

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE
License

« *EAU ET ENVIRONNEMENT* »

Mémoire de Stage de Fin d'Etudes

Apport de la télédétection dans l'évolution de la couverture végétale sur le versant Nord du Haut Atlas de Marrakech au cours de ces 30 dernières années.

Par
Salim Aymane

Encadré par : **Pr. IBOUH Hassan**

Soutenu le 23 devant le jury composé de:

Pr. IBOUH Hassan Faculté des Sciences et Techniques
Pr. RIZKI Faculté des Sciences et Techniques

REMERCIEMENTS

- Afin de vous faire part de mes *résultats* de travail, je me dois la *nécessité d'exprimer mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.*
- En premier lieu, *Un grand merci à Monsieur Le Professeur **IBOUH HASSAN**, mon enseignant de la Faculté des Sciences et techniques et mon encadrant du projet de fin d'études. Il a dirigé et suivi le travail de près, c'est grâce à ses connaissances, sa disponibilité et ses conseils que j'ai pu achever ce travail, à qui je tiens à lui formuler l'estime et ma profonde gratitude.*
- *Je le remercie également pour sa disponibilité. Je remercie aussi Mr.EL Halim doctorant, et aussi les membres du laboratoire m'avoir accueilli au sein de leur labo durant toute la période du stage, je les remercie aussi pour leurs conseils précieux.*
- *Ma reconnaissance est aussi adressée à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.*
- *Enfin ces remerciements ne seront pas complets sans citer les membres du jury qui ont bien voulu accepter de juger ce travail, qu'ils trouvent ici l'expression de ma gratitude.*

Sommaire

INTRODUCTION, Méthodes :

Premier Chapitre:

Présentation de La zone d'étude

I. Contexte géographique :

II. Contexte géologique:

III. Contexte climatique:

IV. Contexte hydrologique

Chapitre II: Matériel et Method

I- La télédétection

a- processus de la télédétection :

b). Domaines d'application

II. a)Le spectre électromagnétique

b):Réflectance spectrale

IV. Les capteurs et leur fonctionnement

V- Matériel de travail et apport de la télédétection

a)Généralité sur le mode de prise d'images, Résolution spatiale, espacement des pixels et échelle des images satellites.

b) capteur utilisé dans ce travail

c)Le choix des dates des images :

d) Prétraitement des images satellitaires

classification

a) Classification non supervisée (ou non dirigée) :

b) Classification supervisée (ou dirigée)

f)Les indices spectraux:

L'indice de l'eau de différence normalisée (NDWI)

Indice d'humidité (NDWI)

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Indice du sol par différence normalisée NDSI (Takeuchi and Yasuoka, 2004)

Chapitre III : Résultats et Discussions

- Introduction :
- 1. Variabilité spatio-temporelle de la végétation dans le Haut Atlas:
- 2. Variabilité spatio-temporelle des surfaces d'eau dans le Haut Atlas
- 3. Variabilité de l'humidité dans le Haut Atlas
- 4. Variabilité spatio-temporelle des surfaces NDSI dans le Haut Atlas
- Conclusion générale :

INTRODUCTION

Cette étude est une mise en place de la carte simple de végétation d'eau et du sol nu, sur le périmètre du versant nord du Haut Atlas de Marrakech. Son objectif est de suivre l'évolution des formations végétales et les surfaces d'eau dans le temps et dans l'espace. Pour cela, les changements dans la couverture du sol seront suivis sur une période allant de 1986 jusqu'à 2017 partagé en quatre périodes. Le couvert végétal sera cartographié et évalué à partir du traitement numérique des données spatiales (LANDSAT TM, ETM+.et OLI). Les cartes des indices de végétation, d'eau et du sol (NDVI, NDSI et NDWI) obtenues à l'issue des traitements ont permis d'identifier les dynamiques du couvert végétale, les surfaces d'eau et du sol.

Dans ce cadre on aura réalisé des spatiocartes, à partir des images satellites, du:

- Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), qui permet de donner une idée sur la disposition géographique du couvert végétal
- Normalized Difference Water Index (NDWI) qui permet de donner une idée sur la disposition géographique des surfaces d'eau.
- Normalized Difference Water (moisture) Index (NDWI) humidité qui permet de donner une idée sur la disposition géographique de l'humidité dans le sol et dans le couvert végétal ;
- Normalized Difference soil Water Index (NDSI) qui permet de donner une idée sur la disposition géographique du sol nu.

- **Objectifs** :

Le principal objectif de travail est en premier lieu une Initiation au traitement des images satellitaires à basse et à haute résolution spatiale. En deuxième lieu un essai d'élaboration des cartes des indices spectraux NDVI, NDWI et NDSI de la région du Haut Atlas de Marrakech qui constitue notre zone d'étude.

Il est donc question d'estimer le taux de variation de la végétation, des surfaces d'eau et des surfaces du sol dans la plaine depuis 1984 jusqu'à l'actuel. En fin essai d'établissement d'une carte d'occupation du sol de la zone d'étude.

- **Méthodes** :

Prise en main des logiciels de traitement des images satellites (Erdas), du SIG (Arcgis 10, Global mapper); Traitement et comparaison des différentes images multi-spectrales à basse et haute résolution spatiale et multi-temporelles (LANDSAT TM, ETM+ et OLI) ; Calcul, comparaison et détection du changement entre divers indices (NDVI, NDSI et NDWI) établis pour le versant Nord du Haut Atlas de Marrakech.

Premier Chapitre:

Présentation de La zone d'étude

I. Contexte géographique :

La zone qui nous intéresse dans cette étude est le versant Nord du Haut Atlas de Marrakech. Ce dernier est une barrière montagneuse de 40 à 80 Km de largeur, limité à l'Ouest par Jbel Toubkal (4167 mètres) et il s'étend jusqu'à l'Est de vallée du R'Dat. Il fait partie du bassin versant de Tensift. C'est un bassin au relief très contrasté (altitudes max de 4167m). Ce bassin versant est limité au Sud par la ligne de crête du Haut Atlas, au Nord par le massif des Jbilet, à l'Est par la ligne de partage des eaux, peu marquée, séparant le bassin du Tensift de celui de la Tessaout et à l'Ouest par l'océan Atlantique où se situe son exutoire (Figure .1).

L'oued Tensift traverse le bassin d'Est en Ouest. Il est alimenté de façon quasi exclusive par ses affluents rive gauche qui drainent les flancs Nord de l'Atlas. Rive droite, aucun cours d'eau pérenne n'existe, seuls des cours d'eau résultant d'événements pluvieux violents contribuent épisodiquement à l'alimentation de l'oued. Il en résulte un bassin versant très dissymétrique dont la rive droite ne joue qu'un rôle hydrologique secondaire.

La partie Sud du bassin, composée d'une succession de sous bassins montagneux orientés Sud Nord (Figure 2), représente le véritable château d'eau de la zone avec une hydrologie de surface très active. Entre les Jbilet et l'Atlas, la plaine du Haouz ne constitue pour l'hydrologie de surface qu'une zone de stockage, transit et de consommation de l'eau, l'hydrologie active ayant lieu en profondeur dans les nappes souterraines.

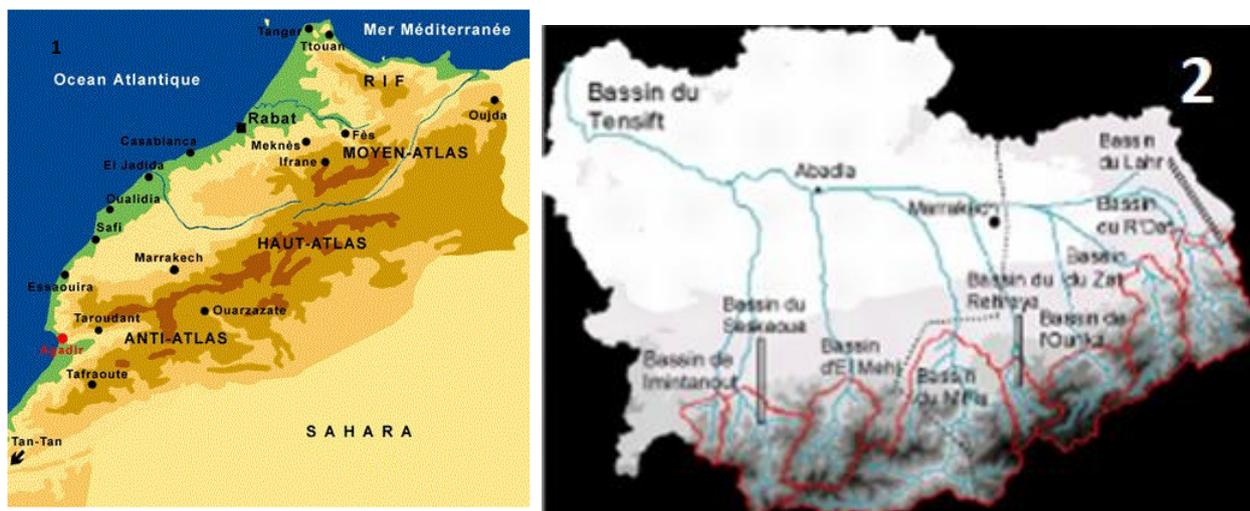


Figure 1 et 2 : Situation géographique et Présentation des sous bassins Atlasiques du bassin versant du Tensift

Ref:(https://www.memoireonline.com/10/09/2760/m_Suivi-spatio-temporel-de-la-couverture-neigeuse-dans-le-haut-atlas-de-marrakech--laide-des-images1.html)

II. Contexte géologique:

Le Haut Atlas de Marrakech est une chaîne de montagne jeune, contemporaine des Alpes en Europe. Il est constitué de roches sédimentaires de couleur rougeâtre (grès, argiles gréseuses) ou blanc-jaunâtre (calcaires) principalement déposées en milieu marin durant l'ère secondaire et qui ont été plissées et fracturées pendant l'ère tertiaire. Ces roches reposent sur un ensemble plus ancien de couleur plutôt grisâtre à jaunâtre, qui a été

plissé et fracturé au cours de l'ère primaire comme les Jebilet. Ce « socle hercynien » affleure au centre de la chaîne, comme au Tizi n'Tichka, au Jebel Toubkal, il comprend des schistes grisâtres et en particulier des granites. (Figure .3).

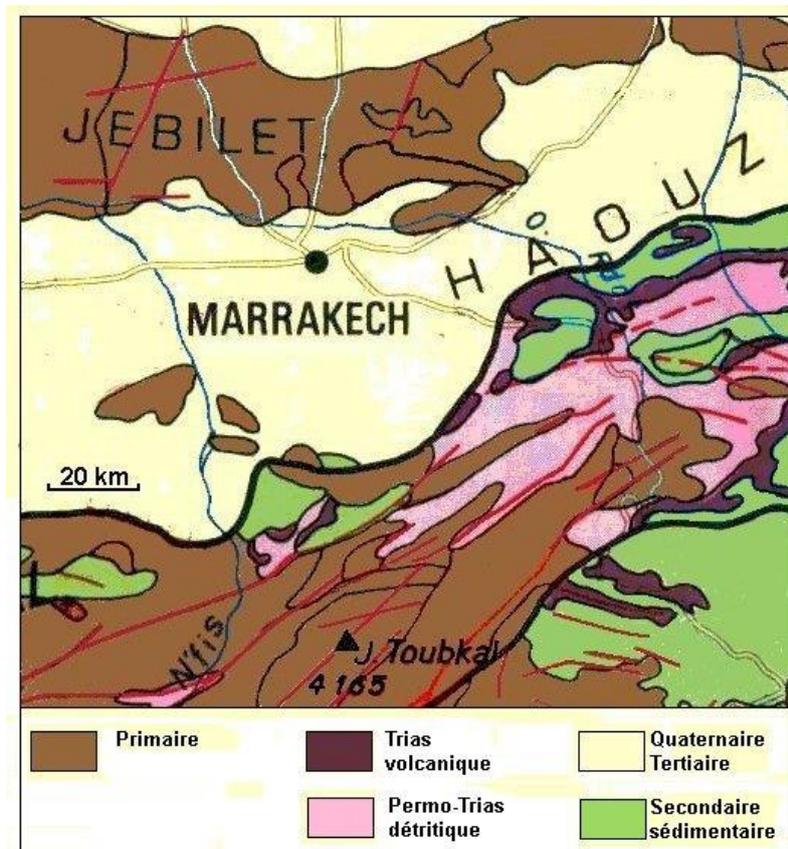


Figure3 : les temps géologique au alentour de Marrakech (extrait de la carte géologique de Marrakech 1/500000)

Dans la région de Marrakech la première chaîne de montagne bien connue a été formée au cours de l'ère précambrienne, il y a environ 1 milliard d'années. Elle a été érodée pendant une grande partie de l'ère primaire pendant une période d'extension et a fourni les matériaux des sédiments marins de l'ère primaire, ici surtout des sédiments détritiques (cailloutis, sables...)

A la fin de l'ère primaire, les masses continentales se rapprochent et les sédiments se déforment et édifient une nouvelle chaîne de montagne, la chaîne hercynienne, en Europe et au Maroc. Ses restes sont encore bien visibles dans le massif des Jebilet et dans l'axe du Haut Atlas de Marrakech.

III. Contexte climatique:

La partie du versant Sud de Toubkal à Imilchil et toute la partie Orientale du Haut Atlas est sous le climat semi-désertique continental. Ce climat couvre toute la partie des hautes steppes des déserts de pierres. Le climat est semblable à celui des montagnes rocheuses du Sud des Etats Unis.

L'étude des précipitations est basée sur l'exploitation des données pluviométriques enregistrées durant la période 1972 - 2002. Cette étude vise à définir la variabilité spatiale et temporelle des précipitations.

Les pluies mensuelles sont caractérisées par un régime pluviométrique très variable d'une année à l'autre. L'analyse des histogrammes relatifs aux répartitions des précipitations moyenne mensuelles sur 30 ans pour les stations, ce qui permet de constater que les précipitations sont groupées pendant la saison du mois de septembre au mois de mai avec deux maxima en novembre - décembre et en mars - avril. Quant aux valeurs minimales, elles sont obtenues généralement au cours des mois de juin, juillet et août. Les figure 3 et 4 montrent que les hautes altitudes reçoivent plus de précipitation que celles des basses altitudes (plaine), d'où l'importance de la chaîne Atlasique dans cette région de point de vue climatique (Figure .4).

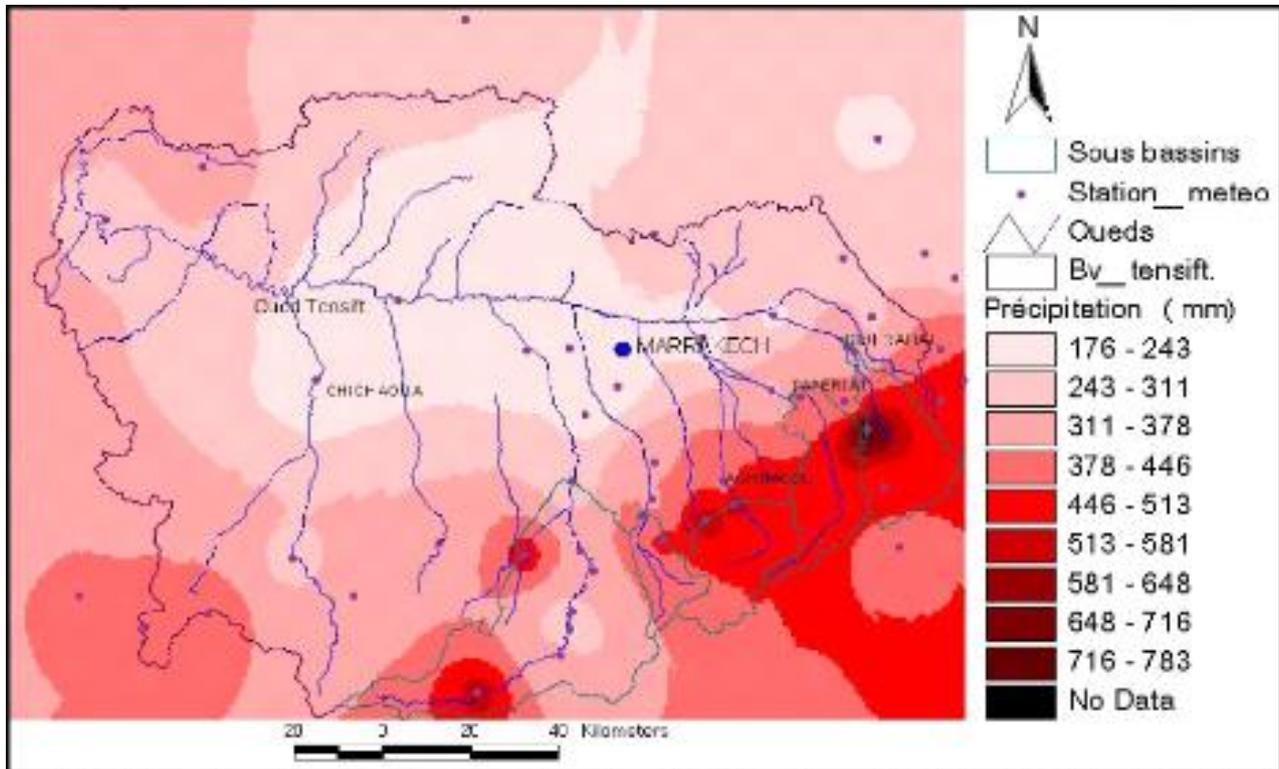


Figure 4: Variation de la précipitation en fonction d'altitude dans le bassin versant du Tensift

IV. Contexte hydrologique :

La partie Sud du bassin de Tensift, c'est-à-dire le versant Nord du Haut Atlas de Marrakech (Fig. 6), est caractérisée par des altitudes élevées pouvant dépasser 4000 mètres. A l'opposé la partie Nord est occupée par la plaine du Haouz dont l'altitude est voisine de 500 m. Les précipitations en montagne sont comprises entre 300 et 900 mm, alors que dans la plaine elles sont comprises entre 150 et 300 mm. Inversement, le besoin en eau est nettement supérieure dans la plaine où les températures sont plus élevées et la végétation plus importantes. Ces deux effets combinés font que l'on peut à juste titre considérer l'Atlas comme le château d'eau de la plaine du Haouz. Le transfert d'eau entre ces deux compartiments se fait par le captage des seguias à la sortie des oueds de montagne, la retenue d'eau dans de grands barrages, ainsi que par l'infiltration des oueds vers la nappe phréatique.

