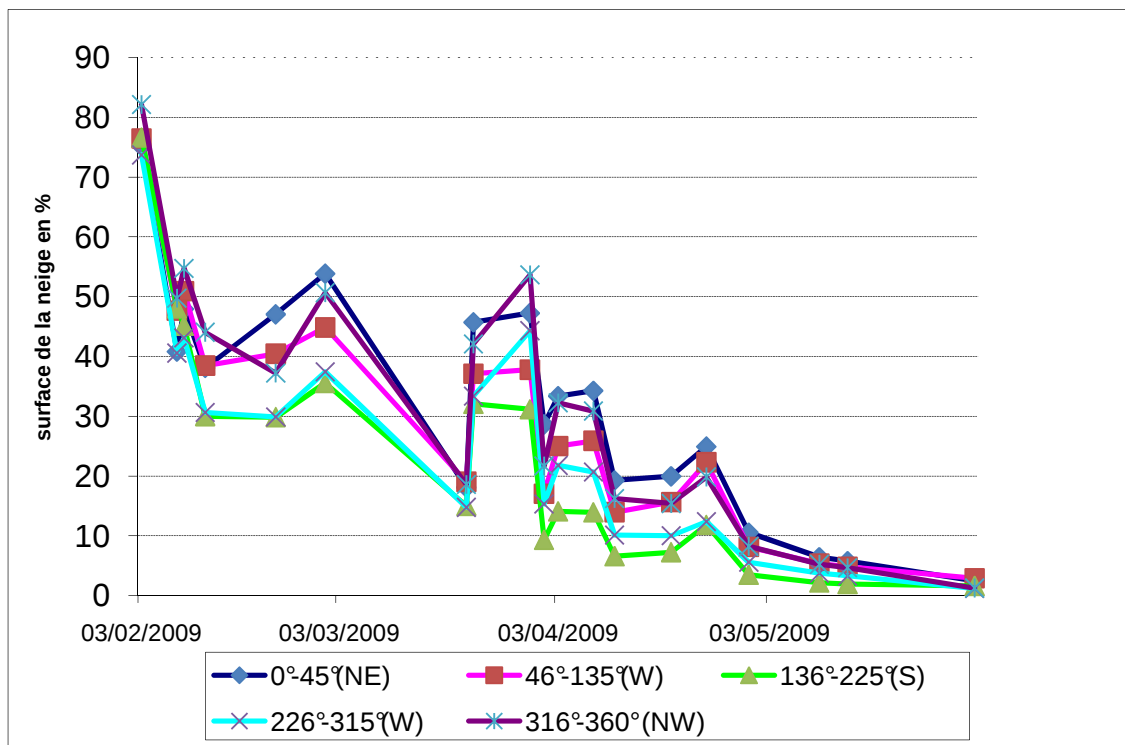


Figure 47: variation du pourcentage de la neige en fonction des expositions

Chapitre IV : Relation entre l'enneigement et les paramètres hydro-climatiques

1. Introduction

Dans cette partie, nous allons comparer les données hydro-climatiques avec la variation de la surface enneigée, dans le but d'estimer le degré d'influence des changements hydro-climatiques sur la surface de la neige.

Les figures ci-dessous présentent les cas de variation de la surface enneigée en fonction des paramètres hydro-climatiques.

2. Effet de la température

L'influence de la température de l'air est considérée comme le principal facteur de la variation de la surface enneigée, en raison de la sensibilité de la couche neigeuse à la fluctuation de la température de l'air. La figure 48 illustre la comparaison entre les surfaces de neige estimées avec les données FORMOSAT2 et les mesures de la température enregistrées dans les stations météorologiques du projet SudMed situées en montagne. On note une cohérence entre la variation de la surface neigeuse et celle de la température, tel que les pics des surfaces enneigées coïncident avec des minima de températures, tandis que les périodes de fontes correspondent à des périodes de réchauffement temporaire.

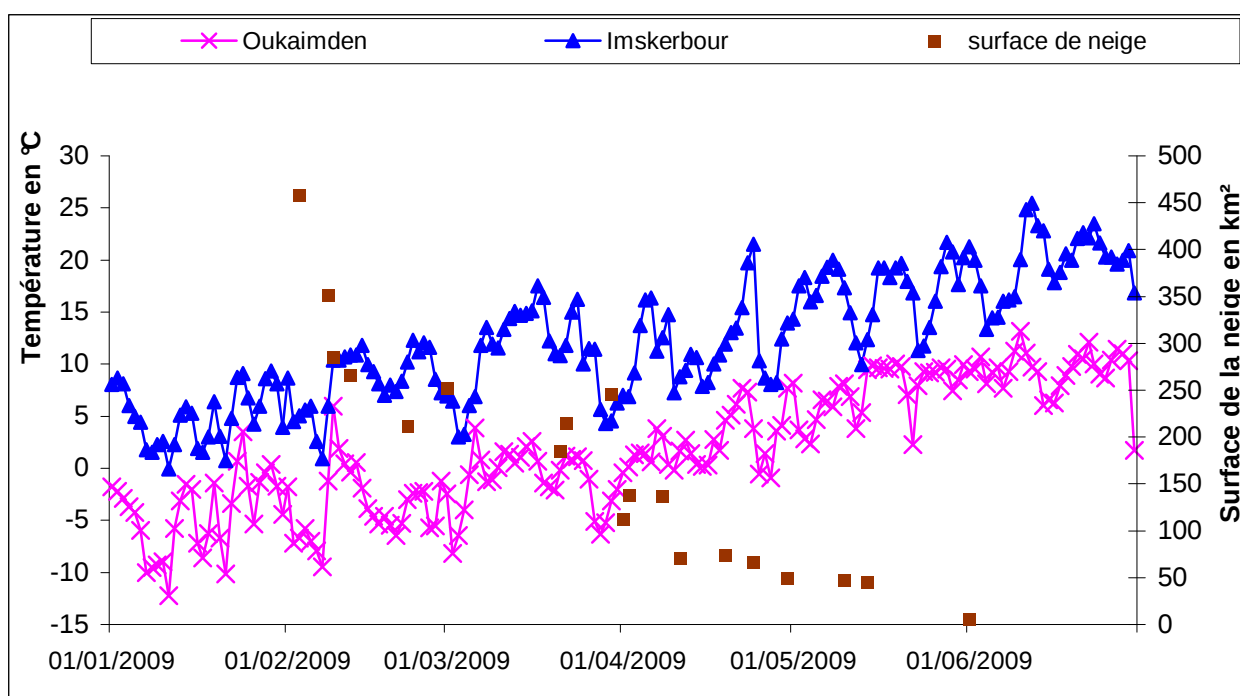


Figure 48: variation de la surface de la neige en fonction de la température.

