



كلية العلوم
والتقنيات - مراكش
FACULTÉ DES SCIENCES
ET TECHNIQUES - MARRAKECH

Département des Sciences de la Terre
Licence Sciences et Techniques
Eau et Environnement



Mémoire de Fin d'Études/

**Suivi de la couverture terrestre par télédétection,
exemple de la ville de Marrakech entre 1995 et
2016, Maroc**

Réalisé Par

RAFIK Abdellatif

OUGHRISS Mohammed

Encadrés par :

Pr. H.IBOUH (FSTG)

Soutenu le 29/06/2017 devant la commission d'examen composée de :

-Pr. IBOUH H. : Faculté des Sciences et Techniques-Marrakech

-Pr. SAIDI A. : Faculté des Sciences et Techniques-Marrakech

Année Universitaire : 2016/2017

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 **IBOUH Hassan** Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences et Techniques de Marrakech, Pour son encadrement, sa compréhension et son humanité. Ses conseils et ses encouragements ont permis à ce travail d'aboutir. Ses capacités scientifiques et ses compétences étaient notre grand support. Faire notre projet sous son encadrement était pour nous un grand honneur et un immense bonheur. La liberté qu'il nous accordé et les responsabilités qu'il nous a confiées ont beaucoup contribué à la formation de notre autonomie de travail.

Nos sincères remerciements à Mr **AKBOUB Mouad** et **El Halim Mouhssin**, étudiants doctorants au laboratoire LGSE de la FSTM, qui n'ont jamais hésité à nous aider durant toute la durée de notre stage.

Nos profonde gratitude envers les membres du jury, qui se sont libérés de leurs obligations pour juger ce travail, et à tous les professeurs du département des sciences de la terre de la faculté des sciences et techniques de Marrakech.

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.

Résumé

Marrakech est une ville située sur la plaine du Haouz, centre de la région Marrakech Tensift Al Haouz. La ville (superficie de 1367.037Km²) est divisée en deux parties distinctes : la ville historique (dix kilomètres d'enceinte) et la ville nouvelle dont les quartiers principaux s'appellent Guéliz et Hivernage, Douar Askar, Sidi Youssef Ben Ali, Mhamid, Daoudiat. Le Guéliz constitue aujourd'hui le centre-ville commercial. Le quartier de l'Hivernage concentre de nombreux complexes hôteliers. Depuis quelques années, la ville s'agrandit en périphérie, notamment à l'ouest avec l'apparition de nouveaux quartiers résidentiels comme pour la région de Targa ou l'extension de l'avenue Mohammed-VI.

Le but de ce projet est de suivre l'évolution spatio-temporelle de l'occupation du sol, dans cette province, en se basant sur la variation spatiotemporelle des surfaces de : La végétation, le sol nu, l'eau et enfin L'urbanisme. La méthodologie de travail se base sur la télédétection, il s'agit de traitement, d'analyse et d'interprétation d'images satellite multi-temporelles (1995 ; 2007 et 2016). Et l'extraction des indices NDVI, (Normalised **D**ifference **V**egetation **I**ndex) NDSI (Normalised **D**ifference **S**ol **I**ndex), NDWI (Normalised **D**ifference **W**ater **I**ndex) et le NDBI (Normalised **D**ifference **B**uilt-up **I**ndex). Ces Indices ont permis de calculer la surface des thèmes d'occupation du sol dans la zone d'études.

Parmi les méthodes d'analyse utilisées, nous citons deux techniques principales pour le traitement des images satellitaires, la première est celle de "**change detection**" qui permet de suivre les variations de la couverture terrestre à partir des indices issus d'images multi-temporelles (exemple de NDVI). La deuxième est celle de "ACP" (Analyse en Composante principale), elle nous permet de faire résoudre le problème de la confusion entre les éléments détectés en utilisant les bandes principales d'une image satellitaire qui regroupe l'essentiel des informations.

L'évolution temporelle du NDVI et du NDSI calculés montrent une corrélation étroite car les surfaces recouvertes par la végétation impliquent une régression des surfaces occupées par le sol. Dans la ville Marrakech la surface couverte par la végétation en 1995 a été d'environ 351,47 km² contre 1062,82 Km² pour le sol nu dans la même année, tandis qu'en 2016 la surface recouverte par la végétation est à l'entourage de 412,85 Km² contre 653,80 Km² pour le sol dans la même année.

Le NDWI a permis de suivre l'évolution des surfaces d'eau dans la ville depuis l'année 1995. L'analyse des cartes de ces indices montre une régression globale d'environ 1.40% au cours de ces dernières 20 années.

Pour l'indice de l'urbanisme NDBI (Normalised **D**ifference **B**uilt-up **I**ndex) d'après son calcul et l'interprétation des cartes, la ville de Marrakech a connu un grand développement au niveau de la surface recouverte par l'urbain. Car elle a augmenté de 193.16Km² (33.84%) entre 1995 et 2016, Au niveau de l'espace un élargissement très vite surtout vers l'ouest et vers le sud avec l'augmentation de la densité de population depuis les années 1990.

Mots clés : La ville Marrakech, occupation du sol, NDWI, NDVI, NDSI, NDBI, Les images satellites multi-temporelles, change detection, ACP, Landsat TM et OLI.

Sommaire :

Remerciements.....	1
Résumé.....	2
Sommaire :.....	3
Liste des figures :	5
Liste des tableaux :	6
Liste des abréviations :	6
Introduction Générale	7
Présentation du projet	8
Premier chapitre :.....	9
Présentation de La zone d'étude.....	9
I. Contexte géographique :	10
II. Contexte géologique :.....	10
III. Contexte climatique :	11
IV. Contexte hydrologique :	12
V. Contexte démographique :.....	12
VI. Contexte pédologique :	13
Deuxième chapitre :	14
Matériel et Méthodologie	14
I. Principe et Méthodologie :.....	15
1. Principe.....	15
2. Méthodologie :	15
II. Le spectre électromagnétique :.....	17
III. Capteurs :.....	18
1. Capteurs actifs	18
2. Capteurs passifs.....	19
IV. L'image satellitaire :.....	19
1. Résolution :.....	20
2. Capteur utilisés :.....	21
3. Le choix des dates des images :	23
4. Méthodologie :	24
V. Classification :	24
VI. Les indices spectraux:.....	24
1. L'indice de végétation par différence normalisée ou indice de Tucker (NDVI).....	24
2. L'indice de l'eau par différence normalisée NDWI (Gao, 1996).....	26
3. <i>Indice du sol par différence normalisée NDSI (Takeuchi and Yasuoka, 2004) :</i>	27