Cette partie a pour but de qualifier et de quantifier le principal apport d'eau de la nappe Plio-quadernaire de la plaine du Haouz. Cinq oueds du Haut Atlas assurent quasiment la totalité de la recharge de cette nappe. Ces oueds, associées à leurs bassins versants respectifs, sont d'Ouest en Est (Fig. 2) : l'oued N'Fis ayant comme exutoire Iguir N'Kouris, l'oued Rhéraya ayant comme exutoire Tahanout, l'oued Ourika ayant comme exutoire Aghbalou, l'oued Zat ayant comme exutoire Taferiat et l'oued R'Dat ayant comme exutoire

Sidi Rahal. Nous aborderons la présentation des caractéristiques physiographiques des cinq bassins versants étudiés afin de mieux comprendre les processus hydrologiques, le traitement et l'analyse des données hydro pluviométriques, à différents pas de temps afin de confirmer(Figure 5et6).

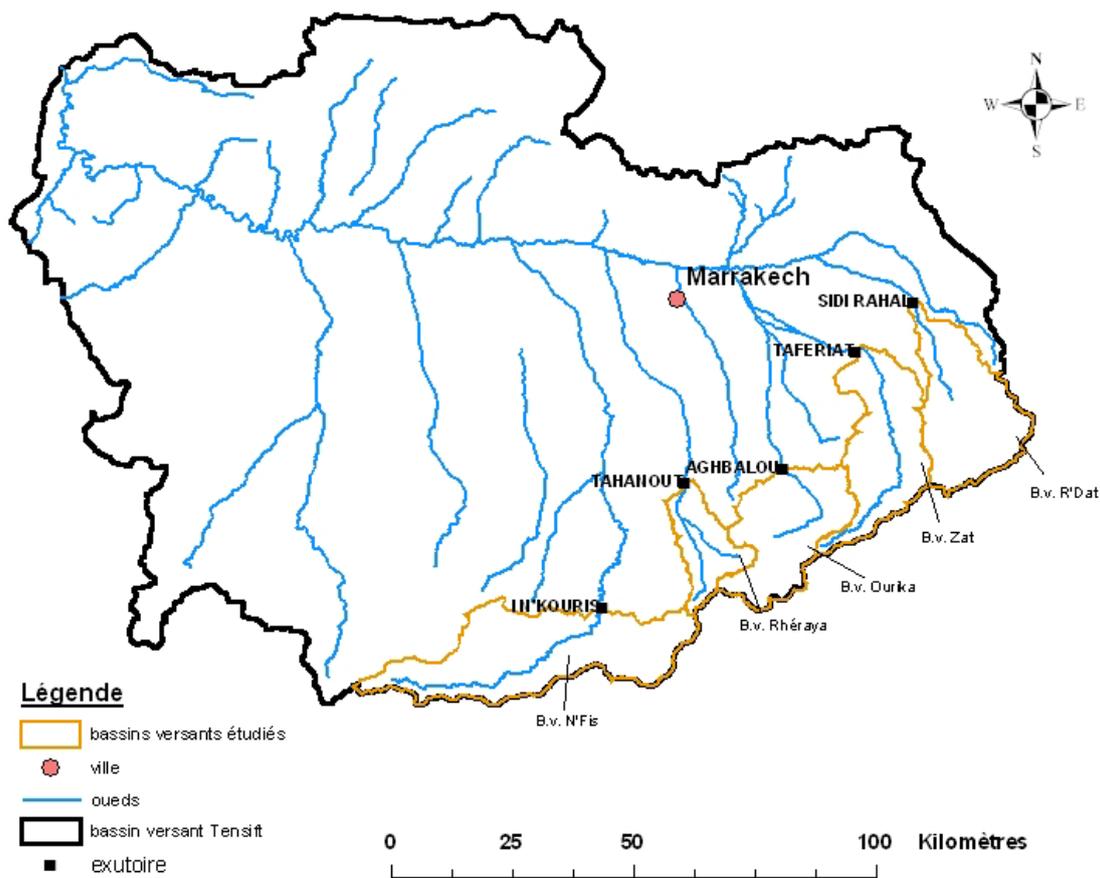


Figure5 : Situation géographique des bassins versant étudiés

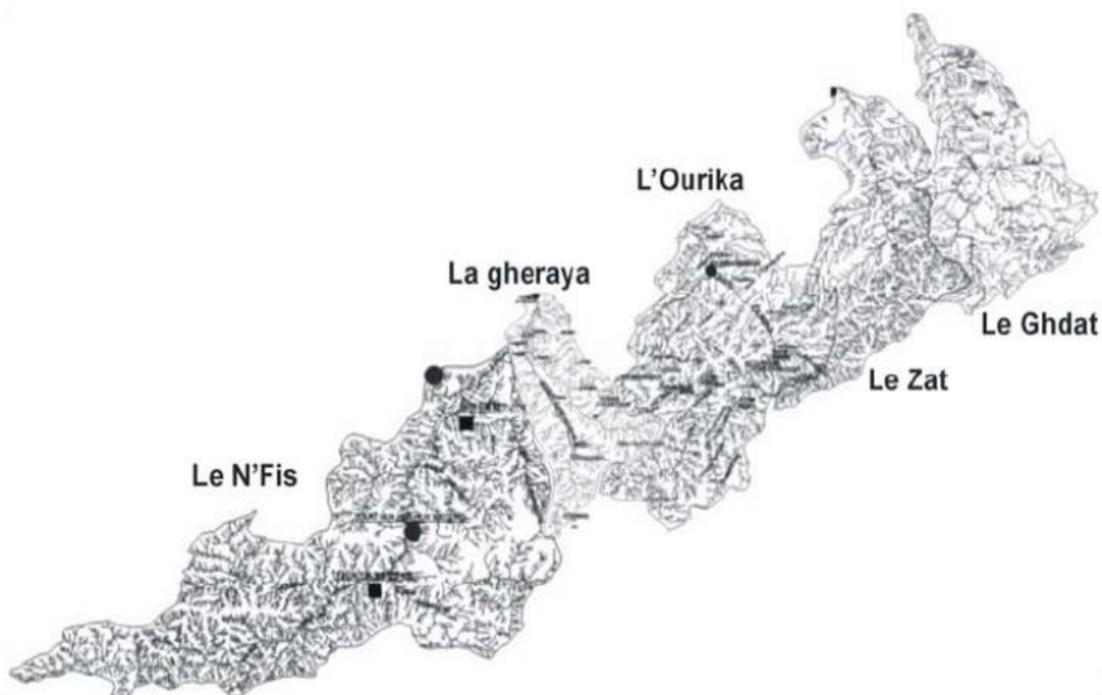


Figure6 : situation des 5 bassins du Haut Atlas

	Périmètre (P) en km	Surface (A) en km ²	Altitude max. en m	Altitude moy. en m	Altitude min. en m	Pente max. (en %)	Pente moy. (en %)	Pente min. (en %)
N'Fis	187,1	823,8	4088	2202,1	1115	62,5	19,3	0,1
Rheraya	81,3	225,3	4098	2165,8	1068	45,9	19,1	0
Ourika	117,1	502,6	3996	2444,5	1018	46,4	19,9	0,14
Zat	134,9	525,9	3847	1831,7	794	45,7	15,5	0
R'Dat	122,2	552	3476	1718,7	722	39,4	13,8	0
	Indice de compacité Kg	Longueur du rectangle équivalent (en km)	Largeur du rectangle équivalent (en km)	longueur totale des cours d'eau (km)	LOG (longueur du cours d'eau principale) (en km)	Dd (densité de drainage) (en km-1)	Ecart type des pentes	Ecart type des altitudes
N'Fis	1,8	83,7	9,8	2887,2	67,9	3,5	7,9	508,4
Rheraya	1,5	34,0	6,6	865,4	45,6	3,8	9,1	705,6
Ourika	1,5	48,1	10,4	1550,6	26,2	3,1	8,7	540,6
Zat	1,6	58,5	9,0	1663,5	61,1	3,2	9,7	666,3
R'Dat	1,5	50,1	11,0	1374,8	27,9	2,5	7,7	664,9

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques physiographiques des cinq bassins versants

	Iguir N'Kouris N'Fis	Tahanout Rheraya	Aghbalou Ourika	Taferiat Zat	Sidi Rahal R'Dat
Surface bassin versant (km ²)	823,8	225,3	502,6	525,9	552
Longueur rectangle équivalent (km)	83,7	34	48,1	58,5	50,1
Altitude de l'exutoire (m)	1131	1068	1018	722	794
Altitude moyenne (m)	2202,1	2165,8	2444,5	1831,7	1718,7
Temps de concentration (heure)	9,18	4,19	5,36	6,73	6,95
	9h10min	4h11min	5h20min	6h44min	7h

Tableau2 : Temps de concentration des différents bassins versants

REF : (https://www.iwra.org/member/congress/resource/abs719_article.pdf)

Chapitre II:

Matériel et Méthode

II- La télédétection

Définition :

Le mot télédétection (en anglais « Remote sensing ») désigne l'ensemble des techniques qui permettent d'étudier à distance des objets ou des phénomènes. Le néologisme de ce terme a fait son apparition aux Etats-Unis dans les années soixante, lorsque des capteurs nouveaux viennent compléter la traditionnelle photographie aérienne. Le terme de télédétection a été introduit officiellement dans la langue française en 1973 et sa définition officielle est la suivante : « Ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. « Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988. »

Par l'acquisition d'images, cette technique permet obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information.

Principe

- La télédétection utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique pour analyser à distance la surface du sol, de l'océan ou l'atmosphère. Une bonne connaissance de la physique élémentaire du rayonnement est indispensable à l'interprétation des résultats de la télédétection.
- La télédétection nécessite 4 composants: une source de lumière (soleil) le rayonnement électromagnétique qui véhicule l'information, une cible (surface de la terre et un capteur).

-Un capteur peut être « passif » mesure l'énergie disponible naturellement (soleil, émission terrestre). Et peut aussi « actif » et possède sa propre source d'illumination (radar, lidar)

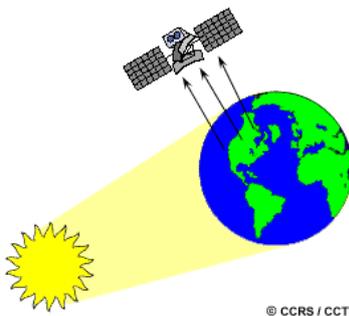


Figure 7: processus de collecte des données des par un capteur passif (CCRS/ CCT) actif (CCRS/ CCT).

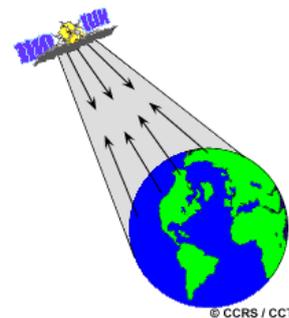


Figure 8: Processus de collecte données par un capteur

b- Processus de la télédétection :

1) **Source d'énergie** : À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie qui éclaire la cible visée en lui fournissant de l'énergie électromagnétique.

2) **Interaction avec l'atmosphère** : le parcours de l'énergie entre la source et la cible, elle entre en contact et interagit avec l'atmosphère qu'elle traverse. Une seconde interaction peut se produire lors du trajet de l'énergie entre la cible et le capteur. (Figure .9).

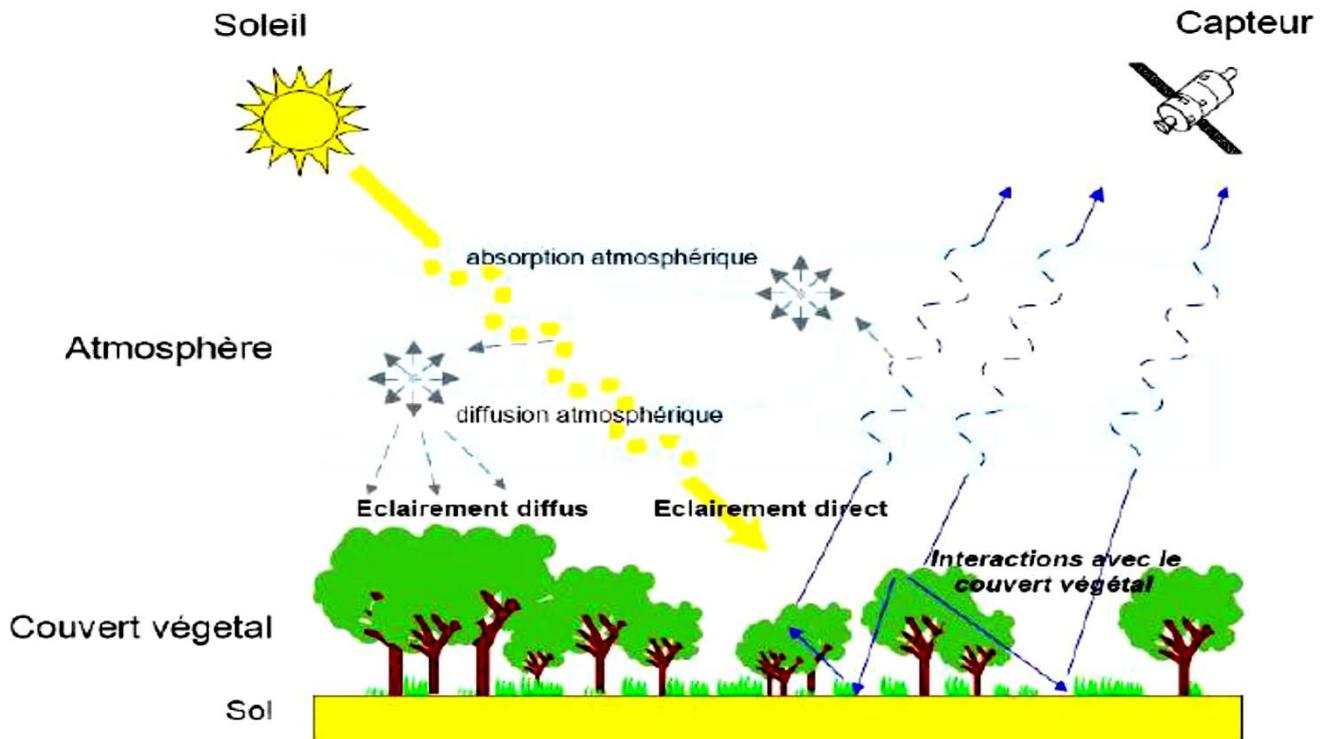


figure 9 : Principe de la télédétection

III. L'interaction avec la cible : Une fois parvenue à la cible, après avoir traversé l'atmosphère, l'énergie interagit avec la cible selon les caractéristiques du rayonnement et les propriétés de la cible.

IV. L'enregistrement de l'énergie par le capteur : L'énergie diffusée ou émise par la cible doit se rendre à un capteur (qui n'est pas en contact avec la cible) qui reçoit et enregistre le rayonnement électromagnétique.

V. La transmission, la réception et le traitement : L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent sous forme électronique, à une station de réception où les données sont transformées en images (numériques ou photographiques).

VI. L'interprétation et l'analyse : L'image traitée est interprétée visuellement, numériquement, ou encore, électroniquement afin d'extraire l'information souhaitée au sujet de la cible.

VII. L'application : La dernière étape du processus de télédétection consiste à utiliser l'information extraite de l'imagerie pour mieux comprendre la cible, en découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

b). Domaines d'application

La télédétection couvre un grand champ d'applications qui satisfait de nombreux besoins, aussi bien pour les utilisateurs institutionnels (ministères, agences gouvernementales, organisations internationales) que pour des acteurs privés (sociétés, agriculteurs, organisations non gouvernementales, etc.). Elle offre des solutions qui sont souvent plus économiques que des moyens plus traditionnels (enquêtes de terrain par exemple) ou qui bénéficient d'une intégrité, d'une objectivité qui en font un arbitre impartial (par exemple, pour la surveillance de l'application de la politique agricole commune européenne). De plus, dans un certain nombre de cas, la télédétection reste la seule méthode pour traiter des problèmes qui ne peuvent être résolus par des moyens classiques (endroits inaccessibles par des moyens terrestres...).

La télédétection est aussi utilisée dans d'autres domaines à savoir :

1. Météorologie et sciences de l'atmosphère.
2. océanographie et études littorales
3. suivi de la végétation à l'échelle planétaire.
- 4-Suivi de l'évolution des villes par la très haute résolution spatiale en milieu urbain.

II. Le spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique d'origine naturelle ou artificielle, existe pour une gamme très étendue de fréquences ou de longueurs d'onde (de 9 à 105m), qui constitue le spectre électromagnétique (figure 18). Une partie très limitée de ce spectre, entre 0,390 μm (390 nm) et 0,7 μm (700 nm) de longueur d'onde, constitue la lumière visible à laquelle est sensible l'œil humain. Une décomposition en fonctions des longueurs d'onde de la lumière visible (lumière blanche) aboutit à distinguer les lumières colorées avec la longueur d'onde correspondante: violet (390 à 450 nm), bleu (450 à 490 nm), vert (490 à 580 nm), jaune (580 à 600 nm), orange (600 à 620 nm) et rouge (620 à 700 nm). Les longueurs d'onde inférieures à 390 nm (ou les fréquences supérieures à celle du violet) ne sont pas perçues par l'œil humain ; il s'agit du rayonnement ultra-violet. De même, les longueurs d'onde supérieures à 700 nm, également non-perçues par l'œil humain, constituent le domaine infrarouge.