3. Comparaison « Neige-Pluies-Hauteurs de la neige »

La Figure 49 montre la comparaison entre les surfaces de neige calculées à partir des données de la télédétection et les pluies mesurées au niveau de la station d'Oukaimden à 3200m d'altitude. On remarque qu'il y a une forte corrélation entre les pluies et les variations de surfaces enneigées calculées en période hivernale. Les pics d'enneigement correspondent aussi à des chutes des pluies. Alors que cette corrélation disparaît avant l'hiver et à la fin du printemps.

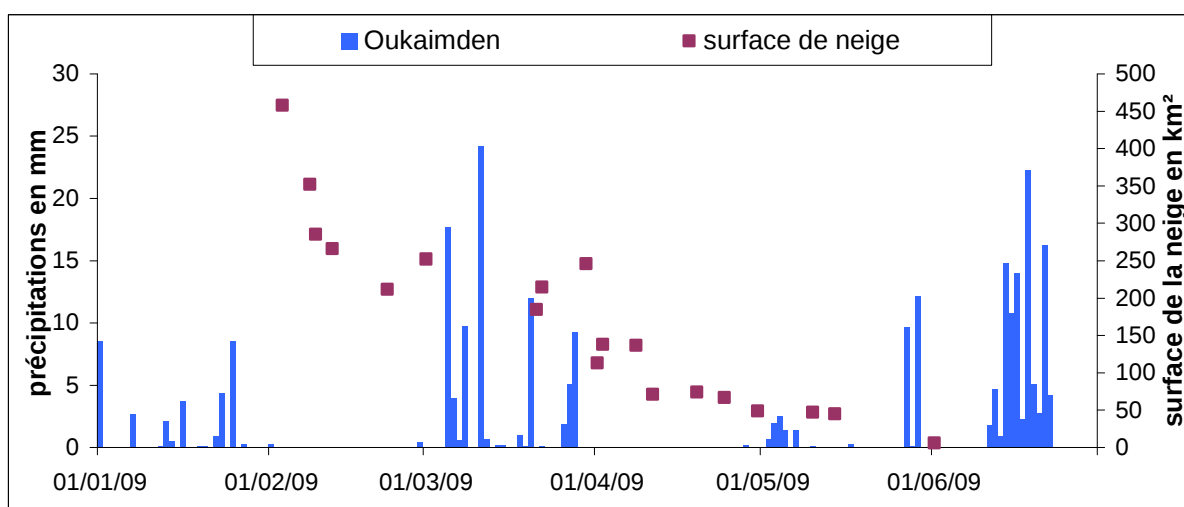


Figure 49: variation de la surface de la neige en fonction des précipitations.

La figure 50 illustre la dynamique des hauteurs de neige en montagne à la station d'Oukaimden en relation avec les surfaces de neige calculées. On note que les augmentations des surfaces de neige sont en relation avec les hauteurs de neige mesurées. La stabilisation fréquente de la hauteur de la neige qui reste constante en 1,5 cm, est due à la couverture totale de la station de mesure par la neige, ce qui empêche la prise des mesures. Cela a été l'origine de l'accumulation exceptionnelle de la neige en 2009, année où le Maroc a connu des précipitations record.

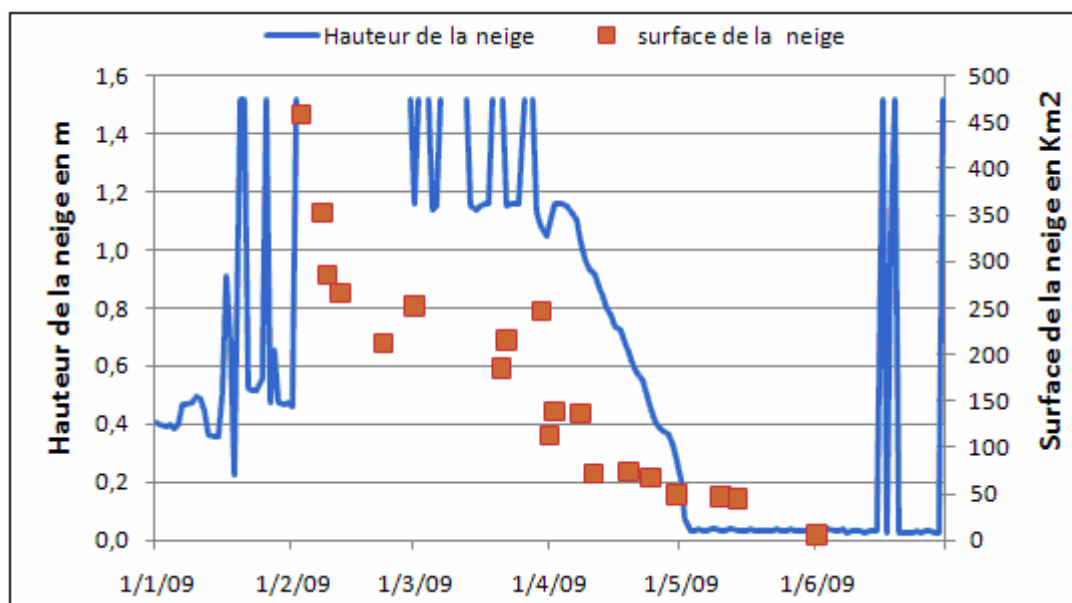


Figure 50: variation de la surface de la neige en fonction des hauteurs de la neige.

4. Comparaison « Neige-Rayonnement global »

La figure 51 représente la variation de la surface de la neige en fonction du rayonnement global mesuré selon les deux stations Oukaimden et Armed. On constate que la relation « neige-rayonnement global » est une relation inverse. Lorsque le rayonnement augmente la neige fond et alors la surface enneigée diminue. Les valeurs minimales du rayonnement global peuvent atteindre 0 w/m² et les valeurs maximales sont de l'ordre de 400w/m² selon les deux stations Armed et Oukaimden.