Troisième chapitre :	28
Résultats, discussions et interprétations.....	28
Introduction :	29
I. Variabilité spatiotemporelle des différents indices.	30
1. Evolution spatio-temporelle de la végétation dans la ville Marrakech (NDVI).....	30
2. Evolution spatio-temporelle du sol dans la ville du Marrakech (NDSI).....	32
3. Evaluation spatio-temporelle des surfaces d'eau dans la ville (NDWI).....	36
4. Evolution spatio-temporelle de l'indice de l'urbanisme dans la ville de Marrakech (NDBI).....	38
II. Comparaison de classification supervisées et cartes des indices calculés :	41
1. Cartes d'occupation du sol :	41
2. Comparaison de la classification supervisée et indices (exemple du sol) :	44
III. Application d'autres traitements.	45
1. Traitement ACP (Analyse en Composante Principale) :	45
2. Application de la technique « Change détection » pour l'estimation du changement de la couverture terrestre du Marrakech entre 1995 et 2016 :.....	48
Conclusion :	51
Références bibliographiques :	53

Liste des figures :

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.	10
Figure 2 : Climatologie de Marrakech (source : DMN).....	11
Figure 3 : carte du réseau hydrographique du bassin de Tensift.(Abourida A. (2007),.....	12
Figure 4 : Carte pédologique de la ville de Marrakech (Direction de l'agriculture du commerce et des forêts 1951).....	13
Figure 5 : processus de la télédétection. (Centre Canadien de Télédétection).	16
Figure 6 : Le spectre électromagnétique. (http://tpe-ondeselectomagnétiques.e-monsite.com).	17
Figure 7 : capteur actifs. (CCT)	18
Figure 8 : capteurs passifs. (CCT).....	19
Figure 9 : Aéroport international de Marrakech (image Landsat TM 2007).	20
Figure 10 : représentation des pixels dans une image satellitaire.....	20
Figure 11 : Variations de la signature spectrale en fonction de l'état physiologique de la végétation (http://e-cours.univ-paris1.fr)	25
Figure 12 : Les deux types d'indice de l'eau par différence normalisée(NDWI) montrant l'humidité des plantes en bleu adroite, est les surfaces d'eau en bleu à gauche.....	26
Figure 13 : exemple d'indice par différence normalisé NDSI.	27
Figure 14 : variation des valeurs de l'indice de végétation NDVI (1995, 2007 et 2016)	30
Figure 15 : évolution des surfaces végétales dans la ville de Marrakech entre 1995, 2007 et 2016.	31
Figure 16 : Cartes multi-temporelles d'indice de végétation (NDVI) de la ville Marrakech.....	32
Figure 17 : variation des valeurs de l'indice du sol NDSI.....	33
Figure 18 : évolution des surfaces du sol dans la ville de Marrakech.	34
Figure 19 : Carte d'indice du sol (NDSI) dans la ville de Marrakech (1995-2016).	34
Figure 20 : Variation des indices NDSI et NDVI dans la ville de Marrakech.	36
Figure 21 : Variation de l'indice de l'eau dans la ville de Marrakech (1995-2016).	36
Figure 22 : diagramme de la variation des superficies de l'eau dans la ville de Marrakech (1995-2016).....	37
Figure 23 : Carte d'indice de l'eau (NDWI) dans la ville de Marrakech (1995-2016).	38
Figure 24 : diagramme de l'évolution de la surface de l'urbanisme en % dans la ville de Marrakech (1995-2016).....	39
Figure 25 : carte d'indice de l'urbain de la ville de Marrakech entre 1995 et 2016.	40
Figure 26 : Carte d'occupation du sol issue de l'image Landsat TM 1995.	41
Figure 27 : carte d'occupation du sol de la ville de Marrakech 2007 (Landsat TM).	42
.....	43
Figure 28 : Carte d'occupation du sol de la ville de Marrakech (Landsat OLI 2016).	43
Figure 29 : Diagramme d'évolution de la superficie (en km ²) du sol de la ville entre 1995 et 2016.	44
Figure 30 : Diagramme de comparaison de la surface calculée d'après les deux méthodes.....	45
Figure 31 : Image avant traitement ACP de la ville Marrakech (2016).	46

Figure32 : Composé coloré à base des ACP 432 dans les différentes périodes de la ville Marrakech (1995-2016).....	47
Figure 33 : technique de la détection du changement du couvert végétal de la ville Marrakech (1995-2007)..	48
Figure 34 : Carte de la détection du changement du couvert végétal dans la ville Marrakech entre 1995 et 2007 à base du NDVI des images Landsat TM.....	49
Figure 35 : Carte de la détection du changement du couvert végétal dans la ville Marrakech entre 2007 et 2016 à base du NDVI des images Landsat TM.....	50

Liste des tableaux :

TAB 1 : Evolution démographique de la ville de Marrakech de 1971 à 2010.	13
TAB2 : d'équivalence entre les bandes du capteur TM(en noir) et OLI(en rouge) de Landsat.El Halim, M. (2015).	22
TAB 3 : Les principales métadonnées des images Landsat utilisées (www.glovis.usgs.gov)	24
TAB 4 : Evolution spatio-temporelle de l'NDVI dans la ville de Marrakech.	31
TAB 5 : Evolution spatio-temporelle de NDSI dans la ville de Marrakech.....	33
Tab 6 : variation de la superficie de l'eau dans la ville de Marrakech (1995-2016).	37
TAB 7 : variation spatio-temporelle de la superficie de l'urbain de la ville de Marrakech entre 1995 et 2016.	39
Tab8 : variation de la superficie (en km ²) des différents éléments de la ville entre 1995 et 2016.....	44
TAB 9 : variation de la superficie du sol d'après les deux méthodes de la ville Marrakech.....	45
TAB 10 : variation de la superficie du couvert végétal d'après la technique (change detection) entre 1995 et 2007 de la ville Marrakech.	49
TAB 11 : variation de la superficie du couvert végétal d'après la technique (change detection) entre 2007 et 2016 de la ville Marrakech.	50

Liste des abréviations :

ACP : Analyse en Composante Principale.
NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.
NDWI: Normalized Difference Water Index.
NDSI: Normalized Difference Soil Index.
NDBI: Normalized Difference Built-up Index.
TM: Thematic Mapper.
OLI: Operational Land Imager.
NGM : Niveau Générale de la Mer.
DMN :Direction de la Météorologie Nationale.
SIG : Système d'Information Géographique.
ENVI: Environment for Visualizing Images.
CCRS: Canada Centre for Remote Sensing.
CCT : Centre Canadien de Télédétection.
USGS: United States Geological Survey.
IR : Infra-Rouge.
PIR : Proche Infra-Rouge.
SWIR: Short-Wave length Infra-Red.

Introduction Générale

Au Maroc, à partir du milieu des années 1990, l'urbanisme et l'aménagement connaissent un certain nombre de mutations. Dans un contexte de poursuite de l'ouverture économique et d'une certaine démocratisation, la décentralisation confère aux communes et aux régions de nouvelles responsabilités et compétences. En parallèle, le mouvement de déconcentration des services centraux s'accroît. L'action et la tutelle de l'État n'en demeurent pas moins très présentes. On assiste à l'avènement de nouveaux référentiels des politiques publiques (développement de procédures contractuelles négociées, management territorial). Les changements en cours offrent des opportunités nouvelles d'intervention, certes encore très ponctuelles ou expérimentales. Ces évolutions tendent, dans une certaine mesure, au renouvellement d'une partie des références et des pratiques des milieux professionnels de l'urbanisme notamment dans l'administration.