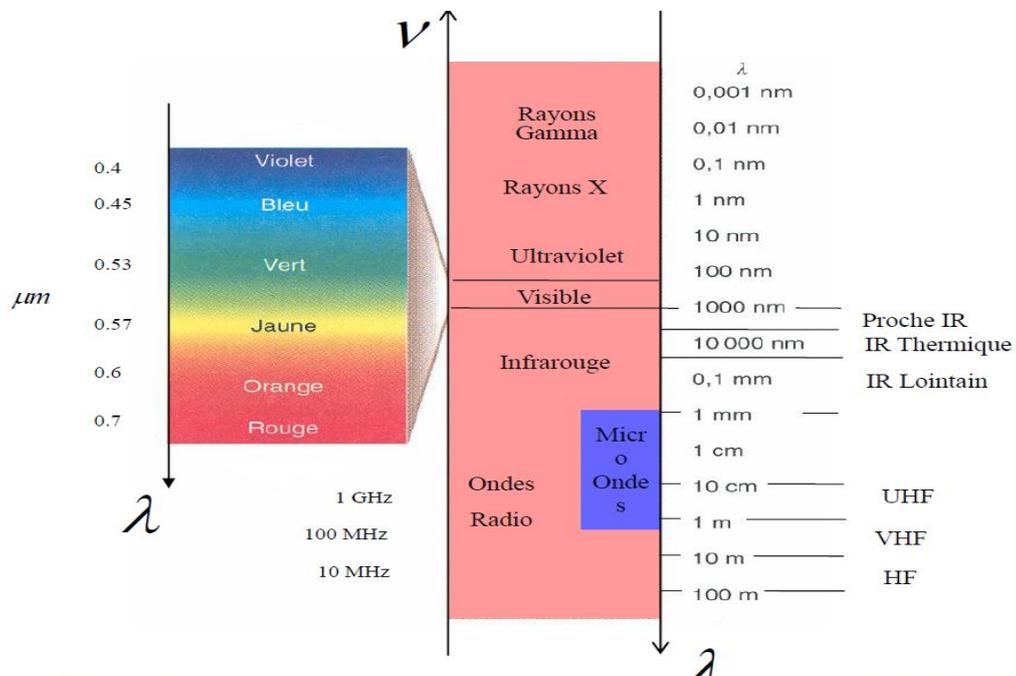


Figure 10 : différents domaines du spectre électromagnétique

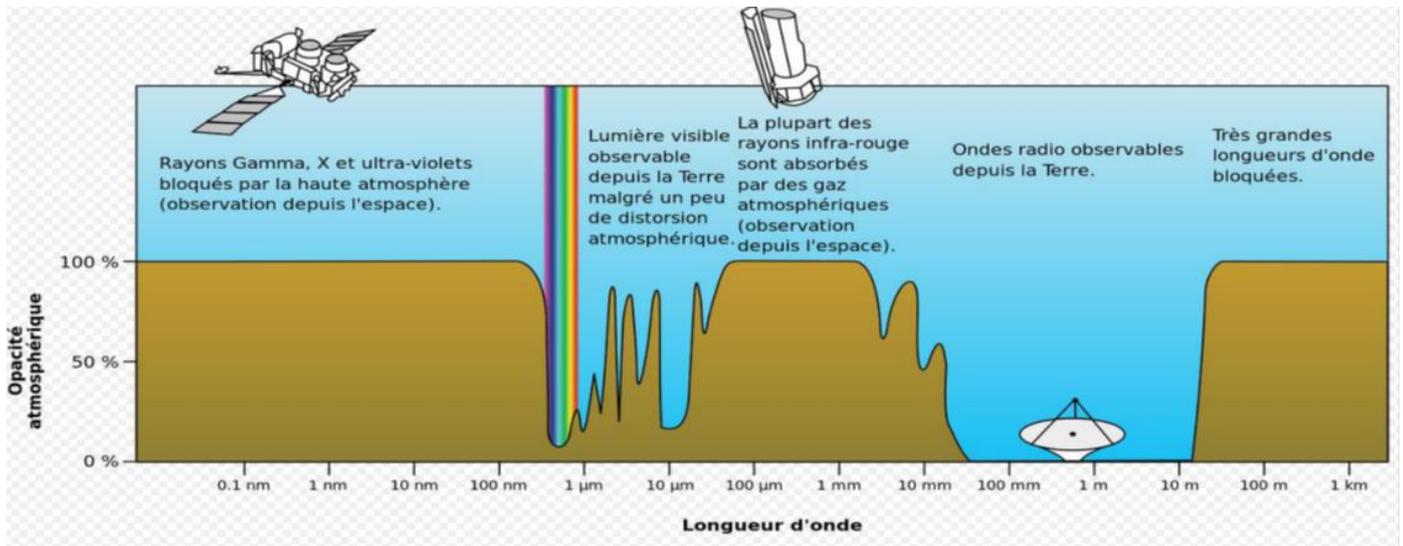


Figure 11 : les longueurs d'onde des différents domaines spectrométriques

Les sources du rayonnement varient également selon le domaine du spectre:

- le rayonnement **ultraviolet**, visible ou infrarouge est émis par les corps, objets ou surfaces en fonction de leur température : rayonnement **solaire** (U.V., visible et proche infrarouge), rayonnement terrestre (infrarouge thermique).
- les rayonnements de très **courte longueur d'onde** (rayons gamma, rayons X) sont produits par les restructurations des noyaux des atomes (radioactivité).
- les rayonnements **visibles, infrarouge ou microonde** peuvent être produits artificiellement par vibration ou rotation des molécules (fluorescence, lasers, four à microondes).
- les rayonnements de **grande longueur d'onde** sont produits par des oscillations électroniques (antennes).

b): Réflectance spectrale

Nous avons considéré la notion de réflectance de façon globale à partir de l'énergie lumineuse totale réfléchiée par l'objet. Elle caractérise l'image formée dans une caméra dite Noir et Blanc qui mesure l'énergie lumineuse globale, c'est à dire sans analyse par rapport à la longueur d'onde. L'étude de la réflectance de nombreux matériaux montre qu'elle dépend de la longueur d'onde. D'où la notion de réflectance spectrale. Il est à noter que la fonction de réflectance spectrale est dépendante des angles d'incidence et d'observation, en particulier au voisinage de la réflexion spéculaire. Elle se traduit pour l'œil humain par la notion de couleur. Il en résulte qu'un objet homogène, en particulier tridimensionnel, ne donne pas une couleur homogène pour l'image. A titre d'exemple, la figure suivante montre les propriétés réflectrices de divers matériaux observés par le satellite SPOT sous forme de courbe de densité spectrale. La bande totale s'étend depuis le violet jusqu'au proche infrarouge. On constate que des matériaux différents par leur réponse spectrale peuvent être voisins par leur apparence (neige et calcaire par exemple).

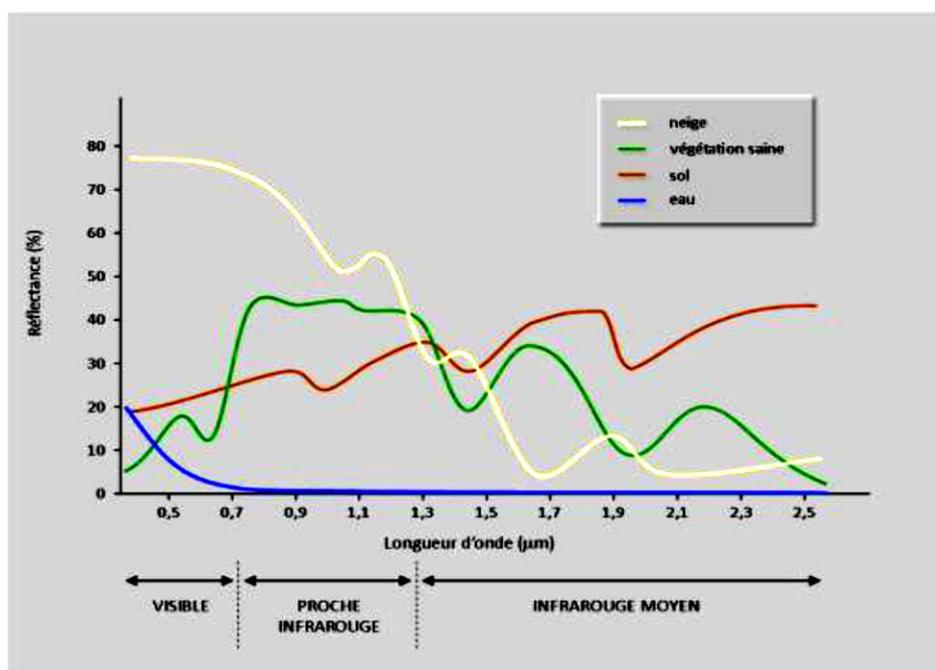


Figure 12: Exemples de Spectres typiques de réflectance de la neige, de l'eau, du sable et de la végétation.

(Source : ENVICAL – Suivi de l'environnement par télédétection)

Réf (<http://www.lagis.univ-lille1.fr/~bonnet/image/couleur.pdf>)

Lecture de la figure : - la neige est très élevée dans le visible et le proche infrarouge (> 90 %). Elle diminue à partir de 1 µm pour atteindre des valeurs très faibles dans le moyen infrarouge à 1,55 µm ;

- l'eau absorbe la majorité du rayonnement reçu quelle que soit la longueur d'onde (réflectance < ~10 %). La réflectance diminue progressivement avec la longueur d'onde pour atteindre des valeurs quasi-nulles dans le proche infrarouge après 0,9 µm ;

- la réflectance du sable, et plus généralement celle des sols nus, est faible aux courtes longueurs d'ondes, puis augmente quasi-linéairement (valeurs inférieures à 5 % dans le bleu et autour de 20 % dans le proche infrarouge) ;

- le comportement de la végétation « verte » est typique, avec une forte absorption dans le visible, et en particulier dans le rouge et le bleu, pour la photosynthèse, et une très forte réflectance dans le proche infrarouge (jusqu'à 50%).

IV. Les capteurs et leur fonctionnement

Définition : Un capteur est un dispositif qui enregistre le rayonnement réfléchi et émis par la terre et transforme l'état de la grandeur physique (rayonnement) observée en grandeur utilisable. Plusieurs types de capteurs peuvent être embarqués à bord d'un satellite, qui varie selon la mission du satellite, par exemple :

- Des capteurs thermiques, qui mesurent le rayonnement émis par des corps à température donnée
- Des capteurs photosensibles, qui transforment la lumière reçue en électricité
- Des capteurs piézoélectriques
- Des radiomètres, qui transforment la quantité de lumière reçue en signal électrique

Pour comprendre comment fonctionne un capteur, nous prendrons l'exemple d'un radiomètre. Pour que le satellite puisse acquérir les images, il est équipé de radiomètres, des capteurs qui mesurent la quantité de lumière émise et réfléchi par la surface de la terre. Le radiomètre est un capteur qui est sensible à une ou plusieurs longueurs d'ondes. Chaque objet terrestre émet des ondes électromagnétiques différentes selon ces propriétés physico-chimiques. Une longueur d'onde s'exprime toujours en nm (nanomètre). Le radiomètre mesure, pour une longueur d'onde donnée, chaque "point" de la surface de la terre. Un "point" peut représenter une superficie de quelques décimètres carrés à plusieurs centaines de mètres carrés c'est le pixel. Cela dépend de la résolution spatiale des radiomètres embarqués à bord du satellite. Le capteur balaye "pixel par pixel" la surface de la planète et attribue à chacun d'eux, selon la quantité de lumière reçue, traduite par codage informatique selon le nombre de bit ; un codage à base de 8bit par exemple les pixels auront des valeurs comprise entre 0 et 255. Entre la phase de réception du rayonnement et la phase de stockage, on distingue quatre systèmes (figure ci-dessus).

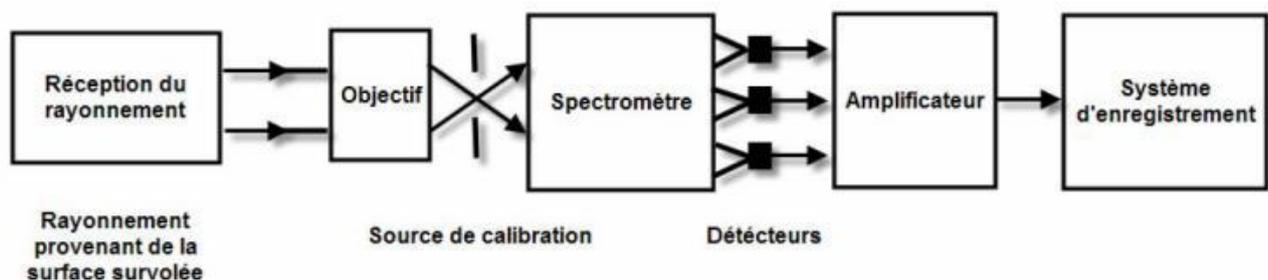


Figure13 : Schéma général d'un capteur (Girard, 1999).

- un système de réception comportant un télescope servant d'objectif
- une source de calibration et un spectromètre comprenant différents détecteurs
- un amplificateur pour accroître le signal

- un système d'enregistrement qui transforme le signal reçu en signal numérique.



Figure14 : Quatre photographies aériennes d'un même paysage utilisant les 4 émulsions classiques en photographie aérienne (Source : Lillesand et Kiefer, 1994).

V- Matériel de travail et apport de la télédétection

Pour résoudre la problématique posée et atteindre les objectifs fixés au début, les étapes initiales sont consacrés au choix des images satellitaires adéquates et effectué les téléchargements selon la disponibilité et les dates précis aux objectifs du travail. Une fois les images téléchargées, on fait des prétraitements sous formes de correction nécessaires afin d'optimiser leur utilité. La dernière étape consiste à extraire un maximum d'information notamment les surfaces d'eau, de végétation et du sol selon les différentes dates choisies.

a) Généralité sur le mode de prise d'images, Résolution spatiale, espacement des pixels et échelle des images satellites

Pour certains instruments de télédétection, la distance entre la cible observée et la plate-forme joue un rôle important puisqu'elle détermine la grandeur de la région observée et le détail qu'il sera possible d'obtenir. Un capteur placé sur une plate-forme éloignée de la cible pourra observer une plus grande région, mais ne sera pas en mesure de fournir beaucoup de détails. Par exemple, pensez à ce que voit un astronaute à bord de la navette spatiale lorsqu'il regarde la Terre par rapport à ce que vous pouvez observer à bord d'un avion. L'astronaute pourra voir une province entière d'un seul coup d'œil mais ne pourra pas distinguer les maisons. Lors d'un vol en avion au-dessus d'une ville, il est possible de voir des édifices et des automobiles, mais la région observée est beaucoup plus petite que celle vue par

l'astronaute. Il y a une différence semblable, quoique moins marquée, entre les images satellitaires et les photographies aériennes.

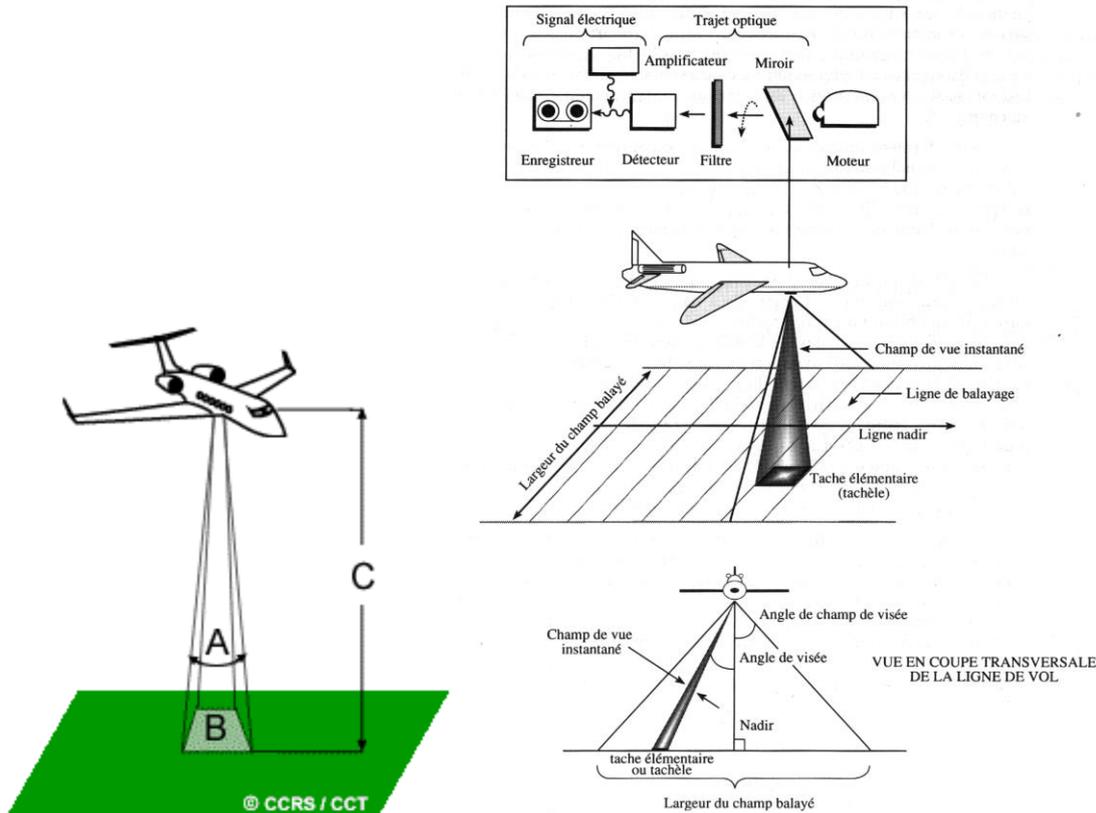


Figure 15 : mode de prise d'image

Le détail qu'il est possible de discerner sur une image dépend de la résolution spatiale du capteur utilisé. La résolution spatiale est fonction de la dimension du plus petit élément qu'il est possible de détecter. La résolution spatiale d'un capteur passif (nous regarderons plus loin le cas spécial des capteurs actifs) dépend principalement de son **champ de vision instantané (CVI)**. Le CVI est défini comme étant le cône visible du capteur (A) et détermine l'aire de la surface "visible" à une altitude donnée et à un moment précis (B). La grandeur de cette aire est obtenue en multipliant le CVI par la distance de la surface au capteur (C). Cette aire est appelée la **superficie de résolution** ou **cellule de résolution** et constitue une étape critique pour la détermination de la résolution spatiale maximale du capteur. Pour pouvoir différencier un élément de la surface observée, l'élément en question doit être de dimension égale ou supérieure à la cellule de résolution. Si l'élément est plus petit, il ne sera généralement pas différencié puisque c'est l'énergie moyenne des éléments de la cellule de résolution qui sera captée. Cependant, dans certaines conditions, un élément plus petit peut être détecté si sa réflectivité domine celle des autres éléments présents dans la cellule de résolution. On parle alors de détection plus fine que la résolution.