Cette variation du rayonnement global est due à la variation des altitudes des deux stations qui fait que les stations les plus hautes reçoivent plus de rayonnement que celles en basses altitudes.

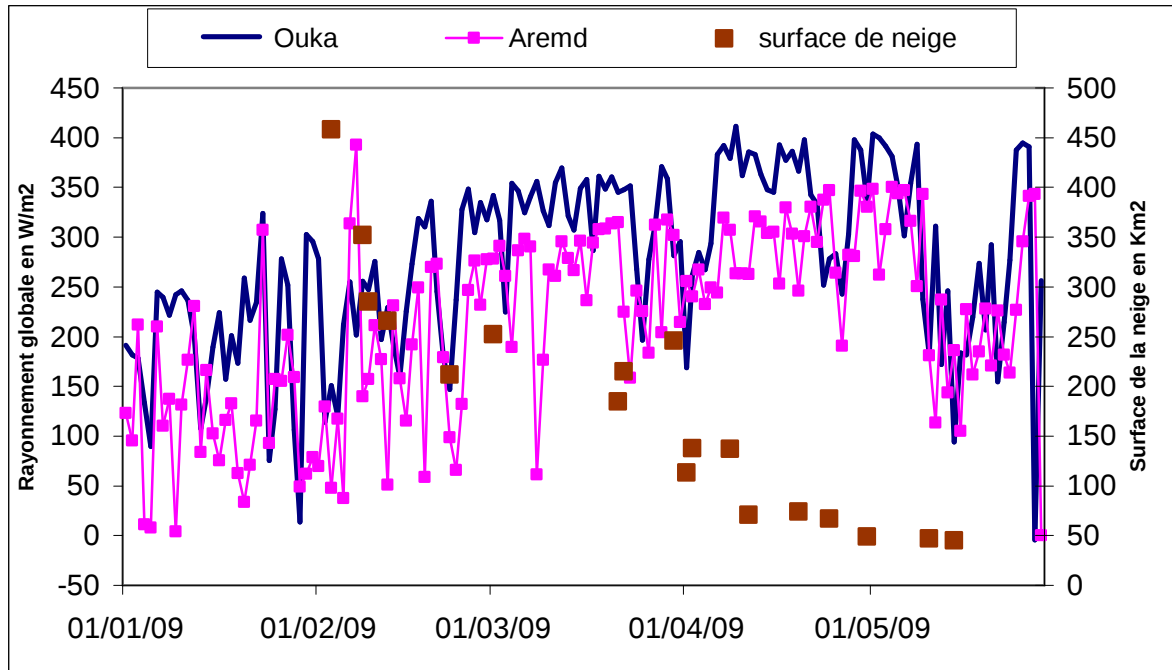


Figure 51: variation de la surface de la neige en fonction du rayonnement global

5. Comparaison « Neige- Humidité relative »

D'après la figure 52 qui illustre la relation entre la neige et l'humidité relative, on note qu'il existe une relation étroite entre les deux et que l'humidité mesurée selon les trois stations (Neltner, Armed) est très variable à l'échelle temporelle, caractérisée par des chutes (le plus faible pourcentage est de l'ordre de 15%) et des augmentations (le maximum peut atteindre 90%) successives. Quand l'humidité atteint les 90%, la surface de la neige augmente. En raison de la saturation de l'air humide qui donne naissance à des précipitations (solides ou liquides) et alors fait augmenter la surface enneigée (Figure 52).

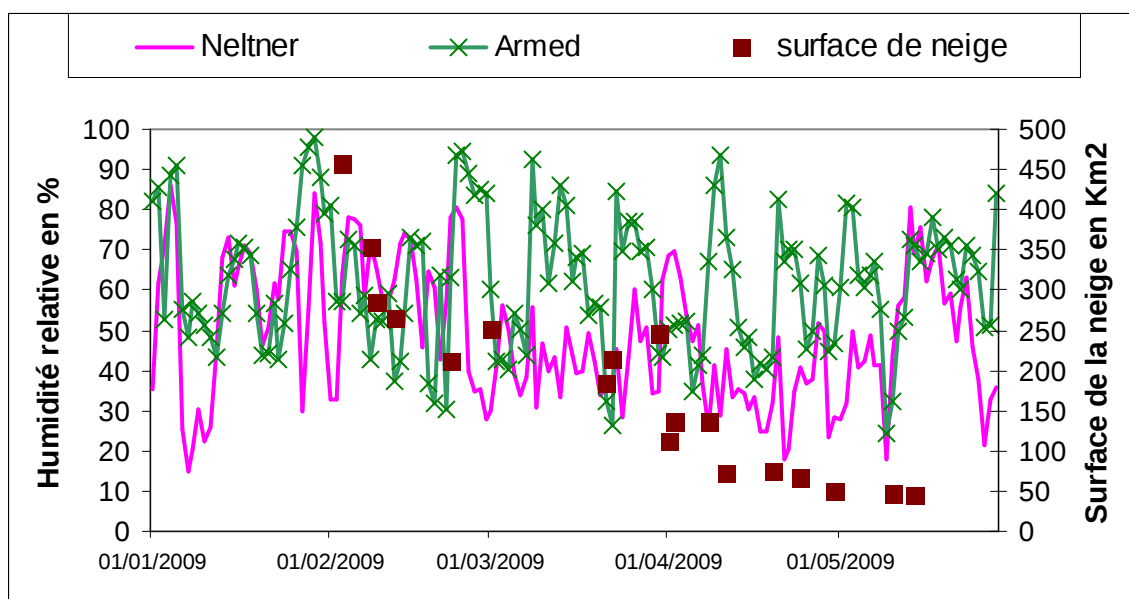


Figure 52: variation de la surface de la neige en fonction de l'humidité relative.