Ces grandes tendances peuvent être largement expliquées par le processus de développement économique et la répartition géographique des activités qui l'accompagne, et décrites par la fameuse courbe en cloche des inégalités urbaines et régionales.

Dans ce contexte, la télédétection est un outil privilégié. Elle permet l'acquisition régulièrement de données distribuées dans l'espace et dans le temps pour caractériser une évolution spatiotemporelle de l'occupation du sol, à savoir : l'urbanisme, la végétation, les surfaces d'eau et le sol nu. Ces caractéristiques peuvent être utilisées afin d'estimer l'évolution de la zone étudiée (Ville de Marrakech) depuis 1995 jusqu'à l'actuel.

L'examen des images satellites de différentes périodes va permettre de suivre l'évolution de l'urbanisme par rapport aux espaces verts et surfaces d'eau dans la zone d'étude, ce qui sera un moyen facile et moins coûteux et rapide pour réaliser des cartes d'évolution spatiotemporelle de l'occupation des constructions et l'habitats. Ces dernières serviront de document de base pour toute décision sur l'aménagement urbain ou agricole de la plaine du Haouz en général et la ville de Marrakech en particulier.

Présentation du projet

La recherche réalisée consiste à mettre en place des plans simples concernant la gestion de l'évolution de l'urbanisme et son impact, dans ce cas l'objectif est de suivre la variation spatiotemporelle de l'urbanisme en corrélation avec la végétation, le sol nu et les surfaces d'eau. Pour cela, les changements dans la couverture terrestre seront suivis sur une période de 20 ans. La couverture urbaine sera cartographiée et évalués à partir du traitement numérique des données spatiales LANDSAT TM (1995 et 2007) et OLI (2016). Les cartes des indices de végétation, d'eau, des constructions et du sol (NDVI, NDWI, NDBI et NDSI) obtenues à l'issue des traitements ont permis d'identifier les changements au sein de la ville.

Il est évident que, la gestion de la couverture terrestre en terme de l'occupation du sol reste difficile et couteuse ce qui nécessite de soutenir les stratégies disponibles par le biais de l'introduction de techniques géo-spatiales innovantes telles que NDVI, NDWI et NDSI pour renforcer la surveillance, la caractérisation et le suivi et la réponse des écosystèmes face aux changements climatiques et à l'évolution économique. Durant ce travail un certain nombre de questions seront exposées et discutées :

- La classification des images et des indices de végétations peut être une solution convenable et appropriée pour expliquer la variation de la couverture urbaine de la zone d'étude ?
- Le niveau de propagation de la couverture terrestre peut être expliqué de manière adéquate à partir de données de télédétection ?
- Y a-t-il la détection des changements spatio-temporelle observée dans les zones d'étude, et dans quel sens se font-ils ?

En se basant sur les questions citées ci-dessus, on arrive à déterminer les objectifs souhaitables de cette étude :

- Initiation au traitement des images satellitaires à basse et à haute résolution spatiale.
- Estimation du taux de variation de la végétation, l'urbanisme, surface d'eau et du sol dans Marrakech depuis 1995 jusqu'à l'actuel.
- Elaboration des cartes des indices spectraux NDVI, NDWI, NDSI et NDBI de la ville de Marrakech.
- Etablissement de la carte d'occupation du sol de la zone d'étude.
- Etablissement de la carte des différents types des cultures dans la zone.
- Vérifier l'extension de la zone urbaine au dépend de la végétation et du sol ces dernières 20 années.

Premier chapitre :
Présentation de La zone d'étude

I. Contexte géographique :

La zone d'étude est limitée à la ville de Marrakech entre la longitude 8.14° et 7.88° ouest et la latitude=31.72° et 31.53° nord (figure1). Elle est située, dans la plaine du Haouz centrale, une plaine uniforme s'inclinant doucement selon une pente d'environ 8% orientée du Sud Est vers le Nord-Ouest depuis la côte 460m NGM jusqu'à la côte 380m NGM (Oued Tensift). Les seuls reliefs sont constitués par les jBELS (collines) Guéliz et Koudiat al Abid. (Ambroggi R. et Thuile G., (1952)).

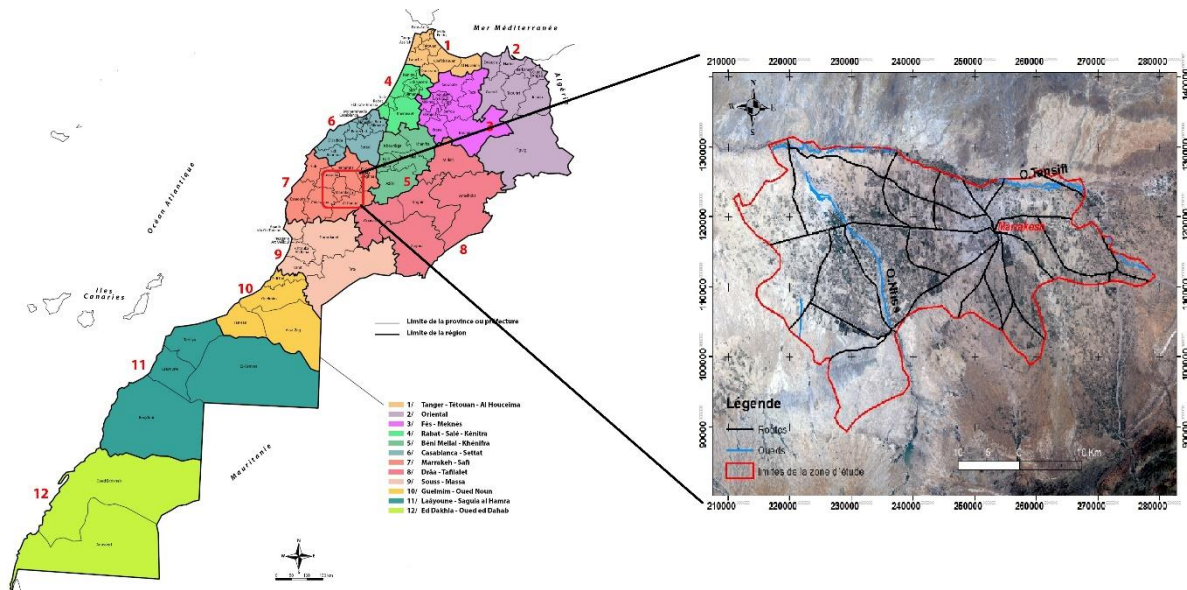


Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude.