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 1, les images de télédétection sont composées d'une matrice d'éléments appelés **pixels**. Le pixel est le plus petit élément d'une image. Il est normalement carré et représente une partie de l'image. Il est cependant important de faire la distinction entre l'espacement des pixels et la résolution spatiale. Si un capteur a une résolution spatiale de 20 mètres et qu'il est possible de charger à l'écran une image provenant de ce capteur avec la pleine résolution, chaque pixel à l'écran représentera une superficie

correspondant à 20 m sur 20 m au sol. Dans ce cas, la résolution et l'espacement des pixels sont identiques. Par contre, il est possible d'afficher la même image avec un espacement des pixels qui soit différent de la résolution. Sur de nombreuses affiches montrant des images de la Terre prises à partir d'un satellite, on combine plusieurs pixels en les moyennant, mais ceci ne modifie en rien la résolution spatiale du capteur utilisé.



Fig16 : résolution d'une image satellite lors d'un agrandissement

Les images sur lesquelles seuls les grands éléments sont visibles ont une **résolution "grossière" ou "basse"**. Les images à **résolution fine ou élevée** permettent l'identification d'éléments de plus petites dimensions. Les capteurs utilisés par les militaires par exemple, sont conçus pour obtenir le plus de détails possible. Ils ont donc une résolution très fine. Les satellites commerciaux ont une résolution qui varie de quelques mètres à plusieurs kilomètres. De façon générale, plus la résolution augmente, plus la superficie de la surface visible par le capteur diminue.

Le rapport entre la distance que l'on mesure sur une image ou une carte, et la distance correspondante au sol est appelée échelle. Une carte ayant une échelle de 1:100 000 représente un objet au sol de 100 000 cm (1 km) par un objet de 1 cm. Les cartes pour lesquelles le rapport est petit (1:100 000) sont des cartes à petite échelle, tandis que les cartes pour lesquelles ce rapport est plus grand (1:5 000) sont des cartes à grande échelle.

Réf : (<https://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/9408>)

b) capteur utilisé dans ce travail

Dans cette étude nous utiliserons les satellites Landsat 4-5 TM, Landsat 7 ETM+, le capteur Thematic Mapper(TM) et Olie 8: Les images disposent de sept bandes à une résolution spatiale de 30 m à l'exception de la bande thermique qui a une résolution spatiale de 120 m le codage informatique et à base 8 bit. Le tableau 2 résume les caractéristiques des bandes spectrales de Landsat TM utilisées dans ce travail :

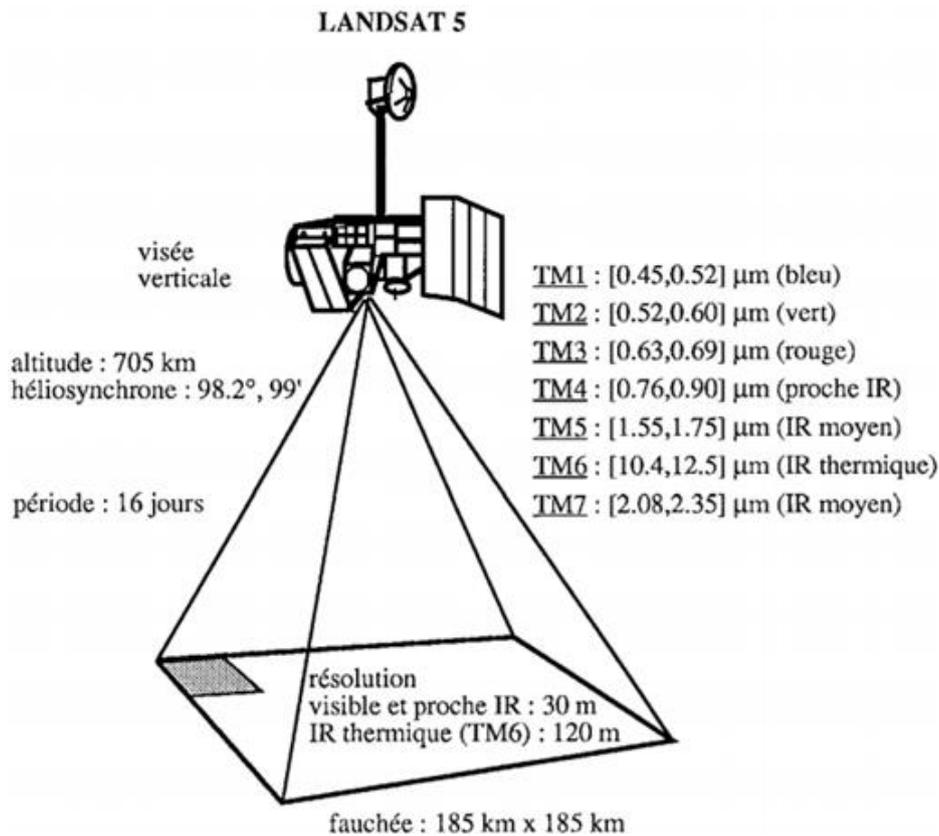


Figure17 : les bandes spectrales du landsat 5

Bandes	Longueur d'onde (μm)	Caractéristiques
TM1	0.45 – 0.52	Bleu-Vert. Maximum de pénétration dans l'eau, très utile en cartographie bathymétrique dans l'eau peu profonde et aussi pour distinguer le sol et la végétation. le bleu (0.4-0.5 μm) est très diffusé par l'atmosphère, l'image présente un aspect brumeux. Il pénètre mieux sous l'eau. Cependant, il peut être utilisé pour la discrimination du sol / végétation et l'identification de zones de bâti, comme l'aéroport dans le secteur supérieur de l'image
TM2	0.52 – 0.60	Vert. Coïncide avec le maximum de réflexion de la végétation dans le domaine visible. Pénètre dans l'eau claire assez bien et donne un excellent contraste entre l'eau claire et trouble (boueuse), et identifie le bâti. La diffusion atmosphérique du rayonnement vert est beaucoup moins forte que celle du bleu. Les images sont plus nettes.
TM3	0.63 – 0.69	Rouge. Coïncide avec la bande d'absorption de la végétation, importante dans la discrimination des types de végétation. Il s'agit du rayonnement le plus absorbé par la végétation vivante et le plus fortement réfléchi par les surfaces du sol comme le sable ou les secteurs bâtis. Les contrastes entre secteurs boisés et déboisés sont très forts en printemps, mais peu de nuances sont visibles à l'intérieur des unités de végétation.
TM4	0.76 – 0.90	PIR est fortement réfléchi par la végétation verte vivante et totalement absorbé par l'eau. Le contraste entre la végétation et l'eau est maximum dans cette bande. Les surfaces du sol absorbent plus le PIR que le visible et apparaissent donc plus sombres. La réflexion varie selon les espèces végétales.
TM5	1.55 – 1.75	MIR1. Forte sensibilité aux radicaux OH- et intéressante pour l'interprétation structurale. Fourni le bon contraste entre les différents types de végétation. Il est aussi utile de mesurer le contenu d'humidité de sol et la végétation. Il aide à discriminer les minéraux d'altérations qui accompagnent les métaux précieux.
TM6	10.4 – 12.50	IR thermique. Les images prises durant la nuit sont utiles en cartographie thermique et pour l'estimation de l'humidité du sol. les objets ici sont discriminés par leur température propre (émission). Il est utilisé pour observer la température et ses effets, comme les variations quotidiennes et saisonnières. Il est aussi utiliser pour identifier la densité de végétation, l'humidité et le type de couverture.
TM7	2.08 – 2.35	MIR2. Discrimination des formations géologiques, et détermination des zones ayant subit une altération hydrothermal. (M. Herbei et al.)

Tableau3: Les bandes spectrales de Landsat TM et leurs caractéristiques.

Le capteur Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +) embarqué sur le satellite Landsat 7 a acquis des images de la Terre presque sans interruption depuis juillet 1999, avec un cycle de répétition de 16 jours. Les images Landsat 7 sont référencées au Worldwide Reference System-2.

Toutes les scènes Landsat 7 collectées depuis le 30 mai 2003 présentent des lacunes de données dues à l'échec de la fonction Scan Line Corrector (SLC). Les scènes Landsat 7 acquises après cette date sont classées en tant que SLC-off. Cette page décrit les détails des données SLC-off, et fournit des méthodes établies pour remplir les scènes:

(<https://landsat.usgs.gov/using-landsat-7-data>.)

Les images Landsat 7 ETM + sont constituées de huit bandes spectrales avec une résolution spatiale de 30 mètres pour les bandes 1 à 7. La bande panchromatique 8 a une résolution de 15 mètres. Toutes les bandes peuvent collecter l'un des deux réglages de gain (haut ou bas) pour augmenter la sensibilité radiométrique et la plage dynamique, tandis que la bande 6 recueille le gain haut et bas pour toutes les scènes. La taille approximative de la scène est de 170 km nord-sud par 183 km est-ouest (106 mi par 114 mi).

<i>Date des Images</i>	1987	1995	2002	2010
<i>Caractéristique</i>				
<i>Landsat Scène Identifier</i>	LT52010381987239XXX03	LT52010381995197MPS00	LT52010382002168MTI00	LT52010382010174MPS00
<i>Capteur</i>	Landsat 4-5 TM	Landsat 4-5 TM	Landsat 4-5 TM	Landsat 4-5 TM
<i>Date d'acquisition</i>	1987-08-27	1995-07-16	2002-06-17	2010-06-23
<i>Jour/Nuit</i>	jour	jour	Jour	jour
<i>Scence center time</i>	10:24:20.8870	10:02:44.6610	10:34:05.7170	10:48:33.7420750
<i>Qualité d'acquisition</i>	9	9	9	9
<i>Qualité des bandes</i>	9	9	9	9
<i>Couverture nuageuse</i>	0%	0%	0%	0%
<i>Sun Elevation</i>	54.43227109	55.36131844	63.82399698	66.62275576
<i>Sun Azimut</i>	120.52812789	98.09994297	101.61890585	104.67467963
<i>Orientation</i>	NORTH_UP	NORTH_UP	NORTH_UP	NORTH_UP
<i>Output Format</i>	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF
<i>Projection des Cartes</i>	UTM	UTM	UTM	UTM
<i>Datum</i>	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84
<i>Ellipsoïde</i>	WGS84	WGS84	WGS84	WGS84
<i>UTM zone</i>	29	29	29	29

Tableau 4 : caractéristique des Landsat (métadonnées)

Réf : (<https://glovis.usgs.gov/app>)

Le capteur OLI (*Operational Land Imager*) de Landsat8 qui a été lancé le 11 février 2013, il acquiert des images dans neuf bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge. Sept de ces bandes spectrales étaient déjà présentes sur la version précédente de l'instrument TM de Landsat, Deux canaux supplémentaires ont été ajoutés, destinés principalement à la correction atmosphérique (canal bleu à 440 nm) et à la détection des nuages (1380 nm). La résolution optique est de 30 mètres sur toutes les bandes sauf sur la bande panchromatique (15 m).

Pour comparer les images du capteur TM et celle du OLI, il faut qu'elles présentent les mêmes caractéristiques spectrales et surtout la résolution et de la performance radiométrique, cette dernière est quantifiée sur une plage dynamique de 12 bits sur le nouveau capteur (Cela se traduit par 4096 niveaux de gris potentiels dans une image par rapport à seulement 256 niveaux de gris de 8 bits instruments précédents), cela permet d'améliorer le signal de bruit pour une meilleure caractérisation de l'état de la couverture terrestre. Les produits d'OLI sont livrés sous forme d'images de 16 bits (55 000 à l'échelle des niveaux de gris).

Le tableau suivant montre l'équivalence entre les bandes des images de la version précédente de Landsat4-5 TM et la nouvelle génération de Landsat8 OLI :

Bandes	Bandes spectrales	Longueurs d'ondes	Résolution	Performance radiométrique
1	<ul style="list-style-type: none"> • Aérosols • Bleu 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,433 - 0,453 μm • 0,45 – 0,52 μm 	30 m	<ul style="list-style-type: none"> • 16 Bits • 8 Bits
2	<ul style="list-style-type: none"> • Bleu • Vert 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,450 - 0,515 μm • 0,52 – 0,60 μm 	30 m	
3	<ul style="list-style-type: none"> • Vert • Rouge 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,525 - 0,600 μm • 0,63 – 0,69 μm 	30 m	
4	<ul style="list-style-type: none"> • Rouge • Infrarouge proche 1 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,630 - 0,680 μm • 0,76 – 0,90 μm 	30 m	
5	<ul style="list-style-type: none"> • Infrarouge proche • Infrarouge proche 2 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,845 - 0,885 μm • 1,55 – 1,75 μm 	30 m	
6	<ul style="list-style-type: none"> • Infrarouge moyen 1 • Infrarouge thermique 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,560 - 1,660 μm • 10,4 – 12,50 μm 	30 m	
7	<ul style="list-style-type: none"> • Infrarouge moyen 2 • Infrarouge moyen 	<ul style="list-style-type: none"> • 2,100 - 2,300 μm • 2,08 – 2,35 μm 	30 m	
8	<ul style="list-style-type: none"> • Panchromatique 	<ul style="list-style-type: none"> • 0,500 - 0,680 μm 	15 m	
9	<ul style="list-style-type: none"> • Cirrus 	<ul style="list-style-type: none"> • 1,360 - 1,390 μm 	30 m	

c) Le choix des dates des images :

Les capteurs satellitaires sont exposés habituellement aux effets atmosphériques (nuages, poussière et autres) ce qui rend la vision et l'interprétation de l'image parfois pénible. Nous avons fixé le mois **juin** de chaque année pour mettre l'accent sur **la végétation qui endure toute l'année** et les surfaces d'eau permanentes afin de suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Les images satellitaires sont aussi bien exposées en mois juin vu que **l'atmosphère reste relativement claire**, ce qui permet au capteur de prendre une image propre qui ne nécessite pas trop de correction atmosphérique pour la visualiser.

d) Prétraitement des images satellitaires

Les images de télédétection nécessitent un certain nombre de corrections, réalisées soit directement par les distributeurs (surcoût de l'image), soit par les utilisateurs. Ces corrections sont deux types : radiométriques et géométriques.

Corrections géométriques : il est bien évident que le passage du satellite, et donc la prise de vue ne se font pas dans des coordonnées parfaitement calées sur les systèmes de projection cartographiques standards. Les effets de rotondité de la terre, les mouvements du satellite, les déformations dans les périphéries de l'image (surtout si le capteur est incliné) sont autant de facteurs rendant nécessaires une correction géométrique de l'image afin de la rendre superposable soit à des cartes, soit à d'autres images sous des coordonnées communes. Ces corrections peuvent être réalisées par le distributeur, mais aussi par l'utilisateur directement sous logiciel de traitement d'image par prise de points de calages "points d'amer").

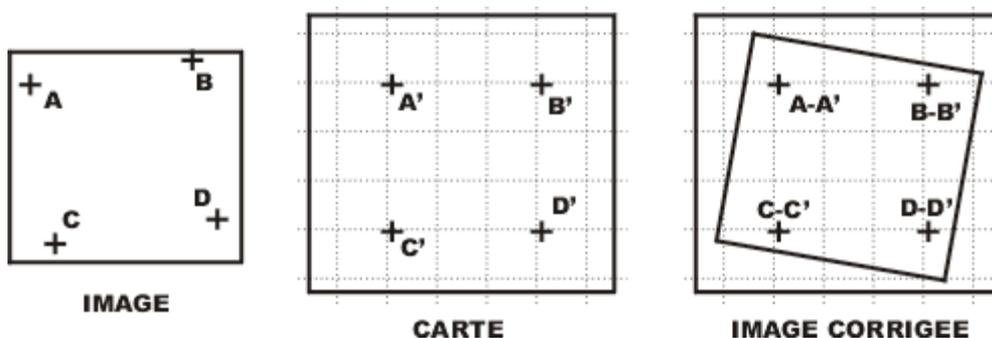


Figure n°18 : Niveaux de correction des images

Lors de l'achat ou de l'acquisition d'images satellites, on distingue différents niveaux de correction :

- 1A : l'image est brute, sans aucune correction (rare)
- 1B : l'image a été corrigée radiométriquement (niveau standard)
- 1AP : Etirement des lignes pour compenser en partie l'effet atmosphérique
- 2A : Corrections radiométriques et géométriques simples pour superposition à carte sans point d'appui

- 2B : Corrections radiométriques et géométriques complexes pour superposition à carte et à autre image avec points d'appui (coût très élevé)
- Ortho - S : Corrections complètes avec compensation du relief

En général, l'utilisateur n'effectue que des corrections géométriques simples (translations, rotations...) et parfois plus complexes à partir de points caractéristiques identifiés sur carte et sur image : les points d'amers (d'appui) ; et applique des transformations polynomiales sur l'image à partir des algorithmes proposés par le logiciel. Attention, ces transformations peuvent engendrer des changements dans les valeurs numériques brutes.