6. Comparaison « Neige-Vitesse du vent »

La figure 53 montre l'influence de la vitesse du vent sur la variation de la surface enneigée, tel que son augmentation qui peut atteindre 11 w/m^2 (station d'Oukaimden) engendre une diminution de la surface enneigée (passage de 252 à 200 km^2). Car un vent fort fait enlever des portions de surfaces enneigées et les dépose dans une autre superficie de la zone d'étude, ce qui fait que la surface enneigée diminue dans une tranche et augmente dans une autre.

La variation des vitesses du vent selon les deux stations résulte de la différence des altitudes, car en hautes altitudes (station d'Oukaimden) la vitesse du vent est importante, tandis qu'en basses altitudes (stations d'Armed) cette dernière est moyenne à faible, en raison de l'effet de barrière en basse altitude par les montagnes adjacentes.

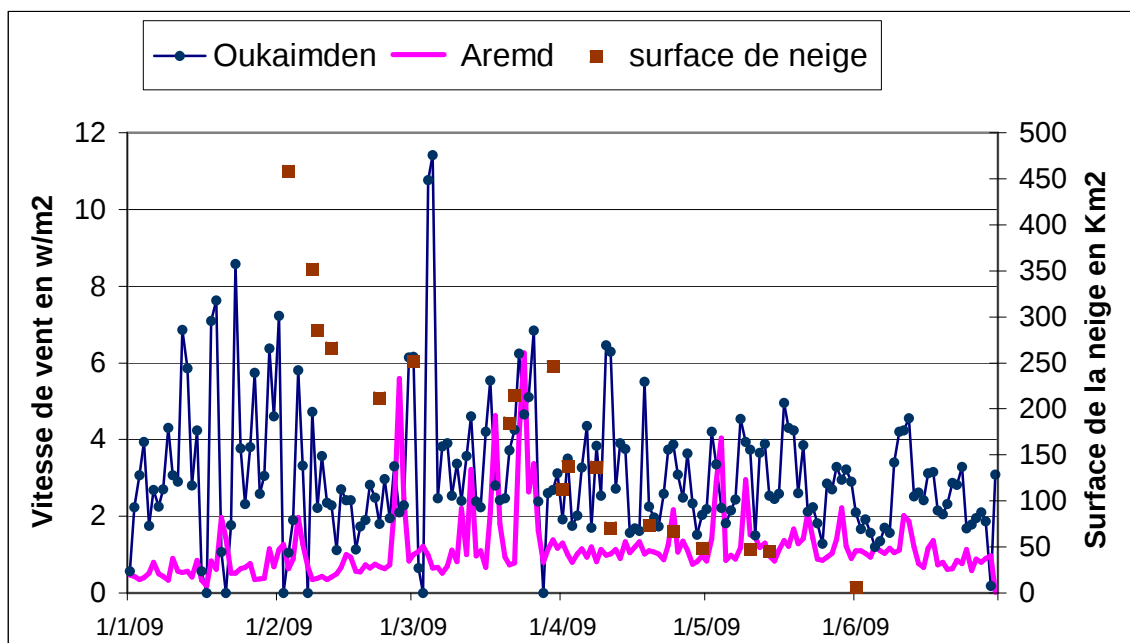


Figure 53: variation de la surface de la neige en fonction de la vitesse du vent.

7. Comparaison « Neige- Débit »

La figure 54 illustre le changement des débits journaliers en fonction de la variation des surfaces enneigées. Si on raisonne « Débit-Neige », on dira que c'est une relation simple et généralement étroite. On remarque de la figure ci-dessous que généralement un grand débit est lié à la diminution de la surface enneigée et alors à la fonte des neiges.

La fin du mois de Mars est caractérisée par un grand débit et une petite quantité de surface de neige fondue. De ceci on peut dire que le débit fort (12 m³ /s) n'est pas seulement lié à la grande surface de neige fondue mais il peut être dû aux fortes précipitations (pluies) qui ruissellent et se dirigent vers l'exutoire du bassin versant.

De l'autre côté, on peut noter une diminution importante de la surface enneigée accompagnée par un débit faible à l'exutoire, c'est le cas des deux mois de Février et Mars. Cette contrainte peut être expliquée par l'infiltration des eaux issues de la fonte des neiges dans le sol ou par l'évaporation qui provoquent des pertes énormes et rend le débit faible à l'exutoire.

Le débit de base est assimilable à l'écoulement qui se produit dans un cours d'eau pendant les périodes sans précipitations. Il augmente avec la diminution de la surface de la surface de la neige issue de la fonte (Figure 54).

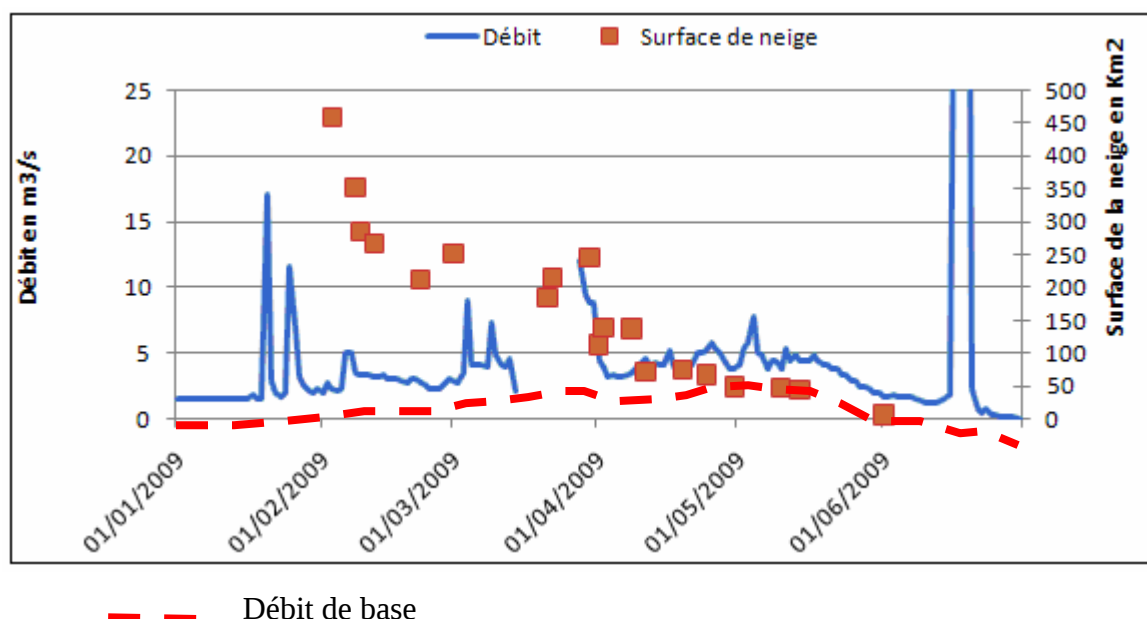


Figure 54: variation du débit en fonction de la surface de neige

8. Corrélation entre la surface de la neige et tous les facteurs climatiques

La figure 55 représente la corrélation entre la surface de la neige et les différents paramètres climatiques : température, vitesse du vent, rayonnement global et l'humidité relative dans les stations d'Oukaimden (3226 m) et celle d'Armed (1970 m).