II. Contexte géologique :

La ville de Marrakech appartient à la plaine du Haouz qui connaît toute fois une répartition très inégale dans le sous-sol de la plaine allant du nord au sud du Haut Atlas aux Jbilet. Tous les étages de la série géologique, du primaire au quaternaire récent, sont représentés. Elle est formée sur un substratum paléozoïque essentiellement schisteux et imperméable, ce substratum primaire schisteux est recouvert par des formations secondaires et tertiaires variées, notamment des grès rouges du Permo-Trias ainsi que des calcaires, des marnes et des grès du Crétacé et de l'Eocène puis des dépôts alluviaux graveleux datant de quaternaire. Ces dépôts sont le produit d'érosion des roches de l'Atlas charriés par un réseau hydrographique et ils sont insérés dans une matrice argileuse. Ils sont caractérisés par leur extrême hétérogénéité. Les collines calcaires Jbel Guéliz et Koudiat al Abid sont les seuls reliefs de cette plaine, issues de mouvements de failles inverses affectant le socle paléozoïques de subsurface.

(www.upicardie.fr/beauchamp/Maroc/GEOL_MRKCH.html).

III. Contexte climatique :

La ville est sujette à un climat semi-aride (classification de Koppen). La température moyenne annuelle est de 20 °C. La moyenne des précipitations est de 281 mm par an, soit moins que la zone climatique méditerranéenne (400 mm par an). Le climat de Marrakech peut être apparenté à celui que l'on trouve en Californie intérieure ; on peut parler de climat méditerranéen atténué par la proximité du désert. Le climat varie énormément d'une année à l'autre ; en effet si certaines années la ville peut recevoir 500 mm de précipitations (climat méditerranéen), elle peut d'autres années ne recevoir qu'une petite centaine de millimètres d'eau. À Marrakech, les hivers sont souvent froids la nuit et le matin (5 °C environ, parfois 0 °C). Les étés, quant à eux, sont très souvent torrides, avec des températures moyennes de 28 °C. En journée, il n'est pas rare que le mercure dépasse la barre des 40 °C. Le record de chaleur a été observé le 17 juillet 2012 avec 49,6 °C.

Les orages éclatent la plupart du temps vers les mois d'octobre et novembre, car un vent humide et assez rare, le *Herrûrco*, apparaît en automne, pour y apporter des pluies et orages. Quant à l'hiver, il est assez humide et il n'est pas rare qu'il pleuve plusieurs jours de suite. Les montagnes de l'Atlas qui cernent la ville sont enneigées de novembre à mai en moyenne, offrant un magnifique paysage aux portes de Marrakech. Les précipitations sont rares (moins de 25 jours par an). L'ensoleillement annuel y est d'environ 340 jours. (www.infoclimat.fr)

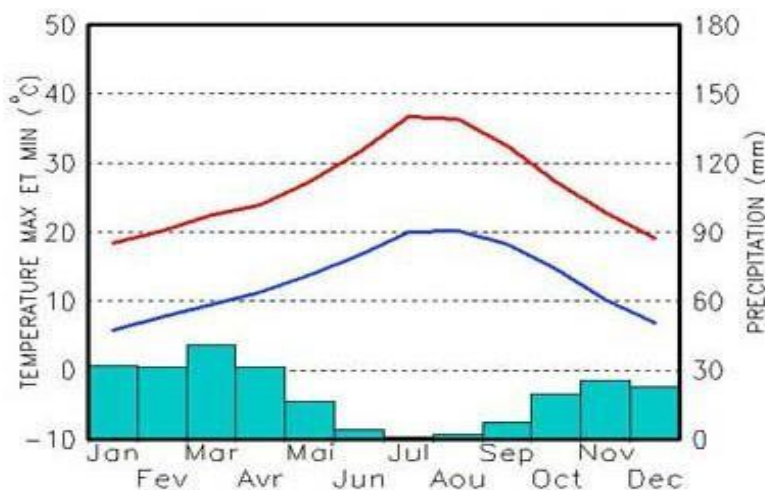


Figure 2 : Climatologie de Marrakech (source : DMN).

IV. Contexte hydrologique :

L'Oued Tensift qui constitue le principal cours d'eau de la ville de Marrakech, coule d'Est en Ouest dans la plaine du Haouz au pied des Jbilet. Les principaux affluents de la rive gauche du Tensift prennent naissance dans la Province du Haouz : Oued R'Dat, Zat, Ourika, Rhéraya et N'fis. Le débit total produit par ces oueds est de l'ordre de 20 m³/s, soit un volume moyen annuel de 600 Mm³. La qualité des eaux de surface est bonne à l'exception de l'aval des rejets des centres. Alimentant en grande partie le barrage de LallaTakerkoust, située à 30km environ en amont du centre Tnine l'Oudaya. (Abourida A. (2007), APPROCHE HYDROGEOLOGIQUE DE LA PLAINE DU HAOUZ (MAROC) PAR TELEDETECTION, ISOTOPIE, SIG et MODELISATION. Thèse De Doctorat, université Cadi Ayyad, 160 pp.)

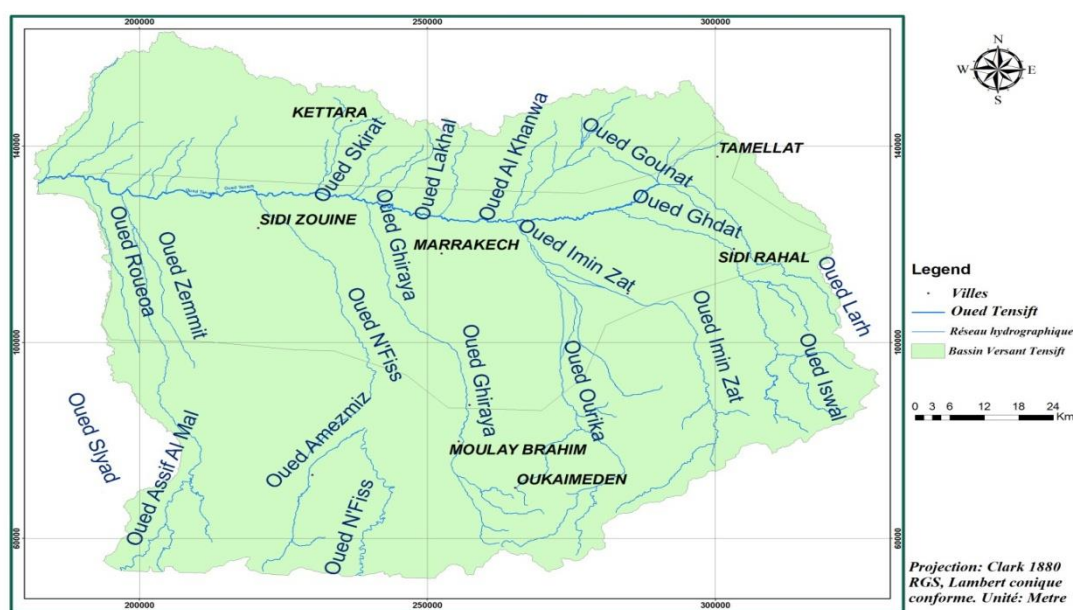


Figure 3 : carte du réseau hydrographique du bassin de Tensift.(Abourida A. (2007),

V. Contexte démographique :

En 1994, la population de la ville de Marrakech était de 672506 habitants et la densité de 12454 habitants/Km². La densité a doublé au cours des 23 dernières années : elle était de 6162 habitants/Km² en 1971 et 8143 habitants/Km² en 1982.