Corrections radiométriques : un certain nombre de "bruits radiométriques" peuvent être présents sur l'image en raison soit de déficiences des capteurs, soit de problèmes de transmission des données, soit enfin d'interprétation (codage/décodage). En général ces corrections radiométriques, c'est-à-dire ces changements de la valeur radiométrique de points aberrants sont réalisées directement à la réception de l'image par réaffectation de codes correspondants aux pixels voisins du ou des points défectueux.

Exemple de déficience d'une ligne nécessitant une correction sur image



Figure19 : image satellite montrant un Exemple de déficience d'une ligne qui nécessitant une correction sur image

Le Processus général de la Correction Radiométrique Relative (PCRR selon B. Lounis, A. Belhadj Aïssa, 2005) donné est décomposé en trois étapes essentielles, à savoir :

La première étape consiste à appliquer aux images le modèle d'inversion afin de les corriger des effets atmosphériques et calculer l'image réflectance pour l'image de référence par la méthode des points noirs [Belhadj, 1998];

La deuxième étape est consacrée à la transformation orthogonale Tassled-Cap "TC" et la détermination des sites invariants;

La dernière étape consiste à déterminer la corrélation à partir des sites invariants, entre l'image de référence et l'image à corriger et effectuer ensuite la correction relative.

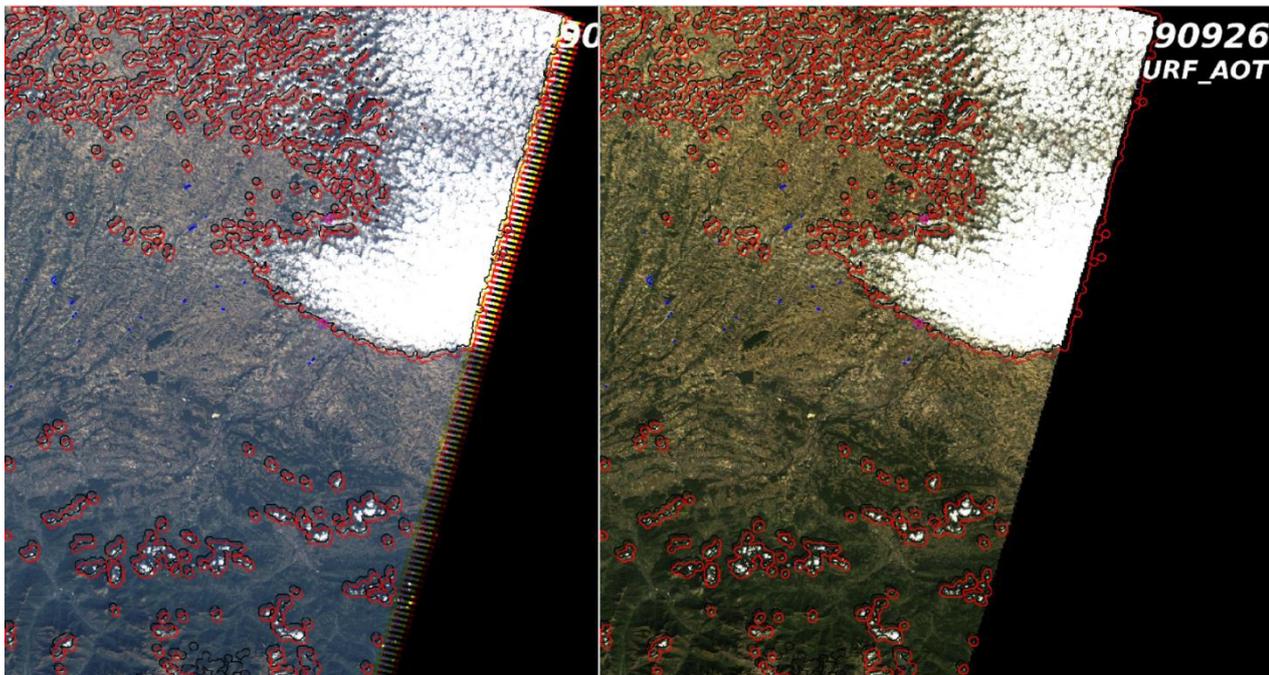


Figure20 : image avant et après correction

Les traitements effectués dans ce travail

classification

La classification est un processus de reconnaissance des formes. Elle consiste à effectuer la correspondance entre les éléments d'une scène de l'image matérialisés par des classes spectrales (classes regroupant des pixels dont les comptes numériques (niveaux de gris) sont semblables) définies à l'aide de paramètres statistiques (moyenne, écart-type...), et des classes connues préalablement par un utilisateur (les classes thématiques).

Cette méthode de classification va permettre de réaliser des cartes d'occupation du sol dans Sur le terrain à partir des données d'échantillonnages (sites d'entraînements) effectuées sur des parcelles dont on connaît leurs constituants à priori et des documents auxiliaires (carte topographique, carte géologique, visite de terrain,...etc.) la classification peut se faire de deux manières :

a) Classification non supervisée (ou non dirigée) :

Cette classification détermine automatiquement les classes. L'utilisateur intervient toutefois en choisissant le nombre de classe. On procède à ce type de classification lorsque l'on n'a aucune connaissance du terrain ni même des comportements spectraux des objets composant l'image.

b) Classification supervisée (ou dirigée) :

Dans la classification supervisée, on identifie des échantillons assez homogènes de l'image qui sont représentatifs de différents types de surfaces (classes d'information). Ces échantillons forment un ensemble de données-tests. La sélection de ces données-tests est basée sur nos connaissances, des types de surfaces présents dans l'image. Les informations numériques pour chacune des bandes et pour chaque pixel de ces ensembles sont utilisées par logiciel pour définir les classes et ensuite reconnaître des régions aux propriétés similaires à chaque classe. Pour procéder à une classification supervisée il faut:

1- **Déterminée des Zone d'entraînement (ROI ou AOI) (*Region of Interest ou Area Of Interest*)** : à l'aide des cartes Google Earth on peut facilement déterminer des zones d'entraînements et vérifier leurs compositions sur les différentes années, la superposition de ces cartes sur les images satellites permet un choix rapide et plus exact des endroits (ROI) dont on connaît leurs occupations du sol, soit par des visites au terrain ou par les documents bibliographiques, et qui seront utilisés par la suite pour entraîner la classification. Il faut éviter au maximum le chevauchement des signatures spectrales des objets choisis pour optimiser la classification.

2 - **La méthode de classification : le Maximum de vraisemblance « Maximum Likelihood»** est la méthode qui est choisie pour ce travail, elle n'admet que la distribution des valeurs numériques pour chaque classe d'entraînement doit suivre une loi normale. Il est donc nécessaire de sélectionner un grand nombre de pixels et une population homogène pour vérifier cette normalité.



Figure 20 : résultats de la méthode Maximum likelihood

f) Les indices spectraux:

Les indices spectraux sont utilisés pour extraire et décrire automatiquement les surfaces de thèmes d'une donnée dans le paysage comme la neige / la glace, les nuages, la végétation et l'eau dans l'imagerie Landsat,

Habituellement, une image Landsat est utilisée pour générer des couches de sortie pour l'indice d'eau de différence normalisée (NDWI), l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et l'indice de neige de différence normalisée (NDSI). Lorsque ces couches de sortie sont empilées dans l'image affichant le résultat «pile d'index» comme une image RVB l'indice de végétation (NDVI) peut être utilisé pour souligner la présence de la végétation. Étant donné que la bande d'évaluation de la qualité Landsat n'inclut pas la production de végétation, NDVI semble être une base logique pour effectuer

l'évaluation. Il est utilisé pour indiquer la densité relative, ou la quantité, de la végétation verte présente dans l'image.

Cet indice utilise le facteur de réflexion d'une bande rouge autour de 0,66 µm et d'une bande proche infrarouge d'environ 0,86 µm. La bande rouge se trouve dans la région d'absorption de la chlorophylle, tandis que la bande proche IR est utilisée dans les plateaux de végétation à haute réflectance.

- **L'indice de l'eau de différence normalisée (NDWI)** est utilisé pour différencier l'eau de la terre sèche ou plutôt la plus appropriée pour la cartographie des masses d'eau. Les corps d'eau ont un faible rayonnement et une forte capacité d'absorption dans la gamme des longueurs d'onde de l'infrarouge visible. Le NDWI utilise des bandes infrarouges et vertes proches d'images de télédétection basées sur l'événement. Il peut stimuler efficacement l'information sur l'eau dans la plupart des cas. Il est subtil dans les terres accumulées et finit souvent dans des plans d'eau surestimés.

L'indice NDWI (humidité des sols) se calcule selon l'équation suivante:

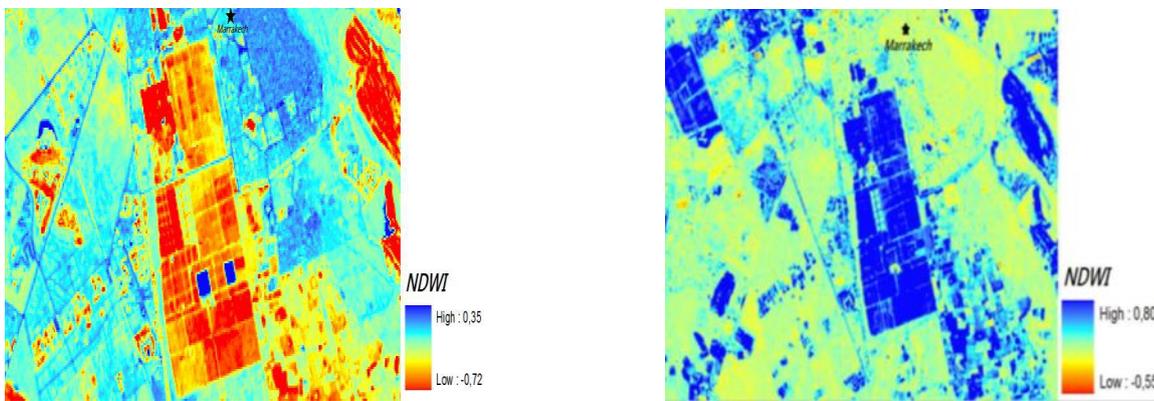
$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

Avec :

- NIR : réflectance dans la bande proche infrarouge.
- SWIR : réflectance dans la bande infrarouge moyenne.

Cet indice permet de vérifier l'efficacité des systèmes d'irrigations car les plantes correctement irriguées ayant une teneur en eau forte vont refléter une valeur de NDWI proche de 1. Le NDWI peut être calculé d'une autre manière de telle façon à mettre l'accent cette fois sur les surfaces d'eau et non pas de l'humidité des plantes et des sols (Figure .21). Cela permet d'estimer l'évolution des superficies des eaux en comparant une série des images satellitaires à différente période du temps Son équation est la suivante :

$$NDWI \text{ surface d'eau} = \frac{(Vert - PIR)}{(Vert + PIR)}$$



$$\frac{(Vert - PIR)}{(Vert + PIR)}$$

(Surface d'eau en bleu)

$$\frac{(PIR - SWIR)}{(PIR + SWIR)}$$

(Humidité des sols et des arbres en bleu)

Figure21 : deux types d'indice de l'eau par différence normalisée (NDWI) dans une même localité

- **Indice d'humidité (NDWI) :** La méthode s'appuie en outre sur des données exogènes, considérées soit pour générer des masques de contrainte (MNT), soit en validation de résultats (Google Earth™, cartographie existante des ZH). Tous les indices topographiques sont obtenus à partir du MNT ASTER GDEM (V.2) de 22 m de résolution spatiale. Les images de haute résolution spatiale traitées par le logiciel Google Earth™ sont la principale source de données exogènes prises en compte dans les étapes de validation (photo-interprétation). Sur le secteur "Woëvre", nous disposons aussi d'une image SPOT à 10 m, qui a été intégrée à la validation. Enfin, la cartographie des zones humides remarquables de l'AERM, plus ou moins précise selon les secteurs, a été également utilisée pour valider les résultats. L'ensemble des traitements d'images, de l'extraction de l'information, des calculs et des représentations cartographiques a été réalisé par les logiciels Erdas Imagine™ et ArcGis™.

La méthodologie comporte des étapes successives conduisant à la détection de trois types de ZH. Elle combine des informations de différents néo-canaux, de seuillages, de classifications non dirigées, dont le cadre a été contraint par l'indice topographique de K. BENVEN et M.J. KIRKBY (1979); En cela la méthode peut être qualifiée d'hybride (S.A. SADER *et al.* 1995).

- **L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) :** L'indice de végétation fournit des informations sur la verdure et l'état de la végétation. La formule de calcul du NDVI est:

$$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$$

Avec :

- PIR : réflectance dans la bande proche infrarouge.
- R : réflectance dans la bande rouge.

La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement. Le NDVI conserve une valeur constante quelque soit l'éclairement global, contrairement à la simple différence entre la bande PIR et Rouge (indice de végétation simple), qui est très sensible aux variations d'éclairement. Cet indice normalisé est sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation.

Les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge où le NDVI présente des valeurs proches de 0.

Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

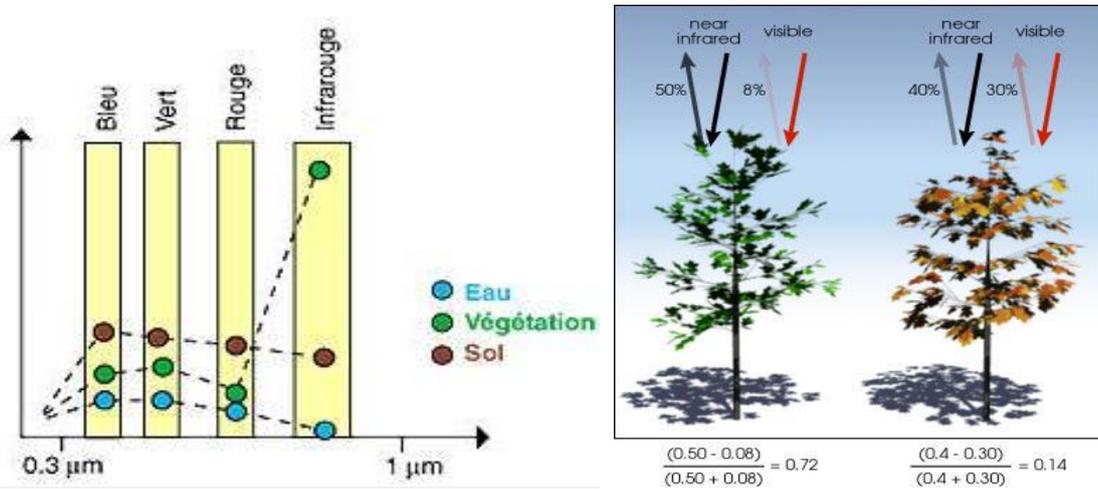


Figure 22 : La réflectance de l'eau, végétation et du sol et Variation du NDVI en fonction de la santé de la végétation

❖ **Remarque** : dans ce travail nous travaillerons avec les données du mois de juin pour cibler la végétation de toute l'année.

• **Indice du sol par différence normalisée NDSI (Takeuchi and Yasuoka, 2004)**

Cet indice permet de cartographier les entités pédologiques, ces valeurs varient selon la signature spectrale de la bande infrarouge et le proche infrarouge moyen. Il est calculé à partir de la formule suivante :

$$NDSI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$$

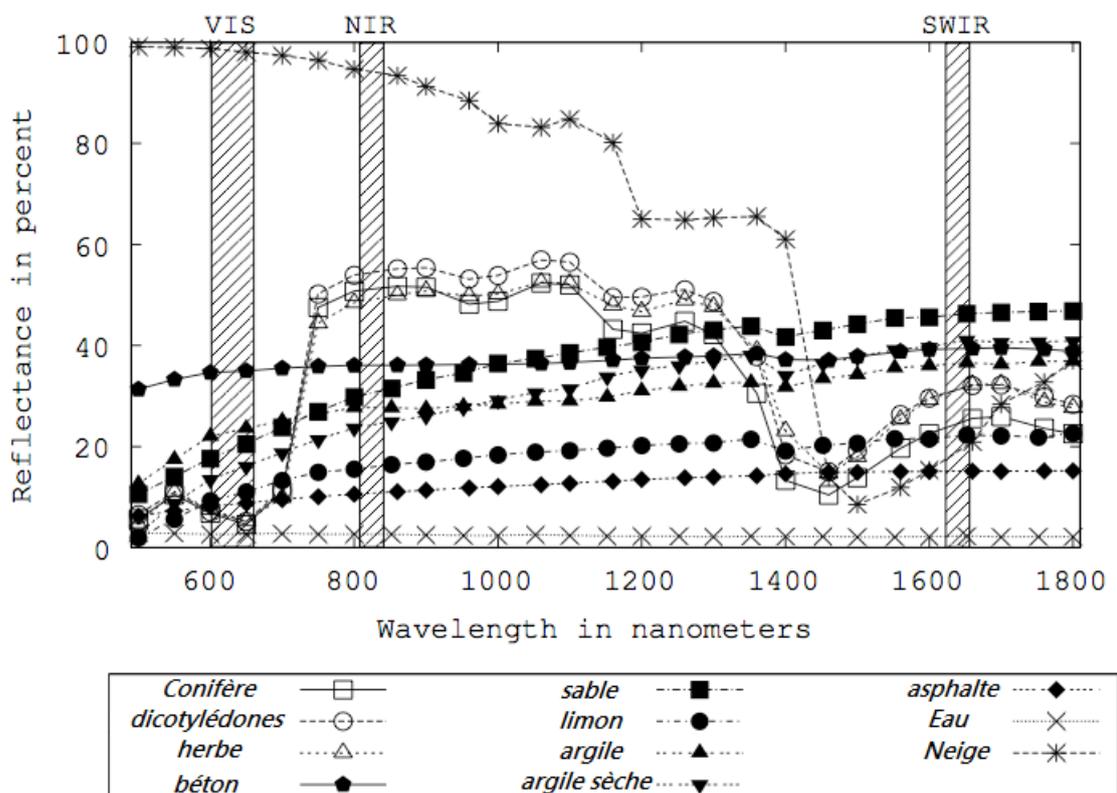


Figure 23: Variété spectrale des éléments de la terre en relation avec les indices normalisés NDVI, NDWI et NDSI (Takeuchi and Yasuoka, 2004)

Lecture de la fig. : la réflectance des éléments constitutifs du sol augmente du visible au domaine de l'infrarouge moyen (42%), alors que les surfaces d'eau et de la neige réfléchissent beaucoup plus dans le visible (98%), au contraire la végétation sa réflectance atteint la valeur maximale dans le proche infrarouge (60%).