Généralement, on note qu'il y a une corrélation entre la variation de la surface de la neige et la température, la hauteur de la neige ainsi que le rayonnement global. Tandis qu'une corrélation très faible existe entre celle-ci et l'humidité relative sans oublier la vitesse du vent.

D'après la figure 55 (A1 et A2), on peut constater que la corrélation entre la surface de la neige et la température est moyenne à faible, avec un coefficient de détermination de l'ordre de 0.25 pour la station d'Oukaimden et de 0.51 pour la station d'Armed.

On note que les surfaces très enneigées caractérisent des périodes avec des températures très basses.

L'existence d'une forte corrélation entre la variation de la surface de la neige et celle du rayonnement global confirme la corrélation moyenne qui existe entre la surface de la neige et la température. Tel que les fortes valeurs du rayonnement global sont dues généralement aux grandes valeurs de la température au niveau des deux stations (Figure 55(B1, B2)).

La figure 55(C1, C2) montre une variation irrégulière de la surface de la neige en fonction de l'humidité relative. On note qu'il n'y a aucune corrélation entre ces deux paramètres. Cela peut être expliqué par le temps qu'il faut pour qu'une masse d'air se sature et donne naissance à des précipitations.

La variation de la surface de la neige en fonction de la vitesse du vent ne présente aucune corrélation au niveau de la station d'Oukaimden la plus haute dans la zone d'étude (3226m). En revanche, on note une faible corrélation entre la variation de la vitesse du vent et la surface de la neige dans la station d'Armed (1970m) (Figure 55(D1, D2)). Ceci peut être expliqué par la variabilité de la vitesse du vent entre ces deux stations, ce qui provoque le déplacement ou le dépôt de ces masses de neige et alors fait varier les surface enneigées.

La hauteur de neige a une bonne corrélation avec la variation des surfaces de la neige. La figure 55 E illustre cette corrélation, dont le coefficient de détermination est de l'ordre de 0,67. Pour des grandes surfaces de neige on note des hauteurs très élevées de la neige qui atteignent une valeur maximale de l'ordre de 1,50m.

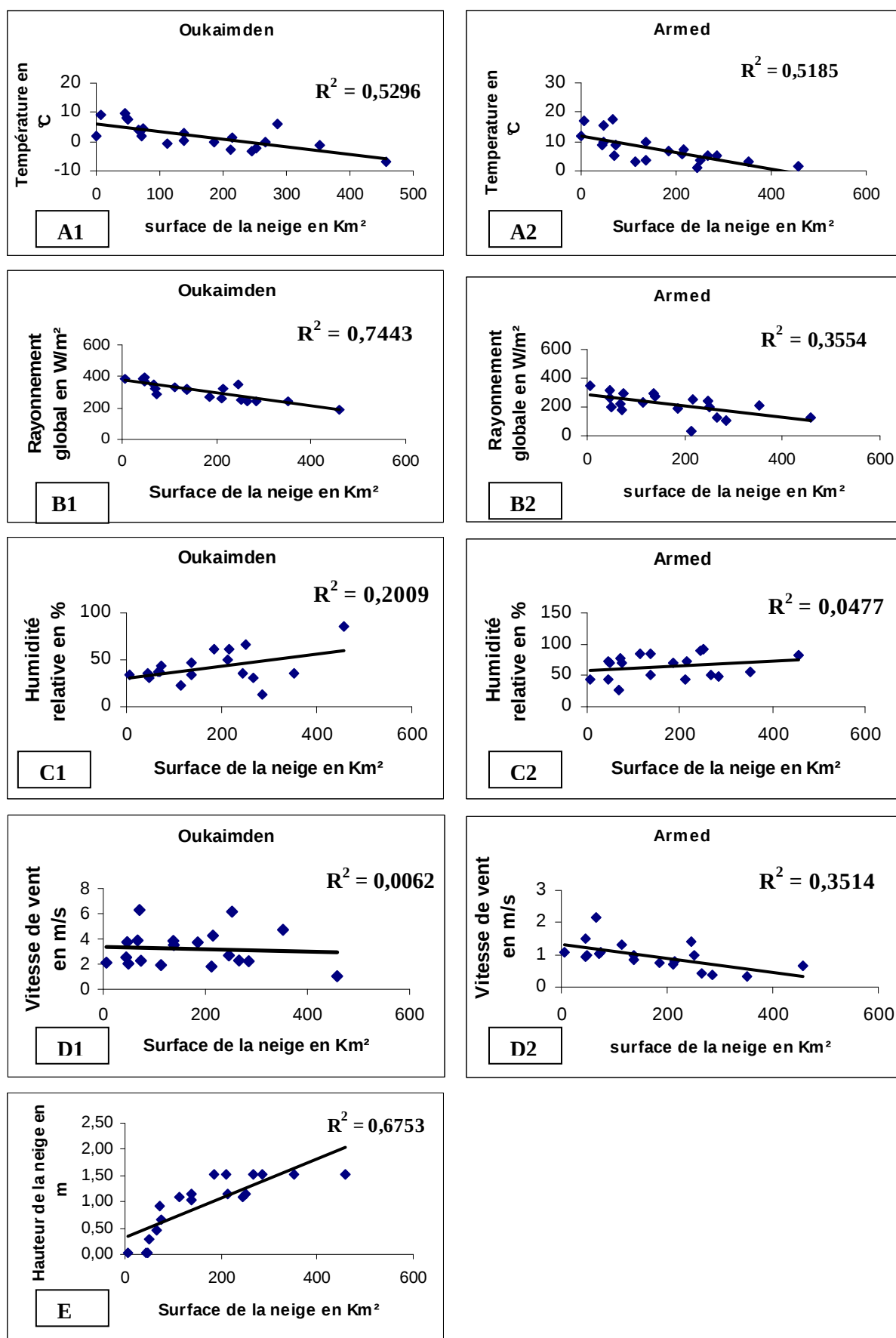


Figure 55 : corrélation entre la surface de neige et les paramètres climatiques

Conclusion

Le grand pourcentage du territoire marocain est soumis à un climat aride et semi aride. Les ressources en eau dans la région de Tensift sont limitées et subissent une surexploitation à cause des périodes de sécheresses et la croissance des besoins en eau.