Ces dernières années, l'accroissement démographique à Marrakech s'est accéléré en raison d'un accroissement naturel et de l'exode rural. Il compte une population d'environ 909 000 habitants en 2010, concentrée surtout à Marrakech-Médina, Ménara-Guéliz et Sidi Youssef Ben Ali (Tab.1)

(<http://www.pnud.org.ma/agenda21/agenda/Agenda21/Marrakech/ProfilMarrakech.pdf>)

Années	1971	1982	1994	2004	2010
Populations (Hab)	332741	439728	672506	823154	909000

TAB 1 : Evolution démographique de la ville de Marrakech de 1971 à 2010.
<http://www.pnud.org.ma/agenda21/agenda/Agenda21/Marrakech/ProfilMarrakech.pdf>

VI. Contexte pédologique :

La dernière étude pédologique fut réalisée en 1951 (par la direction de l'agriculture, du commerce et des forêts), au niveau de toute la plaine du Haouz. Elle a révélé la présence de quatre types de sol de différente nature : Rouge, gris, Châtain et bruns. Leur texture est généralement limono-argileuse, limoneuse et limono-sableuse (Fig.4).

Dans le Haouz central le sol est constitué essentiellement par : des sables fins, des limons roses et de argiles rouges. Ils sont généralement pauvres en matière organique naturelle surtout dans les terrains cultivés.

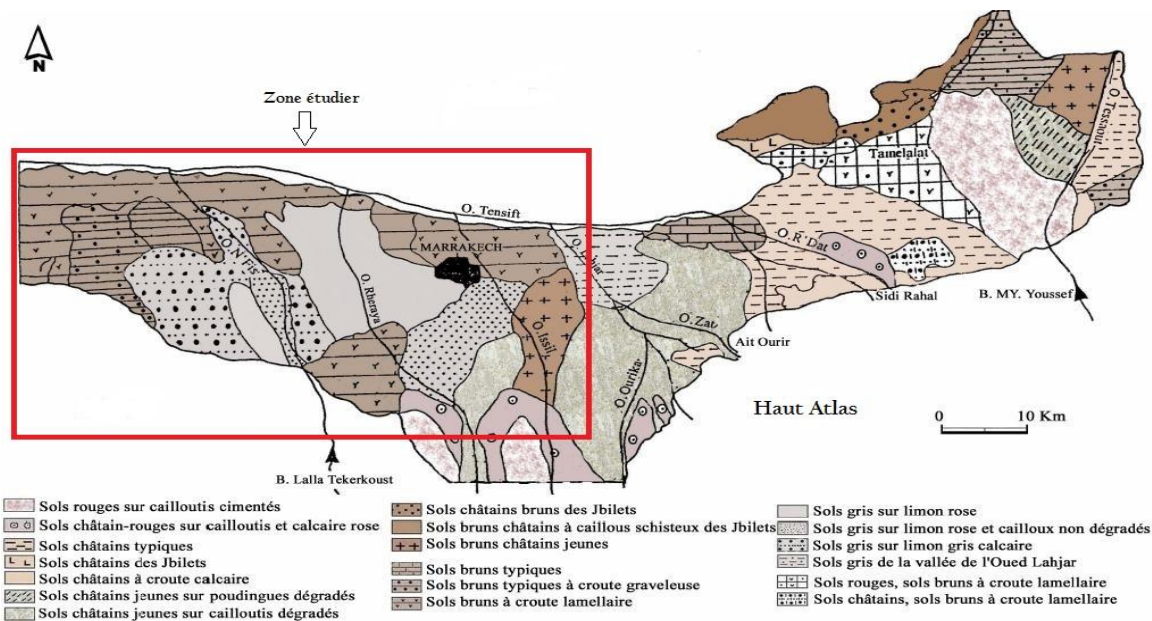


Figure 4 : Carte pédologique de la ville de Marrakech (Direction de l'agriculture du commerce et des forêts 1951).

Deuxième chapitre :
Matériel et Méthodologie

I. Principe et Méthodologie :

L'objet de ce second chapitre est de préciser les notions physiques fondamentales de la télédétection. Les différents aspects relatifs aux techniques d'acquisition passives optiques sont d'abord présentés, en s'intéressant notamment aux longueurs d'ondes utilisées et aux réponses spectrales caractéristiques des classes d'objets. Les bases physiques de la télédétection par micro-ondes sont ensuite abordées selon un schéma similaire.

1. Principe

« La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre 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, pour ensuite mettre en application cette information. »

La télédétection, pratiquement inconnue il y a une trentaine d'années, est aujourd'hui utilisée de manière presque routinière pour de nombreuses applications. Elle suscite cependant toujours quelque méfiance de la part d'un certain nombre de chercheurs ; cela peut être dû à la méconnaissance ou la peur d'utiliser ce qu'il est convenu d'appeler une technique nouvelle, plus souvent il s'agit d'une réaction de rejet devant l'usage abusif de la télédétection dans les domaines où son approche n'est pas toujours recommandée. En fait, la télédétection n'est pas simplement une technique, et trop souvent elle est confondue avec le seul traitement de l'image. Il y a là une confusion regrettable dans les termes, alors qu'il s'agit de notions bien différentes avec des connaissances requises à trois niveaux :

- Thématique, point de départ évident de toute étude.
- , Images satellitaires une des sources de données.
- Télédétection et Traitement de l'image, outil.

2. Méthodologie :

Dans la plupart des cas, la télédétection implique une interaction entre l'énergie incidente et les cibles. Le processus de la télédétection au moyen de systèmes imageurs comporte les sept étapes que nous élaborons ci-après. Notons cependant que la télédétection peut également impliquer l'énergie émise et utiliser des capteurs non-imageurs.

Dans cette méthodologie, une prise en main des logiciels de traitement des images satellites (Erdas Imagine et ENVI), du logiciel du SIG (ArcGis 10, Global mapper, et Qgis) et de modélisation (R, Windisp). Ces derniers permettent le traitement et la comparaison des différentes images multi-spectrales à basse et haute résolution spatiale (LANDSAT TM, et OLI.) et le calcul et la comparaison des indices spectraux NDVI, NDSI, NDWI et NDBI.(par Bonn F., and Rochon G.,(1992)).