L'analyse des indices calculés pour **11** types d'objets de couverture terrestre a permis de mettre en point ce tableau

	<i>Conifère</i>	<i>Dico tylédon</i>	<i>Herbe</i>	<i>Béton</i>	<i>Sable</i>	<i>Limon</i>	<i>Argile</i>	<i>A. sèche</i>	<i>Asphal te</i>	<i>Eau</i>	<i>Neige</i>
<i>NDVI</i>	0.83	0.83	0.81	0.08	0.23	0.22	0.14	0.24	0.15	0.06	0.05
<i>NDSI</i>	-0.47	-0.45	-0.35	-0.11	0.06	0.01	-0.02	0.11	0.02	-0.26	-0.76
<i>NDWI</i>	-0.60	-0.64	-0.65	0.03	-0.29	-0.23	-0.12	-0.34	-0.14	0.20	0.69

Tableau 6 : indice de réflectance des éléments constitutifs du sol

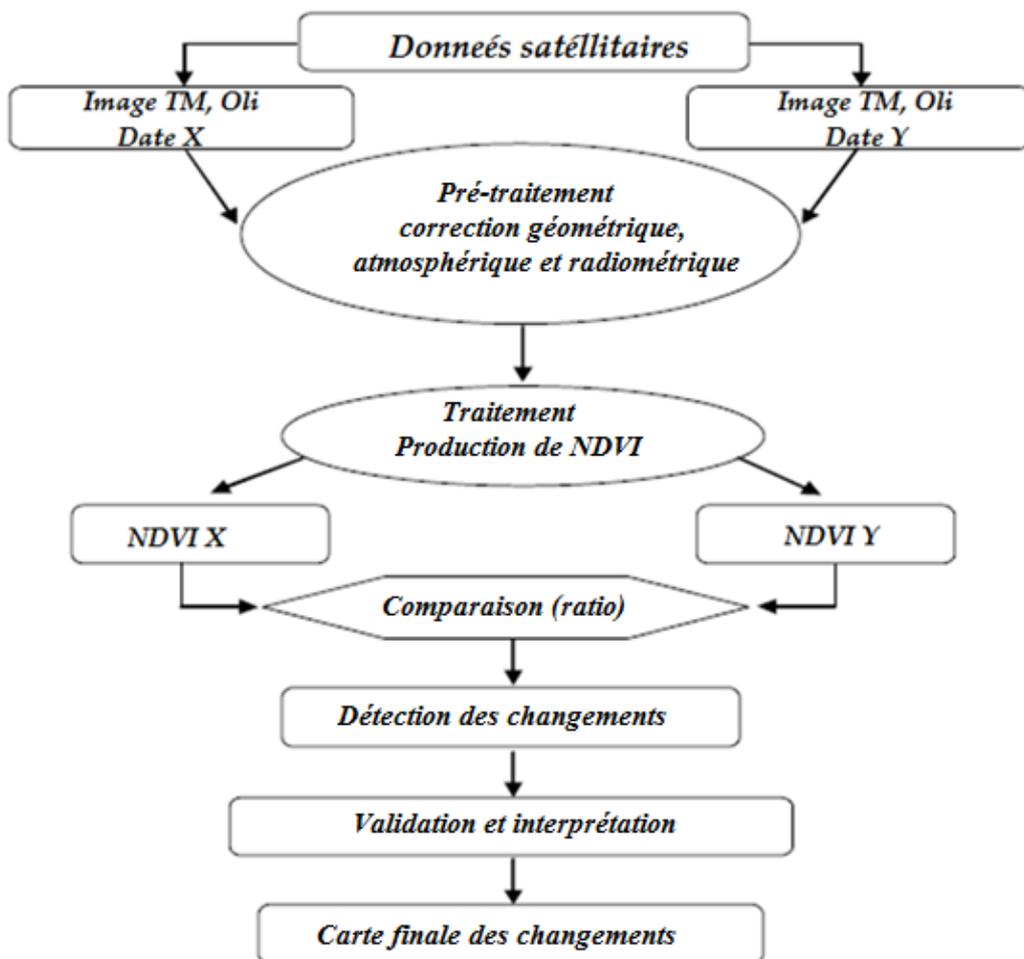
On peut conclure de ce tableau que :

NDVI a des valeurs beaucoup plus élevées positif (0,81 ~ 0,83) dans le groupe de la végétation (CN, DC, HB).

NDSI a de plus grandes valeurs (-0,11 ~ 0,11) dans le groupe des sols (BT, SB, LM, AR, AS, ASP).

NDWI a des valeurs positives (0,10 ~ 0,69) que dans le groupe d'eau (EA, NE).

Les grandes étapes du présent travail se résument dans l'organigramme ci-dessous:



Chapitre III : Résultats et Discussions

Introduction :

Après avoir effectué tous les traitements nécessaires, on passe à l'étape de préparation des indices spectraux, l'initiation à la classification des images et à la détection des changements dans le temps et l'espace. Comme on a vu dans le chapitre précédent Une classification a pour but d'associer les pixels d'une image à des unités de paysage. Certaines méthodes classificatoires nécessitent la participation d'un opérateur, d'autres sont entièrement automatiques. Une classification assistée se pratique en étudiant successivement les histogrammes des valeurs radiométriques. Chaque fois que la distribution présente plusieurs populations espacées (histogramme bi-modal, tri-modal, etc.), l'opérateur délimite des classes caractérisées par des réponses spectrales différentes. Pour chacune des populations associées à ces classes, il étudie pareillement les réponses radiométriques dans les autres bandes et détermine toutes les subdivisions possibles.

Dans ce chapitre, on exprime les résultats obtenus du traitement des images satellites à haute résolution spatiale (Landsat et OLI8)

Nous suivons la variabilité spatio-temporelle de la couverture terrestre dans le Haut Atlas, et à l'aide de la nouvelle technique de la détection du changement on peut estimer le taux des surfaces ayant subi une dégradation du couvert végétal et des surfaces d'eau comme on peut déterminer les endroits qui sont de plus en plus sollicités par les activités agricoles.

1. Variabilité spatio-temporelle de la végétation dans le Haut Atlas:

La végétation saine absorbe une grande partie de la lumière visible dans le rouge par l'intermédiaire des pigments chlorophylliens et réfléchit fortement dans le proche Infrarouge (PIR) à cause de la structure interne des feuilles. Le fort contraste entre la réflectance dans le rouge et le proche infrarouge est ainsi exploité pour construire NDVI. Cet indice peut fournir des informations quantitatives sur les caractéristiques de la végétation : taux de recouvrement, surface foliaire (surface de feuille par surface de sol exprimé en m^2/m^2) et le type de végétation et sa santé. Le NDVI est aussi lié à d'autres paramètres comme le pourcentage du sol occupé, l'activité photosynthétique, la quantité de biomasse et trouve une large gamme d'application pour le suivi de la végétation.

A partir des valeurs trouvées .on a pu suivre la dynamique de la végétation dans le temps et dans l'espace.

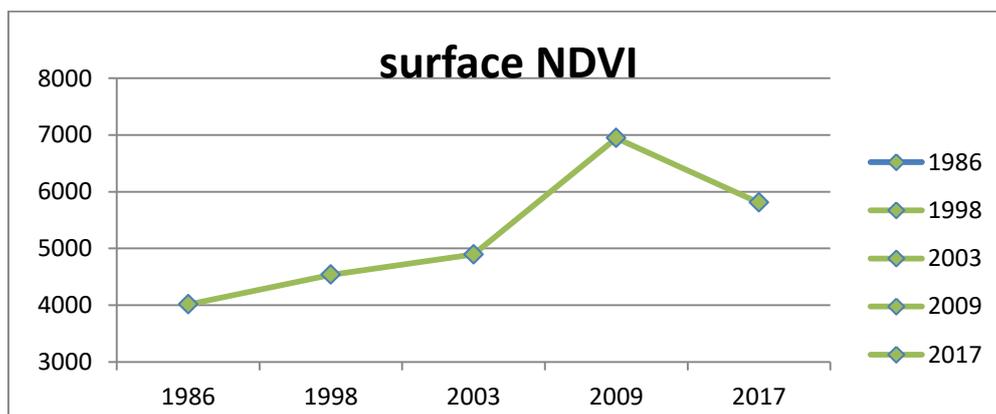


Figure 24: variation de surface NDVI dans les images Landsat

L'analyse des cartes temporelles de NDVI montre une augmentation globale des surfaces de végétation dans le Haut Atlas d'environ 7% dans ces dernières 30 années. La végétation a occupé une superficie de 4014.216 Km² en 1986 puis 4535.802 Km² en 1998, avant qu'elle atteigne sa surface maximale 6945.192 Km² pendant l'année 2009. Le tableau ci-dessous résume la variation de l'indice de la végétation dans le Haut Atlas depuis 19846 jusqu'a2017.

année	Surface NDVI	Surface NDVI en %
1986	4014.216	15.32262
1998	4535.802	17.31356
2003	4894.911	18.68431
2009	6945.192	26.51042
2017	5807.853	22.16909

Tableau 7 : Variation de la superficie de la végétation dans le Haut Atlas (1986-2017)

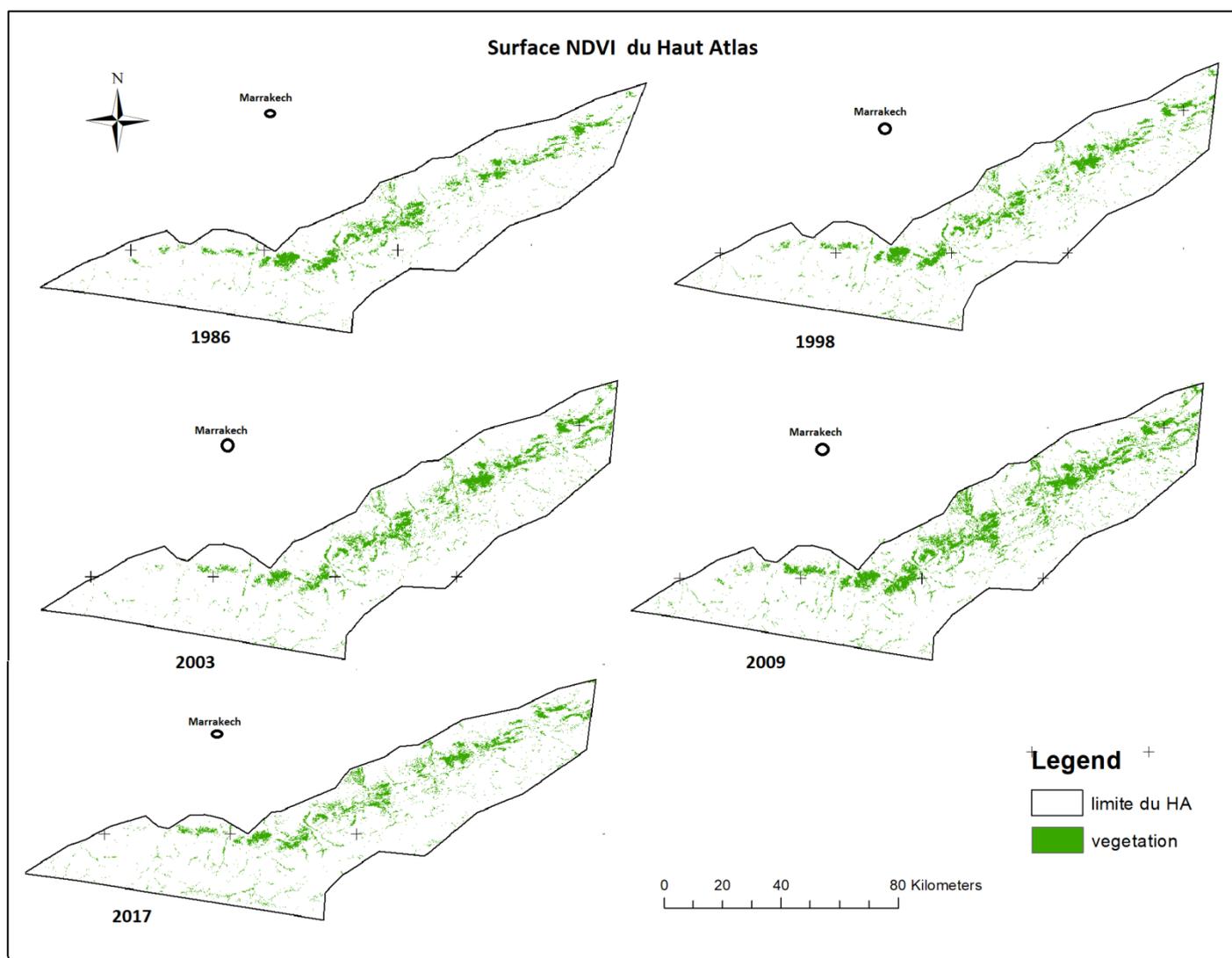


Figure 25 : évolution de surface de végétation sur le versant Nord du Haut Atlas (1986-2017)

Interprétation :

L'évolution de la couverture végétale peut être expliquée par plusieurs facteurs, l'amélioration des ressources d'eau, changements climatiques, Les hauteurs mensuelles de pluie. La surface d'eau maximale a été enregistrée pendant l'année 2009, cela s'explique par le taux de précipitation important qu'ait connu l'amont dans cette année.

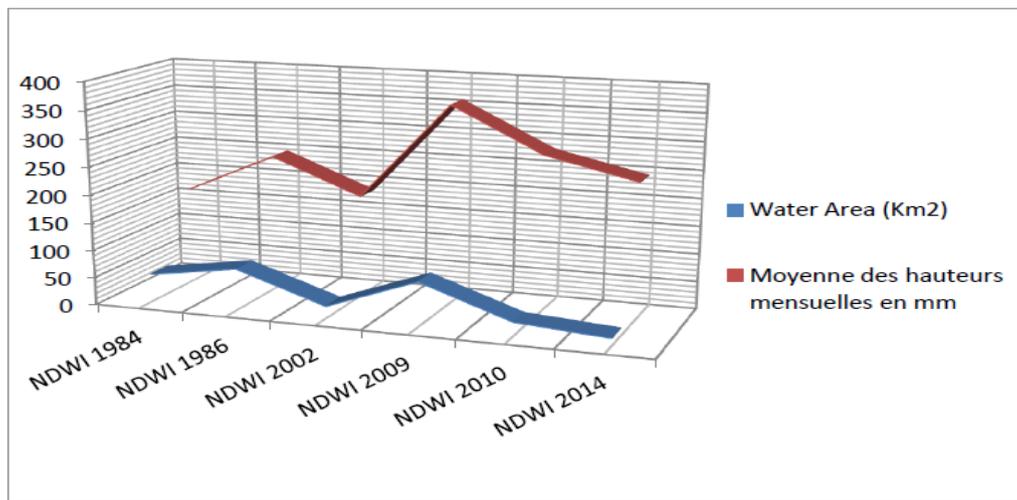


Figure 26 : Corrélation entre l'indice de l'eau et les moyennes des hauteurs mensuelles de pluie(1984-2014)

2. Variabilité spatio-temporelle des surfaces d'eau dans le Haut Atlas

La signature spectrale des surfaces d'eau varie légèrement dans le temps, elle dépend de plusieurs facteurs: la distance Terre-soleil, la superficie, la composition chimique, la date de prise de l'image, le type de capteur et les effets atmosphériques. L'indice de l'eau par différence normalisé NDWI calculé à partir des images Landsat (Résolution spatiale 30 m) calibrées et corrigées des effets atmosphériques prend ses valeurs entre 1 et -1, La valeur moyenne de l'eau dans la plaine est de l'ordre de 0,25 déterminée à travers les sites d'entraînements définie au préalable.(EL Halim,2015)

De cette valeur on a pu cartographier les surfaces d'eau afin de suivre leurs dynamiques dans le temps et dans l'espace.