L'extension des zones irriguées, le développement du domaine touristique ainsi que l'accroissement démographique sont les facteurs qui favorisent une mobilisation des ressources hydriques.

Notre travail s'est focalisé sur une zone dans le bassin versant de Tensift de la chaîne montagneuse du Haut Atlas de Marrakech qui constitue une barrière orographique contrôlant les variations climatiques grâce à ses hautes altitudes. Partie où le sous bassin versant de Rhéraya occupe environ 40% de la surface de la zone d'étude. Ces montagnes constituent un réservoir d'eau grâce aux précipitations qui sont généralement sous forme de neige. Ce manteau neigeux va être libéré selon les facteurs climatiques dans les cours d'eau et participera ainsi à la production des ressources en eau. La télédétection est un outil performant pour étudier l'enneigement dans le Haut Atlas.

La problématique abordée dans ce travail consiste à la quantification des ressources en eau disponibles dans les montagnes. Pour cela, nous avons utilisé les données issues des images satellites et les données mesurées sur six stations météorologiques dans le bassin versant de Rhéraya.

Les images issues du satellite FORMOSAT 2 à haute résolution spatiale (8* 8 m) et haute répétitivité temporelle, nous ont permis de cartographier les surfaces neigeuses dans le Haut Atlas.

Avant l'extraction des surfaces de neige, nous avons effectué une analyse de la réflectance en fonction de la topographie (exposition et l'altitude). Elle évolue d'une façon proportionnelle avec l'altitude (l'effet des perturbations très faible) pour les bandes de visible et la bande de PIR. Cette dernière diminue selon la saison estivale à cause de l'apparition de la végétation.

Cependant la réflectance varie d'une manière irrégulière selon les expositions. Cela peut être expliqué par la variation du taux d'enneigement sur chaque tranche.

Les cartes de neiges produites en utilisant une classification neige/non neige sont utilisées pour décrire la variabilité spatio-temporelle de l'enneigement selon l'exposition, la pente et par tranche d'altitude. Le maximum de surfaces enneigées était enregistré au début de mois Février (458 km²) et la fonte se fait durant les deux mois Avril et Mai. Les altitudes qui reçoivent plus de neige sont supérieur à 2900 m. Les versants orientés Nord reçoivent plus de neige par rapport à ceux orientés vers le sud.

Afin de valider les cartes de neige obtenues, nous les avons comparé avec les données hydro-climatiques mesurées. Les variations du taux d'enneigement sont généralement cohérentes avec les données hydro-climatiques disponibles sur la région (hauteur de neige, précipitation, température et débit a l'exutoire).

Cette étude montre l'intérêt d'utilisation des données de la télédétection à haute résolution spatiale et temporelle pour mieux caractériser l'enneigement en montagne semi aride. Les résultats obtenus constituent une étape essentielle pour comprendre une composante du cycle hydrologique mal connue dans la région et qui est la neige. Les cartes de neige produites peuvent constituer une base pour calibrer et valider des modèles de fonte de neige à l'échelle du bassin versant dans un objectif de quantifier les ressources en eau issues de la neige.

Bibliographie

- 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, (Article scientifique : Sécheresse 2007 ; 18(4) :278-88).
- 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 .
- BOULET.G, DUCHEMIN.B, 2010, Haut Atlas marocain : Suivi des neiges pour une meilleure gestion de l'eau, (Article scientifique :Actualité scientifique, fiche n°40-Février 2010).
- Centre Canadien de Télédétection,(CCT) Ressources naturelles Canada ,Notions fondamentales de télédétection, pdf, 266p.
- ER-RAKI. S, 2007, Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, Expérimentation et Télédétection, Thèse de doctorat , Université Cadi Ayyad (Faculté des Sciences Samlalia), 128p.
- Esa. (Agence Spatiale Européenne), Introduction à la télédétection, pdf.
- GIRARD.M.C, 1999, Traitement des données de télédétection, 529p.
- HANICH, L .Application de la télédétection à la cartographie de l'enneigement du Haut Atlas de Marrakech à partir d'images SPOT VEGETATION et LANDSAT TM, pdf.
- IBOUH, H .2008 .Initiation au traitement des images satellitaires. (Cours).
- LACOMBE.J, 2006, Présentation du Logiciel ENVI 4.1, 139p.

Wébographie

www.wikipédia.com

www.ird.fr

www.spotimage.com

www.smsc.cnes.fr /VENUS/FR/formosat-2.htm

Annexe

Dates	SCAT après correction	SCAT avant correction
03/02/09	459,09	458
08/02/09	272,42	352
09/02/09	285,18	285
12/02/09	209,05	266
22/02/09	210,18	212
01/03/09	252,61	252
21/03/09	99,99	185
22/03/09	217,99	215
30/03/09	246,9	246
01/04/09	95,56	113
03/04/09	139,02	138
08/04/09	137,5	137
11/04/09	71,17	71
19/04/09	74,03	74
24/04/09	62,12	67
30/04/09	39,09	49
10/05/09	25,23	47
14/05/09	22,5	45
01/06/09	11,03	6

Annexe 1 : Variation des surfaces de la neige selon le temps avant et après correction topographique (02/2009-06/2009)

Tranche	Classe	surface (km2)	surface (%)
tranche 1	0°-10°	37,10	6,70
tranche 2	11°-20°	108,23	19,54
tranche 3	21°-30°	171,61	30,98
tranche 4	31°-40°	19,93	3,60
tranche 5	41°-50°	0,58	0,11
tranche 6	51°-60°	216,49	39,08