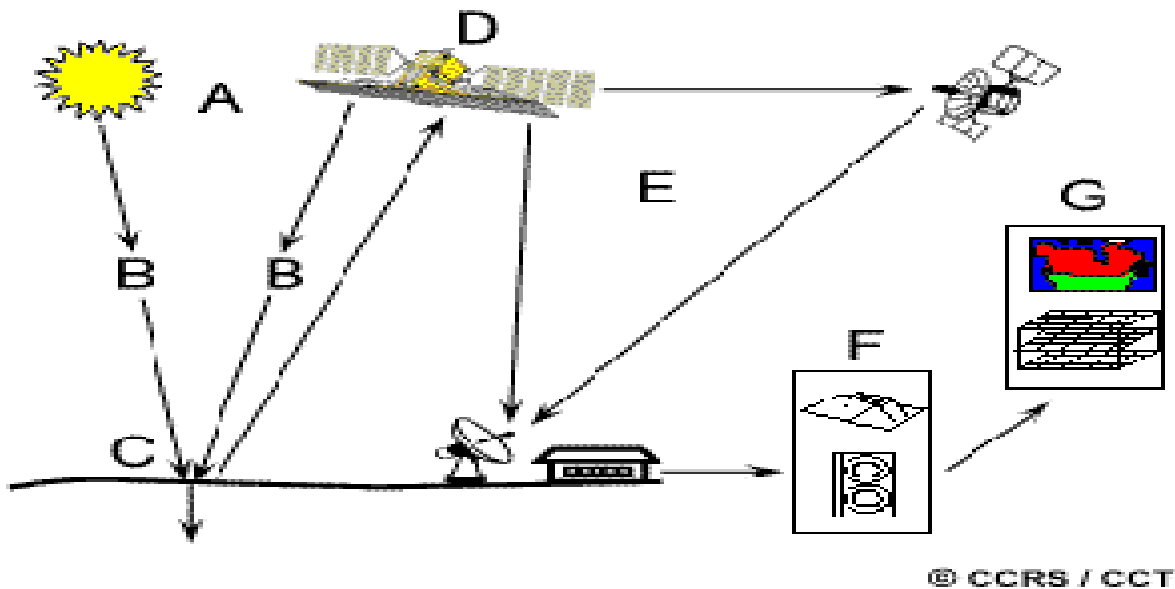


Figure 5 : processus de la télédétection. (Centre Canadien de Télédétection).

- 1. Source d'énergie ou d'illumination (A)** - À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.
- 2. Rayonnement et atmosphère (B)** - Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.
- 3. Interaction avec la cible (C)** - Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.
- 4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)** - Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.
- 5. Transmission, réception et traitement (E)** - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).
- 6. Interprétation et analyse (F)** - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- 7. Application (G)** - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

II. Le spectre électromagnétique :

Le rayonnement électromagnétique est un phénomène vibratoire constitué par une ensemble d'onde. Chaque onde est caractérisée par une amplitude et une fréquence différentes, et donc par des longueurs d'onde propres.

Le spectre électromagnétique s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique.

Les bandes utilisées dans la
Télédétection
(1nm-1m)

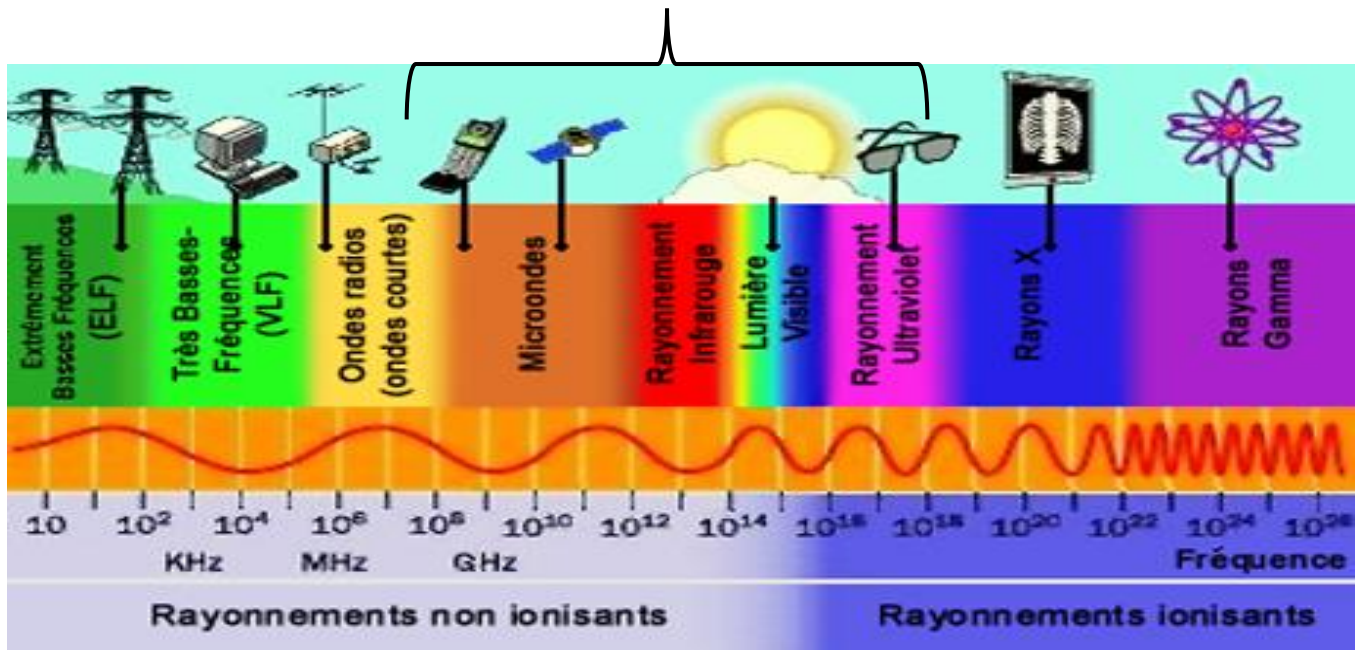


Figure 6 : Le spectre électromagnétique. (<http://tpe-ondeselectomagnetiques.e-monsite.com>).

- ✓ Les plus petites longueurs d'onde utilisées pour la télédétection se situent dans l'**ultraviolet (1nm à 0.4 µm)**.
- ✓ Les longueurs d'**onde visibles** s'étendent de **0,4 à 0,7 µm**.
- ✓ L'**infrarouge** s'étend approximativement de **0,7 à 1 µm**, ce qui est un intervalle environ 100 fois plus large que le spectre visible. L'infrarouge se divise en deux catégories : **IR réfléchi** et **IR émis** ou **thermique**.
- ✓ La région des **hyperfréquences** suscite beaucoup d'intérêt en télédétection. Cette région comprend les plus grandes longueurs d'onde utilisées en télédétection et s'étend approximativement de **1 mm à 1 m**.

III. Capteurs :

Un **capteur** est un dispositif transformant l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable, telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, une intensité ou la déviation d'une aiguille. On fait souvent (à tort) la confusion entre *capteur* et transducteur : le capteur est au minimum constitué d'un transducteur.