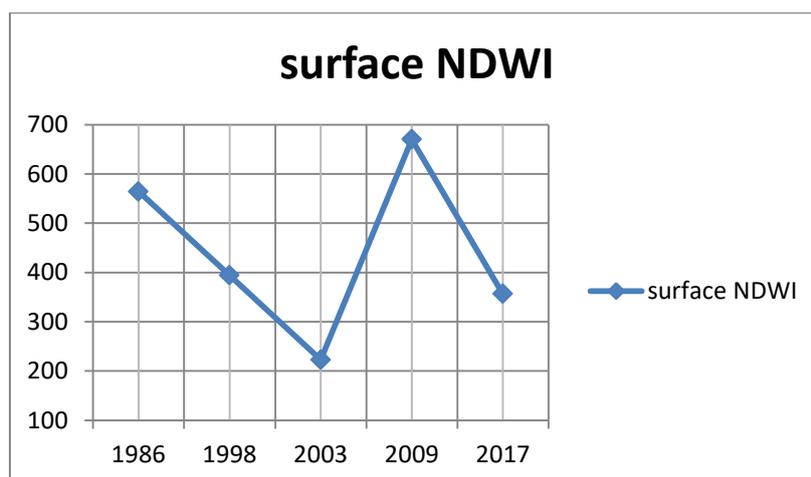


Figure27 : variation de surface NDWI dans les images Landsat

L'analyse des cartes temporelles de NDWI montre une régression globale des surfaces d'eau dans l'amont d'environ 9% dans ces dernières 30 années .L'eau a occupé une superficie de 564.156 Km² en 1986 puis 393.957 Km² en 1998, avant qu'elle atteigne sa surface maximale 670.077 Km² pendant l'année 2009. Le tableau ci-dessous résume la variation de l'indice de l'eau dans la plaine du Haouz depuis 1986 jusqu'à 2017.

Années	Surface NDWI	Surface NDWI en %
1986	564.156	25.55433
1998	393.957	17.8449
2003	222.822	10.09307
2009	670.077	30.35219
2017	356.661	16.15552

Tableau8 : Variation de la superficie de l'eau dans le Haut Atlas (1986-2017)

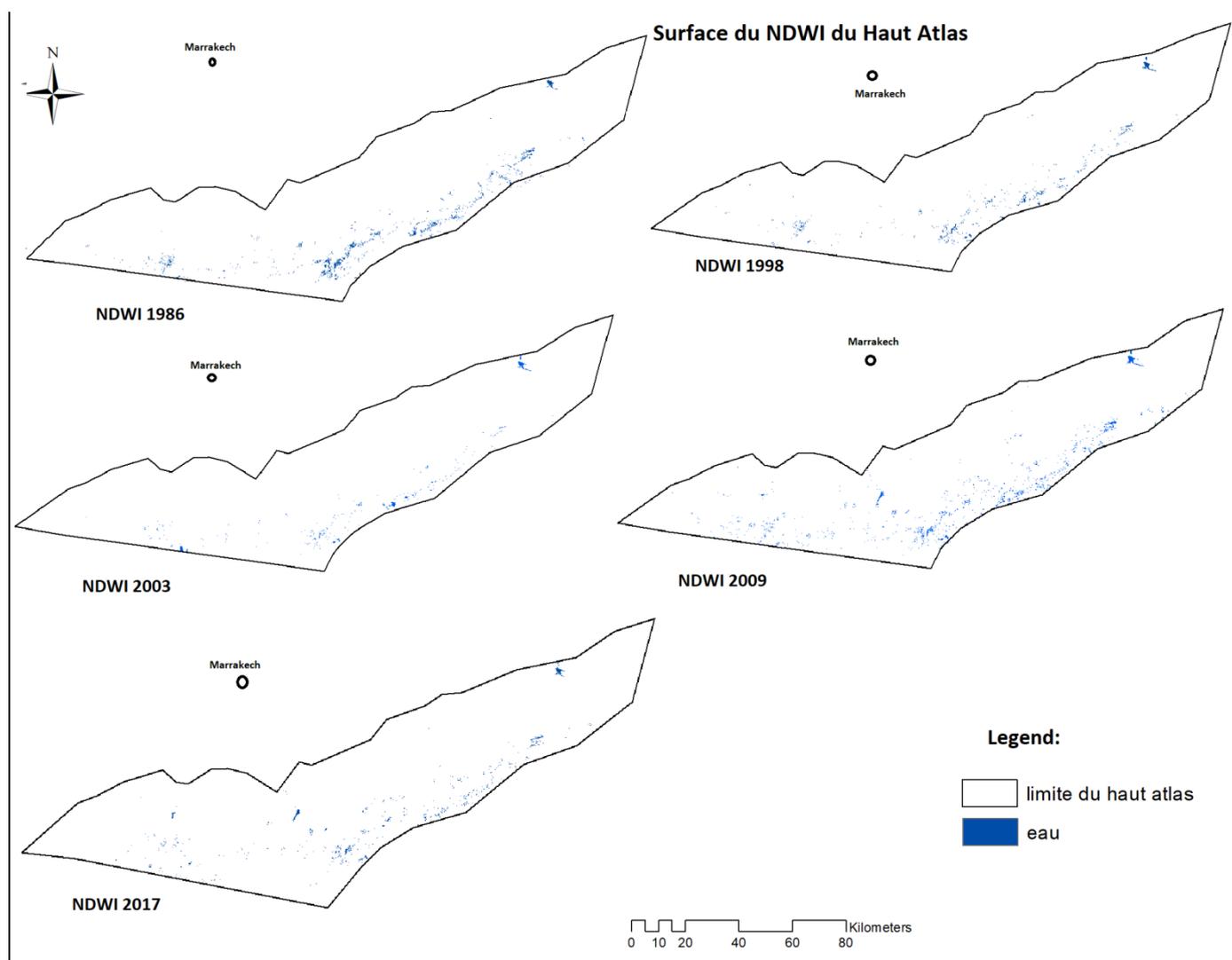


Figure 28 : évolution de surface d'eau du Haut Atlas (1986-2017)

3. Variabilité de l'humidité dans le Haut Atlas

Cette variation de la superficie de l'eau qui change durant ces 30 ans peut être expliquée par l'intervention de plusieurs facteurs notamment, les changements climatiques.

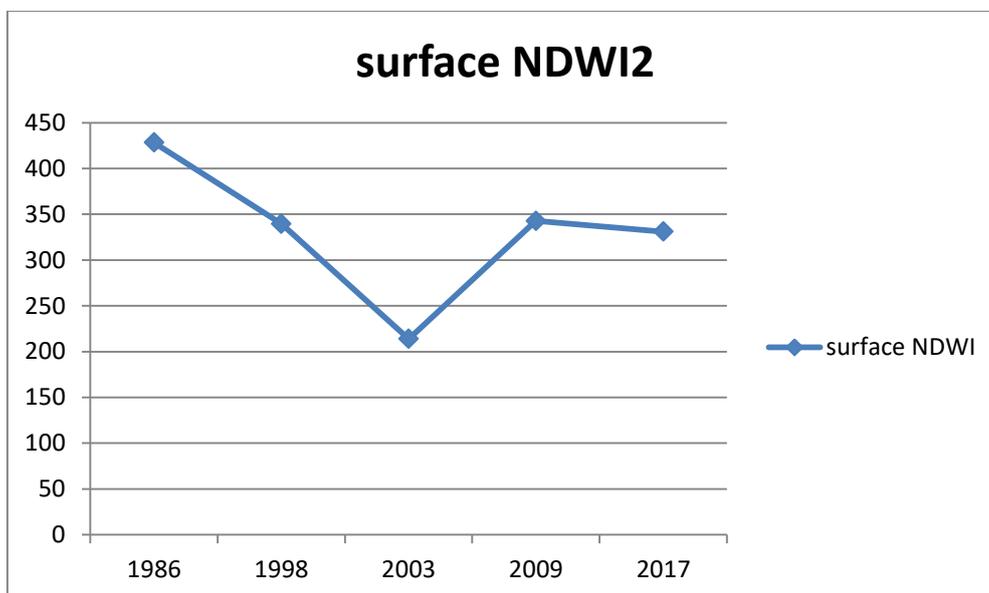


Figure 29: variation de surface NDWI (moisture) dans les images Landsat (1986-2017)

L'analyse des cartes temporelles de NDWI montre une régression globale des surfaces dans l'amont d'environ 5% dans ces dernières 30 années. L'humidité a occupé une superficie de 428.3 Km² en 1986 puis 339.6 Km² en 1998, 342.8 Km² pendant l'année 2009. Le tableau ci-dessous résume la variation de l'indice de l'eau dans la plaine du Haouz depuis 1986 jusqu'à 2017.

Année	surface NDWI	en%
1986	428.3	25.86821
1998	339.6	20.51096
2003	213.9	12.91901
2009	342.8	20.70423
2017	331.1	19.99758

Tableau 9 : Variation de la superficie de l'humidité dans le Haut Atlas (1986-2017)

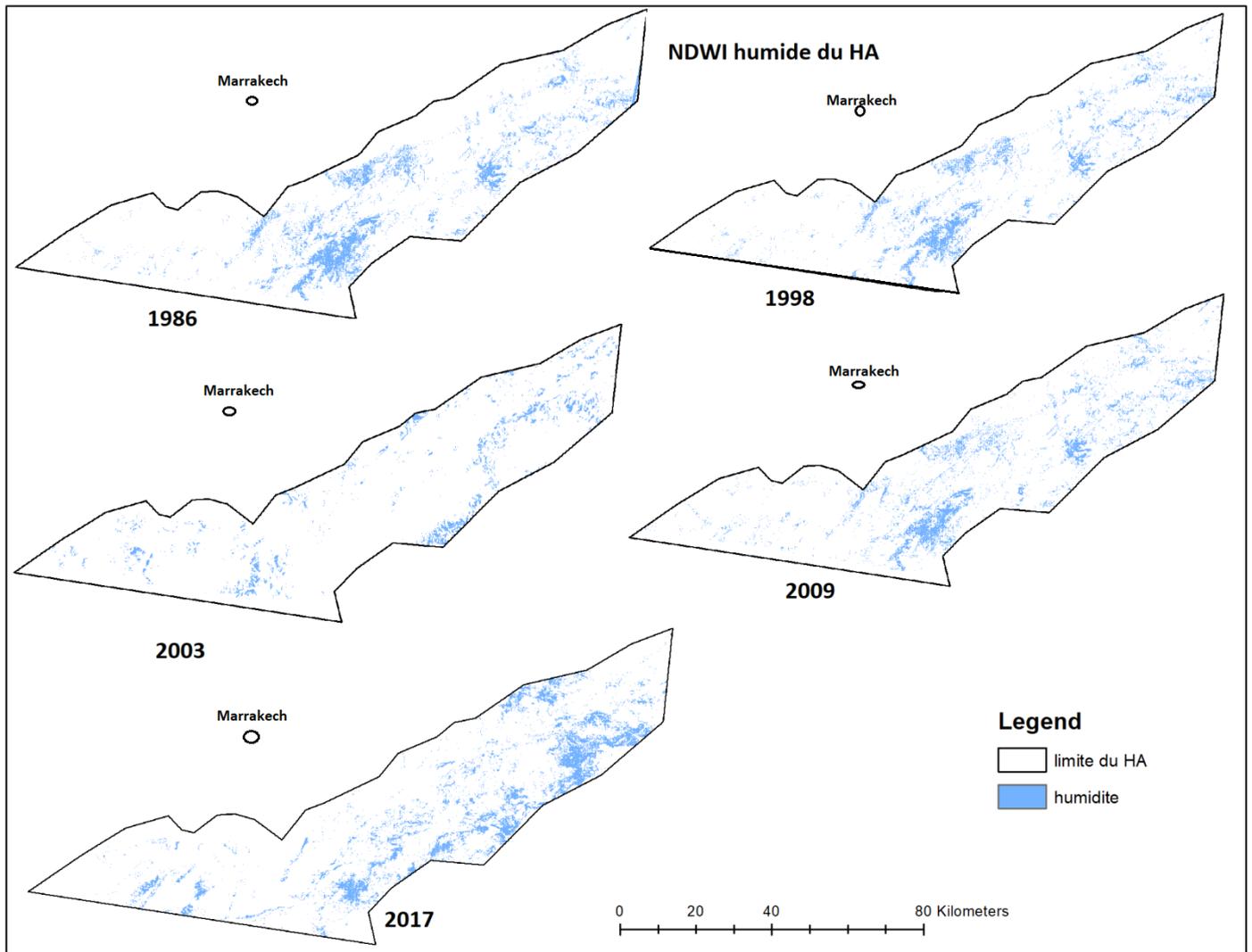


Figure30 : évolution de surface de l'humidité sur le versant Nord du Haut Atlas de Marrakech (1986-2017)

4. Variabilité spatio-temporelle des surfaces NDSI dans le Haut Atlas

La variation de l'indice du sol (superficie du sol) par différence normalisée NDSI entre les années 1986 et 2017. Les valeurs de cet indice sont comprises entre -1 et 1 en générale.

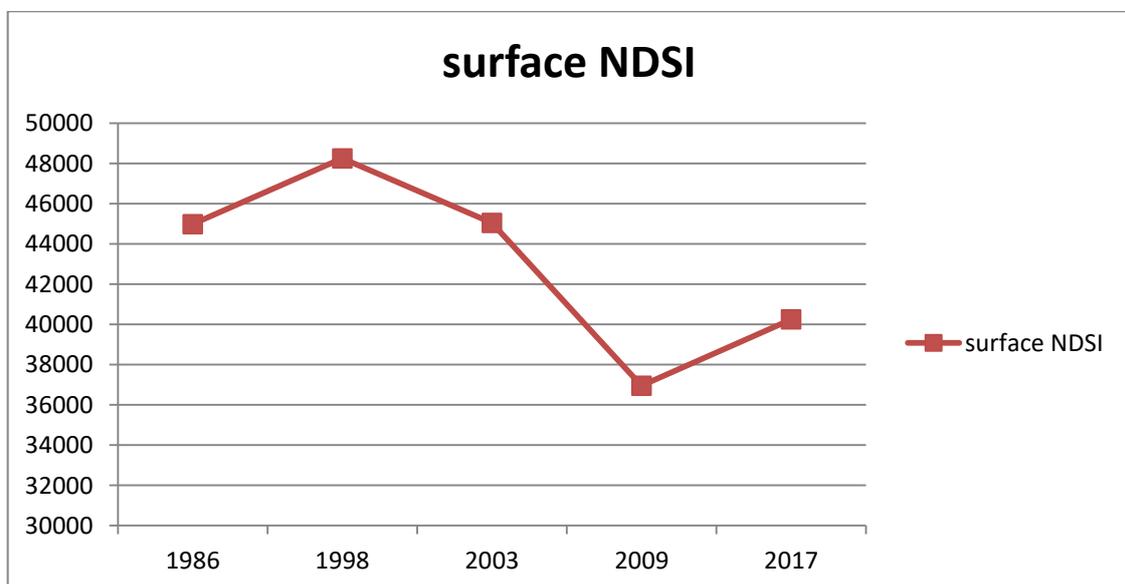


figure31 : variation de surface NDSI dans les images Landsat (1986-2017)

L'Indice NDSI a suivi un parallélisme inverse au NDVI, ayant la valeur maximal en surface végétale en 2009, celle-ci représente la valeur minimale pour cette indice. Le tableau ci-dessous représente les valeurs trouvées

Année	Surface	Surface en %
1986	44974.08	20.87453
1998	48247.119	22.3937
2003	45041.121	20.90565
2009	36946.188	17.14842
2017	40241.034	18.67771

Tableau 10 : Variation de la superficie du sol dans le Haut Atlas (1986-2017)

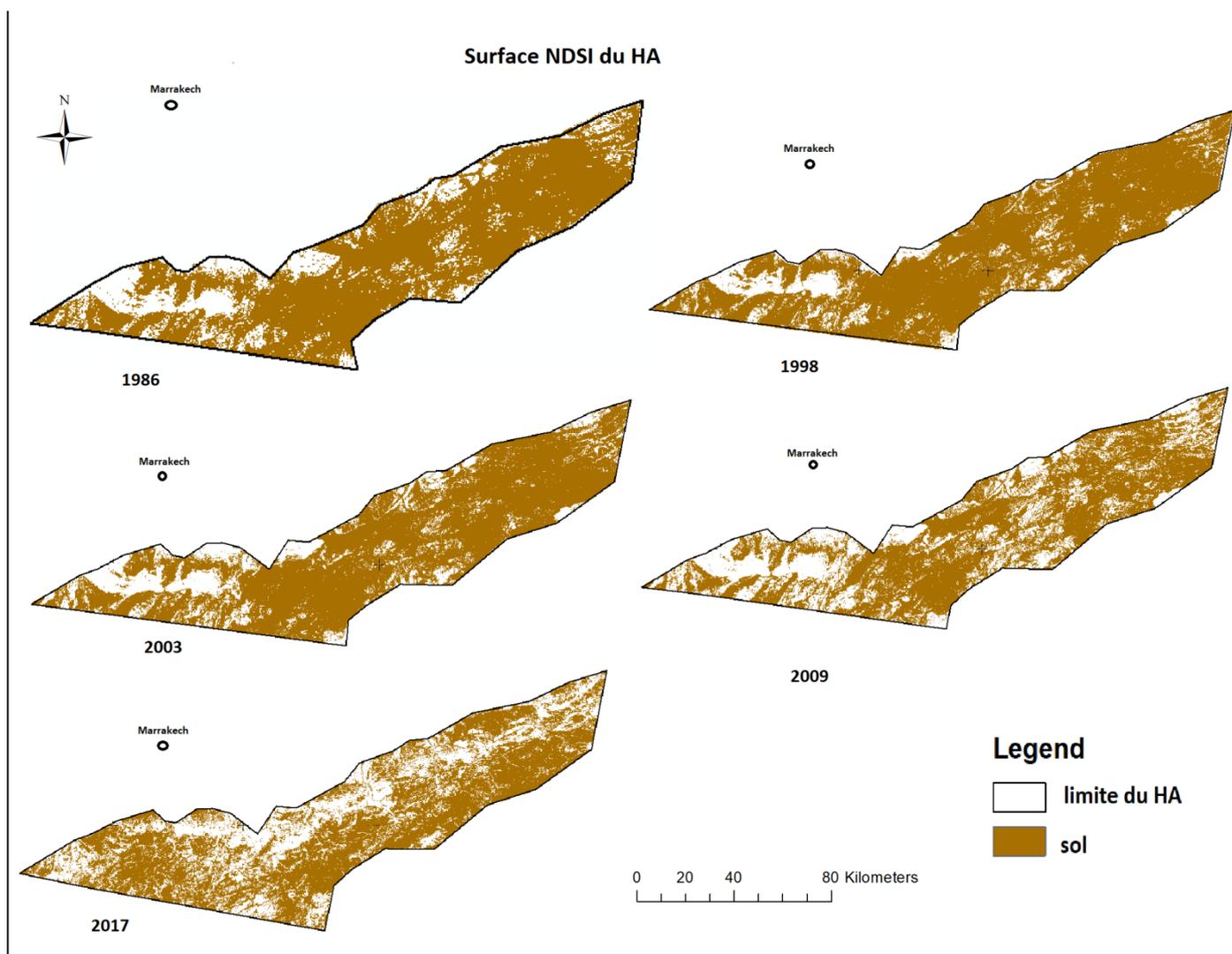


Figure32 : évolution du sol sur le versant Nord du Haut Atlas de Marrakech (1986-2017)