Annexe 2 : Tranches de pente en Km² dans l'image

Tranche	Classe	surface (km2)	surface (%)
tranche 1	500-900	0,00	0,00
tranche 2	901-1300	4,78	0,79
tranche 3	1301-1700	45,81	7,61
tranche 4	1701-2100	94,11	15,64
tranche 5	2101-2500	119,97	19,93
tranche 6	2501-2900	127,74	21,22
tranche 7	2901-3300	114,58	19,04
tranche 8	3301-4120	94,88	15,76

Annexe 3 : Tranches d'altitude en Km² dans l'image

Tranche	Classe	surface (km2)	surface (%)
tranche 1	0°-45°	57,38	9,65
tranche 2	46°-135°	138,75	23,34
tranche 3	136°-225°	146,13	24,58
tranche 4	226°-315°	176,33	29,66
tranche 5	316°-360°	75,83	12,76

Annexe 4 : Tranches d'exposition en Km² dans l'image

Tranche	1	2	3	4	5	6	7	8
Date de l'image	500-900	901-1300	1301-1700	1701-2100	2101-2500	2501-2900	2901-3300	3301-4120
03/02/2009	0,00	0,15	7,35	63,80	99,64	113,21	95,85	79,08
08/02/2009	0,00	0	7,04	35,27	49,41	65,05	63,54	52,10
09/02/2009	0,00	0	4,47	29,60	49,92	69,26	70,20	61,72
12/02/2009	0,00	0	0,32	10,70	32,40	52,14	58,32	55,20
22/02/2009	0,00	0	0,00	3,34	24,60	52,71	64,93	64,59
01/03/2009	0,00	0,17	1,60	3,17	24,06	60,55	81,72	81,37
21/03/2009	0,00	0,00	0,00	0,01	4,87	22,12	31,79	41,31
22/03/2009	0,00	0,00	0,00	4,34	16,16	51,20	74,75	71,54
30/03/2009	0,00	0,25	10,37	23,00	40,34	46,54	64,62	61,77
01/04/2009	0,00	0,52	0,09	0,74	7,57	25,25	40,97	20,26
03/04/2009	0,00	0,00	0,00	1,09	12,64	38,34	57,79	29,15
08/04/2009	0,00	0,00	0,01	0,24	9,86	36,65	59,13	31,58
11/04/2009	0,00	0,08	0,43	0,08	3,36	16,50	31,70	18,98
19/04/2009	0,00	0,00	0,03	0,02	2,12	17,59	33,85	20,40
24/04/2009	0,01	0,20	0,53	2,89	4,74	24,35	43,78	24,10
30/04/2009	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	7,08	19,20	12,54
10/05/2009	0,00	0,00	0,03	0,00	0,18	3,94	14,22	10,36
14/05/2009	0,00	0,01	0,03	0,01	0,14	2,74	11,22	8,33
01/06/2009	0,00	0,36	0,66	1,52	0,80	0,71	3,73	3,22

Annexe 5 : Variation de surface de la neige selon les altitudes en Km²

Tranche	tranche 1	tranche 2	tranche 3	tranche 4	tranche 5	tranche 6
Date de l'image	0°-10°	11°-20°	21°-30°	31°-40°	41°-50°	51°-60°
03/02/2009	20,16	73,48	137,52	16,45	0,50	165,42
08/02/2009	11,12	39,16	86,70	9,72	0,26	98,62
09/02/2009	11,76	41,62	91,18	11,35	0,35	101,06
12/02/2009	8,68	31,07	64,64	8,35	0,22	75,71
22/02/2009	10,10	36,76	55,39	7,79	0,23	78,98
01/03/2009	10,97	38,91	76,84	10,93	0,36	89,94
21/03/2009	4,96	14,61	30,90	4,14	0,12	35,72
22/03/2009	7,88	29,81	69,18	9,06	0,23	80,14
30/03/2009	11,85	45,40	65,06	7,84	0,24	92,49
01/04/2009	4,92	16,16	24,94	3,11	0,09	37,10
03/04/2009	5,47	19,28	43,11	6,31	0,19	51,07
08/04/2009	5,56	19,52	42,62	6,54	0,20	49,69
11/04/2009	2,84	9,95	22,03	3,29	0,12	26,15
19/04/2009	2,88	11,01	22,26	3,51	0,12	27,01
24/04/2009	3,58	13,68	32,38	5,10	0,17	35,91
30/04/2009	1,57	5,74	11,95	2,00	0,09	13,88
10/05/2009	1,12	3,64	8,07	1,43	0,07	8,30
14/05/2009	1,04	3,26	7,27	1,33	0,07	7,21
01/06/2009	0,71	2,05	3,01	0,49	0,03	3,58

Annexe 6 : Variation de surface de la neige selon les pentes en Km²

Tranche	tranche 1	tranche 2	tranche 3	tranche 4	tranche 5
date de l'image	0°-45°(NE)	46°-135°(W)	136°-225°(S)	226°-315°(W)	316°-360°(NW)
03/02/2009	43,16	106,20	112,00	130,05	62,30
08/02/2009	23,45	66,20	70,24	71,57	37,75
09/02/2009	27,55	70,71	65,98	76,05	41,50
12/02/2009	21,88	53,44	43,87	54,03	33,41
22/02/2009	27,03	56,18	43,65	52,71	28,22
01/03/2009	30,94	62,30	51,96	66,02	38,44
21/03/2009	10,39	26,45	21,94	26,05	14,10
22/03/2009	26,26	51,54	46,90	58,87	31,92
30/03/2009	27,15	52,49	45,55	78,18	40,70
01/04/2009	16,46	23,67	13,64	27,01	16,46
03/04/2009	19,18	34,76	20,60	38,42	24,45
08/04/2009	19,69	35,97	20,36	36,48	23,42
11/04/2009	11,07	19,38	9,65	17,90	12,33
19/04/2009	11,47	21,71	10,62	17,68	11,69
24/04/2009	14,32	30,98	17,29	21,82	15,05
30/04/2009	6,05	11,34	5,10	9,88	6,25
10/05/2009	3,69	7,43	3,19	6,65	3,97
14/05/2009	3,32	6,69	2,84	5,85	3,54
01/06/2009	1,43	4,04	2,36	2,13	0,96