Le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable. Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données. Le capteur, lui, en est dépourvu.

Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données. Leur mise en œuvre est du domaine de l'instrumentation. (fr.wikipedia.org/wiki/Capteur)

1. Capteurs actifs

Les « **capteurs actifs** » sont ceux qui produisent leur propre énergie pour éclairer la cible. Le capteur émet un rayonnement dirigé vers la cible observée, puis il capte et mesure le rayonnement réfléchi par la cible. Il offre donc l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs sont utilisés pour examiner les longueurs d'onde qui ne sont pas produites par le soleil, par exemple les hyperfréquences, ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est éclairée. Ils doivent cependant produire une quantité considérable d'énergie pour bien éclairer une cible.

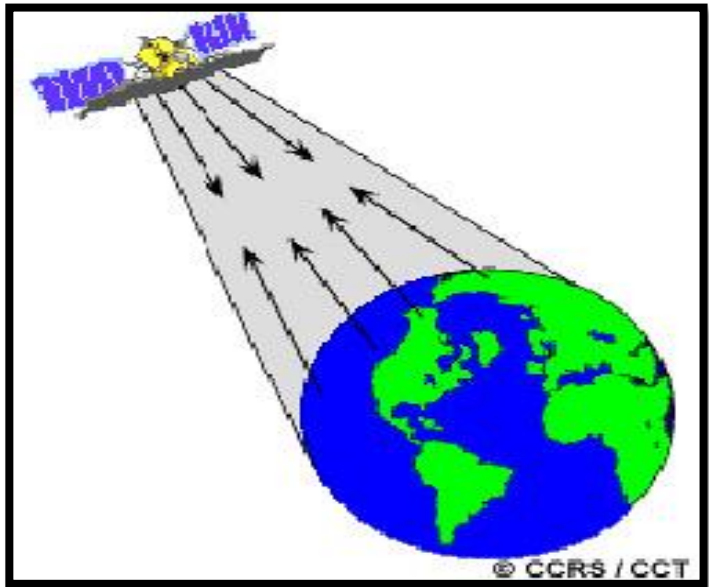


Figure 7 : capteur actifs. (CCT)

Le fluoromètre laser et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.

2. Capteurs passifs

Le soleil constitue une source d'énergie très pratique pour la télédétection. L'énergie du soleil est soit réfléchi, comme dans la partie visible des longueurs d'onde, ou absorbée puis retransmise, comme dans la portion infrarouge thermique des longueurs d'onde. On appelle « **capteurs passifs** » les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie naturellement disponible. Les capteurs passifs peuvent servir à détecter l'énergie uniquement lorsqu'elle est disponible naturellement. L'énergie réfléchi ne peut donc être perçue que lorsque le Soleil éclaire la Terre. L'énergie réfléchi dégagée par le Soleil n'est pas disponible pendant la nuit. Par contre, pourvu qu'elle soit suffisante, l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être enregistrée le jour ou la nuit.

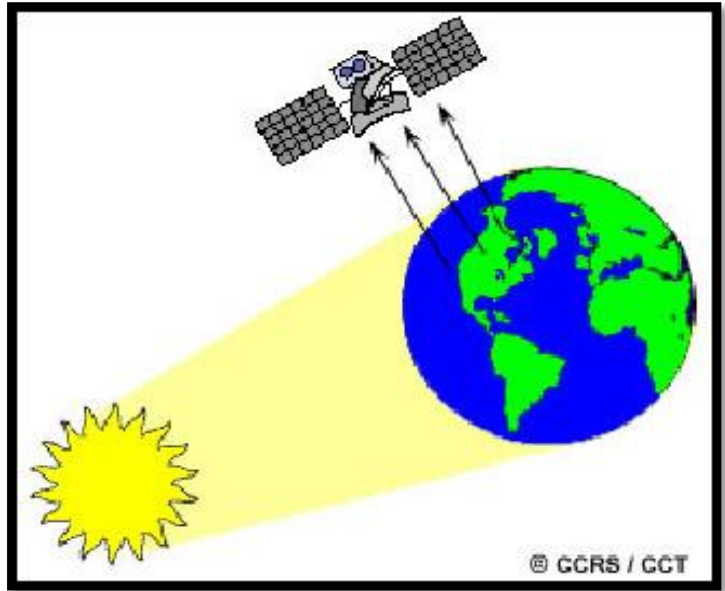


Figure 8 : capteurs passifs. (CCT)

IV. L'image satellitaire :

Les images satellitaires, ou images de télédétection sont des images prises à partir d'un capteur à bord d'un satellite qui orbite autour de la Terre.

Les images satellitaires ressemblent en de nombreux points à des photos, et pourtant ce ne sont pas des photos et ce ne sont pas non plus des cartes. Mais en quoi les images satellite sont-elles différentes de photos ordinaires ? Lorsqu'on prend une photo, on voit le monde sur cette photo comme on le voit avec nos yeux, dans les mêmes couleurs. Un appareil photo regarde en effet la Terre de la même manière que nos yeux, il est 'sensible' à la portion de lumière qu'on appelle 'la lumière visible'. UN satellite regarde la terre d'une toute autre manière. Il n'a pas d'appareil photo à bord, mais des instruments qui sont 'sensibles' à la lumière visible, mais aussi à d'autres parties du 'spectre électromagnétique' comme l'infrarouge, l'ultraviolet ou les microondes. Ces instruments (scanners) balayent la surface de la Terre et enregistrent des mesures de 'lumière' qui sont ensuite utilisées par des programmes informatiques pour créer des images sous forme de matrice ou de tableau dans les cases sont dites pixels. La taille de ce pixel est dite résolution spatiale. (<http://eoedu.belspo.be/fr/profs/beobase-fr2.pdf>).

1. Résolution :

La figure 9 montre une image de Marrakech dont on voit clairement l'aéroport international encadré en rouge. :



Figure9 : Aéroport international de Marrakech (image Landsat TM 2007).

Suite à un agrandissement 6 x la portion d'image entourée par un carré rouge sur la figure 9, se transforme en image de la figure 10 suivante :



Figure10 : représentation des pixels dans une image satellitaire.

On remarque sur cette image l'apparition de petits carrés dite pixel, ce qui semble peu naturel. Ces. Le mot '*pixel*' provient d'une contraction des termes anglais 'Picture' et 'élément' c'est-à-dire 'élément de l'image'. Un pixel est donc un point de l'image. Un tel point représente le plus petit détail encore 'visible' pour le satellite. Chaque carré a une teinte grisée ou une couleur. Il n'y a pas de différence visible au sein d'un même carré, même si on 'zooème' de très loin. La taille du pixel change d'un

capteur à un autre. en effet, un pixel dans une image Spot couvre une zone de 10m x 10m, alors qu'un pixel d'une image Landsat couvre une zone de 30m x 30m. Ceci veut dire qu'on peut déjà distinguer un objet de 100 m² sur l'image Spot P, alors que sur l'image Landsat TM, on ne distingue un élément qu'à partir de 900 m². Autrement dit : Spot P a une résolution de 10 m et Landsat TM une résolution de 30 m. En fonction de l'altitude à laquelle se trouve le satellite et du type de capteur qui est à son bord, la résolution des images fournies par les satellites commerciaux peut aller de 70 cm à plusieurs km (satellites météorologiques).