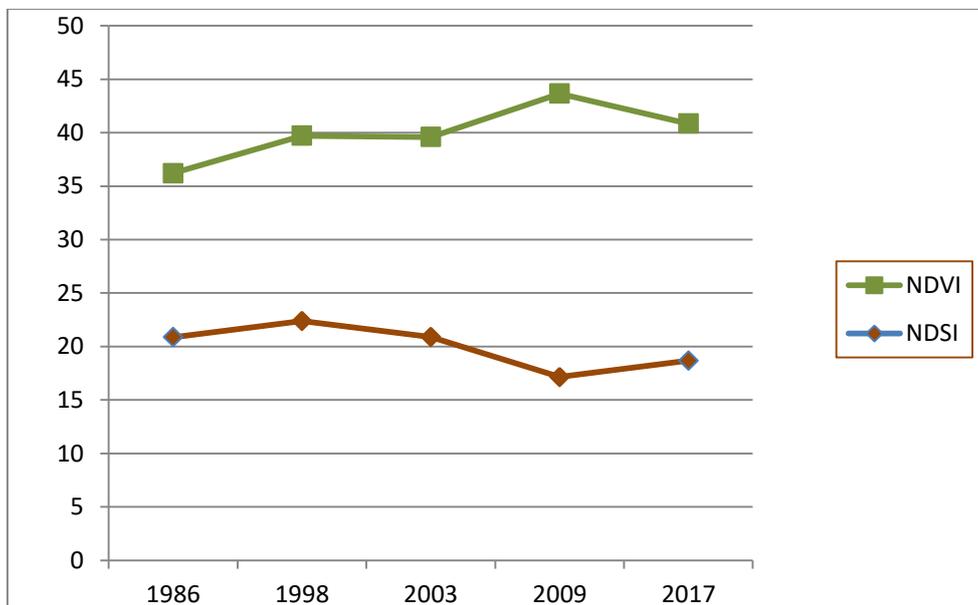


Figure 33 : comparaison entre le NDVI et le NDSI du Haut Atlas (1986-2017)

Conclusion

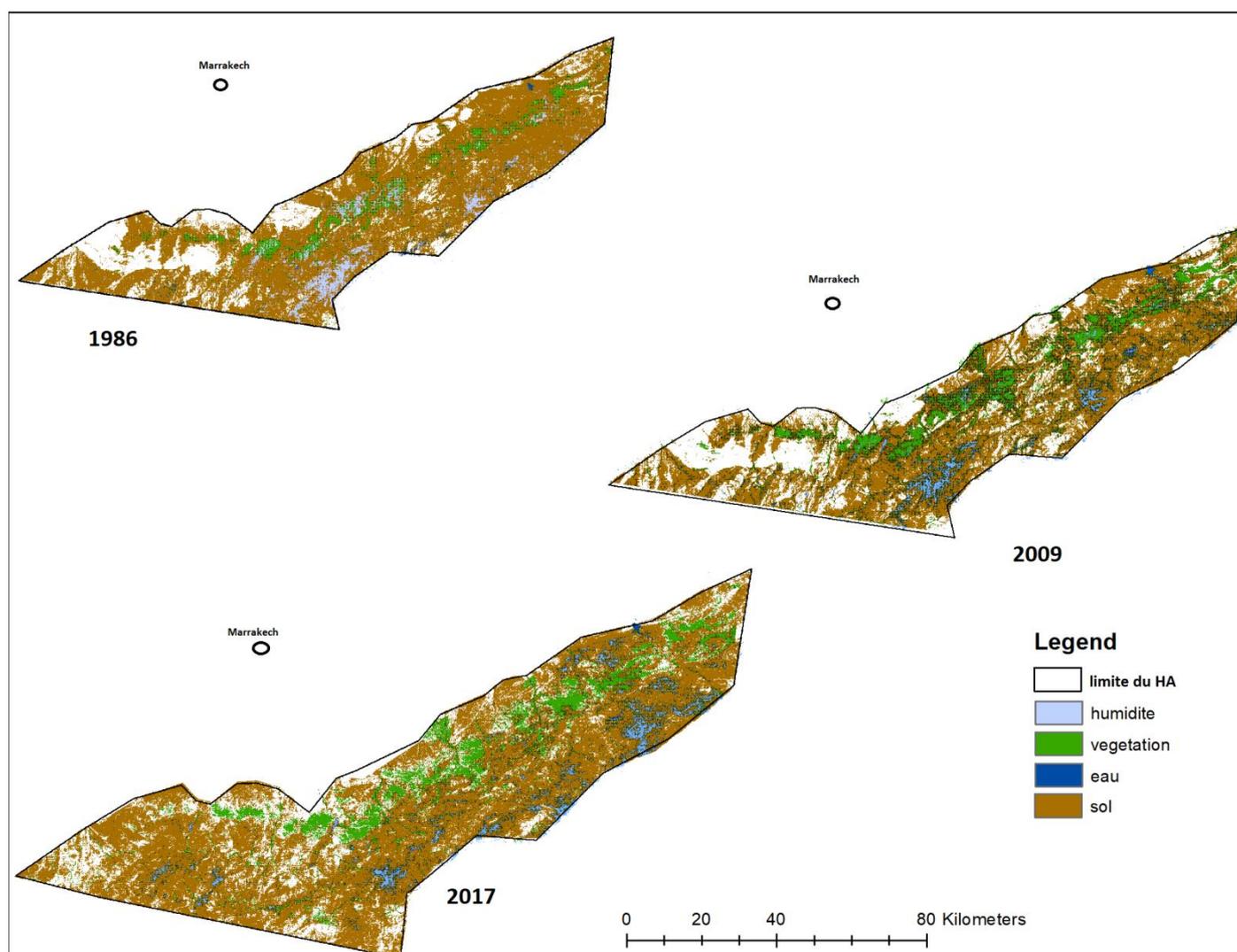


Figure34 : évolution des indices NDVI, NDWI, NDSI dans le versant Nord du Haut Atlas de Marrakech

- Cette variation est due au changement climatique qui affecte les précipitations mensuel :

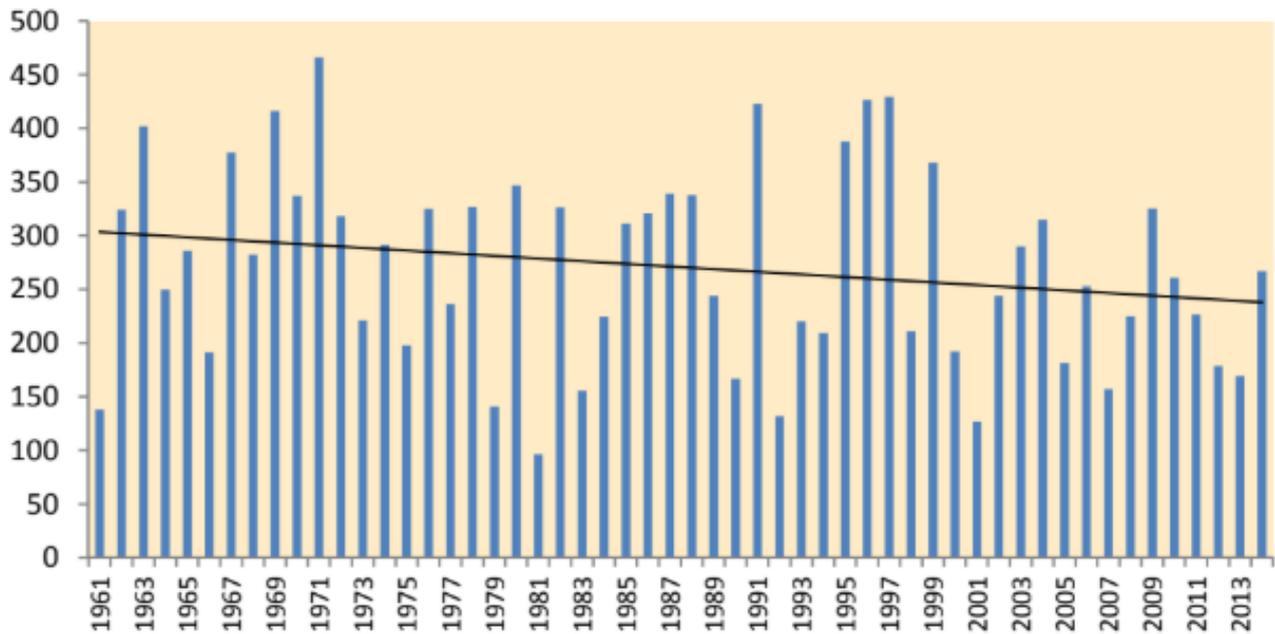


Figure 35 : Evolution des précipitations annuelles en (mm) à Marrakech sur la période (1961-2014)

La tendance à la baisse des précipitations met en relief la tendance au rétrécissement de la période du temps humide sur la région de Marrakech-Safi et par suite une installation régulière de la sécheresse qui est couplée à la hausse des températures précédemment constatées. Ce qui explique la diminution de l'indice de végétation.

Conclusion générale :

Entre 1986 et 2017 les thèmes d'occupation du sol en termes de couvert végétal, d'eau et d'humidité ont connu une évolution

- **De 1986-2003 :**
 - Une augmentation du NDVI de 15.3% à 18.6%
 - Une diminution du NDWI de 25% à 10%
 - Une augmentation du NDSI de 20.8% à 22.3% suivi d'une diminution a 20.9%
- **De 2003-2009 :**
 - Une augmentation du NDVI de 18.6% à 26.6%
 - Une augmentation du NDWI de 10% à 30%
 - Une diminution du NDSI de 20.9% à 17.1%
- **De 2009-2017 :**
 - Une diminution du NDVI de 26.5% à 22.1%
 - Une diminution du NDWI de 30% à 16%
 - Une augmentation du NDSI de 17% à 19%

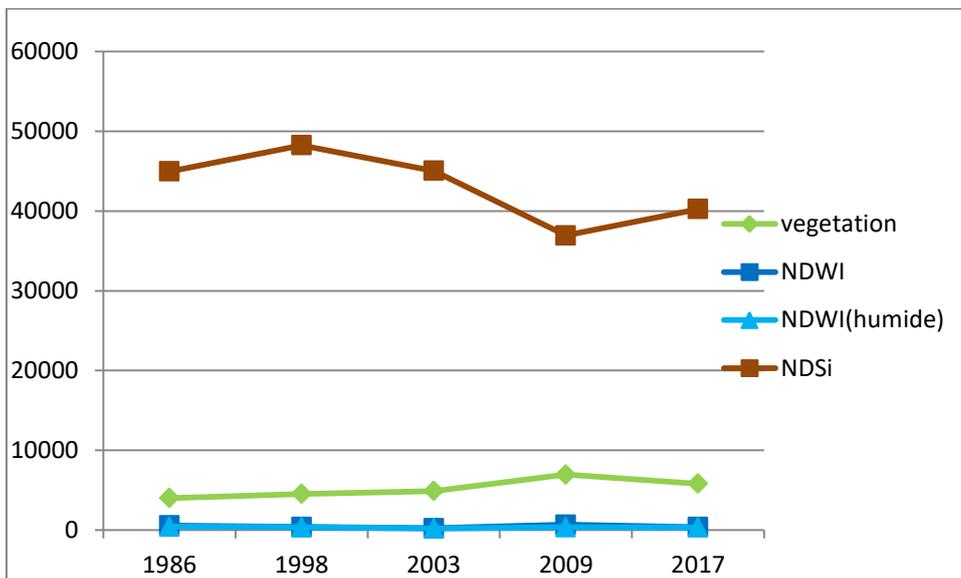
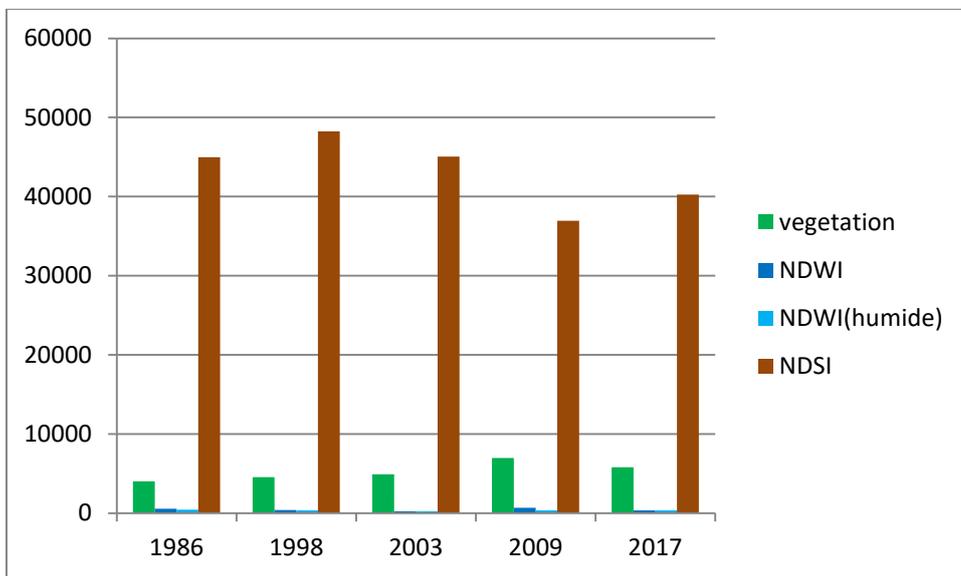


Figure38 : évolution des différent indice du bassin Nord du Haut Atlas

➤ Ceci montrant que 2009 était l'année des valeurs maximal NDVI et NDWI.

Références bibliographiques :

El Halim M. (2015) : Apport de la télédétection pour l'évaluation de la variation de surfaces d'eau et du couvert végétal dans la plaine du Haouz depuis 1984 jusqu'à 2014 , master en eau et environnement, université Cadi Ayyad.

Hanich L., Simoneaux V., Boulet G. et Chehbouni A.G., (2011), HYDROLOGIE DES BASSINS VERSANTS DU HAUT ATLAS MAROCAINE. Université Cadi Ayyad. Rapport scientifique, page 3.

Herbei M., Dragomir L., Oncia S. (2002), USING SATELLITE IMAGES LANDSAT TM FOR CALCULING NORMALIZED DIFFERENCE INDEX FOR THE LANDSCAPE OF PARANG MOUNTAINS.

Web référence:

https://www.memoireonline.com/10/09/2760/m_Suivi-spatio-temporel-de-la-couverture-neigeuse-dans-le-haut-atlas-de-marrakech-laide-des-images1.html

https://www.iwra.org/member/congress/resource/abs719_article.pdf

https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi5q7j-q-zbAhUusKQKHeKTC6sQjRx6BAQBEAU&url=https%3A%2F%2Fwww.memoireonline.com%2F10%2F09%2F2760%2Fm_Suivi-spatio-temporel-de-la-couverture-neigeuse-dans-le-haut-atlas-de-marrakech--laide-des-images1.html&psig=AOvVaw1XBNS2TaH32rIVVfopA_xZ&ust=1529928505393143

https://www.iwra.org/member/congress/resource/abs719_article.pdf

https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwid4tGspOzbAhUEyoQKHeecBVYQjR_x6BAQBEAQ&url=http%3A%2F%2Fflycee-romainrolland-ivry.fr%2FIMG%2Fpdf%2Factivite_androme_de.pdf&psig=AOvVaw1n94juRk7rNCA6YcrymvoU&ust=1529929133026681

<http://www.uoh.fr/front/document/ee86e66d/cdbb/47df/ee86e66d-cdbb-47df-a13e-bf502c963b0a/UOHGEOprod/Module115/pages/s3/page2366.xml>

<http://www.lagis.univ-lille1.fr/~bonnet/image/couleur.pdf>

<https://www.rncan.gc.ca/sciences-terre/geomatique/imagerie-satellitaire-photos-aeriennes/imagerie-satellitaire-produits/ressources-educatives/9408>

<https://landsat.usgs.gov/using-landsat-7-data>

<https://glovis.usgs.gov/app>

<https://www.researchgate.net/>

<https://www.researchgate.net/publication/311733879>

www.glovis.usgs.gov

www.infoclimat.fr