Annexe 7 : Variation de surface de la neige selon les expositions en Km²

Classes	Altitude	PIR	Rouge	Vert	Bleu
1	1150-1298,5	272,54	124,60	109,58	102,51
2	1298,5-1447	257,61	134,69	114,87	107,25
3	1447-1595,5	234,65	123,93	108,22	103,77
4	1595,5-1744	228,40	122,83	108,37	103,68
5	1744-1892,5	213,16	131,70	112,07	103,85
6	1892,5-2041	213,26	139,35	118,39	108,73
7	2041-2189,5	206,26	139,22	117,76	108,31
8	2189,5-2338	198,03	138,24	117,40	108,75
9	2338-2486,5	190,75	138,92	118,26	109,94
10	2486,5-2635	193,41	140,30	119,55	110,16
11	2635-2783,5	194,21	143,05	121,84	111,49
12	2783,5-2930	184,95	141,43	119,96	110,63
13	2930-3080,5	181,27	141,40	119,67	111,04
14	3080,5-3229	177,39	141,38	119,28	111,39
15	3229-3377,5	172,68	142,05	119,62	112,44
16	3377,5-3526	171,68	144,92	121,85	115,01
17	3526-3674,5	166,68	145,35	122,45	116,46
18	3674,5-3823	169,66	150,92	127,35	121,08
19	3823-3971	166,74	149,72	127,17	121,70
20	3971-4120	170,38	152,20	128,48	121,52

Annexe 8 : Moyenne de la réflectance par bande selon les altitudes 01/06/2009

Classes	Altitude	PIR	Rouge	Vert	Bleu
1	1150-1298,5	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1298,5-1447	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1447-1595,5	4,67	1,71	1,86	1,95
4	1595,5-1744	10,56	5,27	5,07	5,25
5	1744-1892,5	29,48	16,19	15,68	16,89
6	1892,5-2041	49,43	27,97	27,32	29,62
7	2041-2189,5	48,01	31,22	29,24	30,65
8	2189,5-2338	49,75	35,67	32,64	33,78
9	2338-2486,5	51,82	39,62	36,23	37,80
10	2486,5-2635	65,52	56,25	51,99	54,04
11	2635-2783,5	125,53	117,04	109,36	112,98
12	2783,5-2930	219,15	214,38	202,30	206,64
13	2930-3080,5	289,76	289,42	273,24	278,57
14	3080,5-3229	367,34	371,84	350,02	352,97
15	3229-3377,5	414,24	422,38	393,68	391,93
16	3377,5-3526	416,81	422,04	390,18	385,66
17	3526-3674,5	423,00	425,27	389,25	379,57
18	3674,5-3823	545,47	547,20	497,44	479,85
19	3823-3971	712,27	711,65	645,27	620,06
20	3971-4120	789,11	772,50	686,02	649,83

Annexe 9 : Moyenne de réflectance par bande selon les altitudes 21/03/2009

Classes	Altitude	PIR	Rouge	Vert	Bleu
1	1150-1298,5	0,00	0,00	0,00	0,00
2	1298,5-1447	0,00	0,00	0,00	0,00
3	1447-1595,5	4,35	2,04	2,08	2,43
4	1595,5-1744	9,49	5,29	5,08	5,90
5	1744-1892,5	28,35	17,32	17,14	20,72
6	1892,5-2041	48,98	32,29	32,09	38,37
7	2041-2189,5	72,54	61,30	56,80	59,91
8	2189,5-2338	105,30	92,73	83,97	84,06
9	2338-2486,5	124,02	109,63	98,50	96,72
10	2486,5-2635	136,02	121,24	108,84	106,65
11	2635-2784	199,60	177,79	157,99	153,27
12	2783,5-2930	253,68	227,53	202,22	195,57
13	2930-3080,5	268,72	243,91	218,74	215,85
14	3080,5-3229	296,68	268,19	239,43	236,18
15	3229-3377,5	294,08	265,37	236,01	232,41
16	3377,5-3526	282,79	254,02	224,26	218,61
17	3526-3674,5	267,59	237,94	208,63	201,90
18	3674,5-3823	319,48	283,29	247,35	236,82
19	3823-3971	418,91	365,89	315,30	294,96
20	3971-4120	491,44	421,68	361,10	329,21

Annexe 10 : Moyenne de réflectance par bande selon les altitudes 03/02/2009

Classes	Orientation	PIR	Bleu	Vert	Rouge
1	N	74,03	53,89	45,57	42,07
2	NE	85,06	61,21	51,22	46,66
3	SE	75,44	55,14	46,11	41,86
4	S	76,29	53,93	45,17	40,91
5	S	69,83	49,17	41,94	39,06
6	SW	68,61	47,42	40,87	38,71
7	NW	67,55	48,28	41,83	40,22
8	N	63,01	45,99	39,57	37,60

Annexe 11 : Moyenne de réflectance par bande selon les expositions 01/06/2009

Classes	Orientation	PIR	Bleu	Vert	Rouge
1	N	131,19	115,81	104,05	103,45
2	NE	156,42	134,38	117,95	113,12
3	SE	156,44	134,23	116,29	108,90
4	S	159,01	134,74	115,86	107,00
5	S	144,17	125,15	109,55	104,17
6	SW	115,43	102,45	93,08	94,34
7	NW	105,87	97,28	91,66	97,89
8	N	106,52	98,19	91,56	96,16

Annexe 11 : Moyenne de réflectance par bande selon les expositions 03/02/2009

Classes	Orientation	PIR	Bleu	Vert	Rouge
1	N	115,57	108,48	100,74	98,47
2	NE	120,99	109,41	98,99	94,58
3	SE	112,91	105,50	94,19	88,44
4	S	98,79	85,81	75,42	70,24
5	S	81,33	68,58	61,42	59,43
6	SW	79,14	66,34	60,89	60,93
7	NW	89,26	80,92	75,80	77,31
8	N	92,58	87,62	82,19	82,92

Annexe 12 : Moyenne de réflectance par bande selon les expositions 03/04/2009