Nous allons maintenant voir quelle est la taille réelle de la zone que nous voyons sur l'image Landsat TM. Lorsque l'on connaît la résolution d'une image et son nombre de pixels, il est possible de déterminer la taille de la zone couverte par l'image. Via un programme de traitement d'images, il est possible de connaître le nombre de pixels d'une image.

2. Capteur utilisés :

Nous avons utilisés deux types d'images satellites à haute résolution spatial issues des capteurs Landsat TM (Thematic Mapper) et OLI (*Operational Land Imager*). Chaque capteur a ses propres caractéristiques (orbite, résolution spatiale et temporelle et bande spectrale..).

Le capteur Thematic Mapper(TM) observe dans 7 bandes spectrales en lumière visible et infrarouge avec une résolution spatiale de 30 mètres (120 mètres sur la bande 6), une Bande Spectrale désigne une partie du spectre électromagnétique (intervalle de longueur d'onde) que laisse passer un filtre standard. Une bande spectrale est ainsi déterminée par son profil de transmission, c'est-à-dire la fraction de l'intensité lumineuse transmise pour une longueur d'onde donnée. Un ensemble de filtres de bandes spectrales différentes, et couvrant généralement, la partie "visible" du spectre électromagnétique. Le capteur TM du satellite américain Landsat a pu capter des parties de sol vues par une petite fenêtre qui ne permet de voir que les rayons du soleil qui correspond à cette partie du spectre étudiée. Ceci dit, chaque bande spectrale qui a été captée par le capteur TM voit la terre à sa façon et donne alors une image différente des autres. L'appellation Thématique Mapper provient de la capacité de ce capteur à fournir des données qu'on peut traiter et analyser à fin d'obtenir des cartes thématiques(agriculture, hydrologie...).

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 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 :

n° 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 - 0,453µm ● 0.45 – 0.52 µm 	30 m	<input type="checkbox"/> 16Bits <input type="checkbox"/> 8Bits
2	<ul style="list-style-type: none"> □ Bleu □ Vert 	<ul style="list-style-type: none"> ● 0,450 - 0,515µm ● 0.52 – 0.60 µm 	30 m	
3	<ul style="list-style-type: none"> □ Vert □ Rouge 	<ul style="list-style-type: none"> ● 0,525 - 0,600µm ● 0.63 – 0.69 µm 	30 m	
4	<ul style="list-style-type: none"> □ Rouge □ Infrarougeproche1 	<ul style="list-style-type: none"> ● 0,630 - 0,680µm ● 0.76 – 0.90 µm 	30 m	
5	<ul style="list-style-type: none"> □ Infra rouge proche □ Infrarougeproche2 	<ul style="list-style-type: none"> ● 0,845 - 0,885µm ● 1.55 – 1.75 µm 	30 m	
6	<ul style="list-style-type: none"> □ Infra rouge moyen1 □ Infra rouge thermique 	<ul style="list-style-type: none"> ● 1,560 - 1,660µm ● 10.4 – 12.50 µm 	30 m	
7	<ul style="list-style-type: none"> □ Infra rouge moyen2 □ Infra rouge moyen 	<ul style="list-style-type: none"> ● 2,100 - 2,300µm ● 2.08 – 2.35 µm 	30 m	
8	<ul style="list-style-type: none"> ● Panchromatique 	<ul style="list-style-type: none"> ● 0,500 - 0,680µm 	15 m	
9	<ul style="list-style-type: none"> ● Cirrus 	<ul style="list-style-type: none"> ● 1,360 - 1,390µm 	30 m	

TAB2 :d'équivalence entre les bandes du capteur TM(en noir) et OLI(en rouge) de Landsat. El Halim, M. (2015).

3. Le choix des dates des images :

Nous avons choisis les images Landsat selon leurs disponibilités dans le site web (www.glovis.usgs.gov), 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 à fin 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.

Métadonnées	Date 1	Date 2	Date 3
Landsat Scène Identifier	LT52020381995172 MPS00	LT5202038200717 3MPS00	LC82020382016166L GN00
Capteur	Landsat 5 TM	Landsat 5 TM	Landsat 8 OLI
Date d'acquisition	1995-06-21	2007/06/22	2016-06-14
Jour/Nuit	Jour	Jour	Jour
Start time	10:32:19.94 631	10:54:28.69181	11:03:33.3981 333
Stop time	10:32:46.55 925	10:54:55.30469	11:04:05.3984 505
Qualité d'acquisition	9	9	9
Qualité des bandes	9	9	9
Couverture nuageuse	0%	0%	0,02%
Sun Elevation	57.35917444	67.35860209	68.82435510
Sun Azimuth	95.68926962	105.58404961	108.05169336
Scène Centre Latitude	31.74953 (31°44'58"N)	31.74924 (31°44'57"N)	31.74222 (31°44'31"N)
Scène Centre longitude	-7.87295 (7°52'22"W)	-7.85387 (7°51'13"W)	-7.84877 (7°50'55"W)
Output Format	GEOTIFF	GEOTIFF	GEOTIFF
Projection des Cartes	UTM	UTM	UTM
Datum	WGS84	WGS84	WGS84

Ellipsoïde	WGS84	WGS84	WGS84
UTM zone	29	29	29
Orientation	NORTH_UP	NORTH_UP	NORTH_UP

TAB 3 : Les principales métadonnées des images Landsat utilisées (www.glovis.usgs.gov)

4. Méthodologie :

Pour l'extraction de l'information nécessaire pour la réalisation des objectifs fixés pour ce travail plusieurs méthodes de traitement numérique, ont été utilisées, à savoir La classification, les indices spectraux et l'ACP.

V. Classification :

Les approches automatiques de production de cartes d'occupation du sol à partir d'images de télédétection sont souvent basées sur des méthodes de classification d'images. La classification pixel par pixel utilise l'information spectrale contenue dans les valeurs d'une ou de plusieurs bandes spectrales pour classer chaque pixel individuellement en lui assignant une classe particulière (par exemple : eau, forêt, etc.). La "nouvelle" image qui représente la classification est composée d'une mosaïque de pixels qui appartiennent chacun à une classe particulière.

Cette classification peut être :

- ✚ **Supervisée** : on utilise des zones pour lesquelles on connaît l'occupation du sol comme des exemples pour un apprentissage, la classification est effectuée à partir des caractéristiques statistiques de ces zones connues et identifiées sur l'image.
- ✚ **Non supervisée** : on regroupe les pixels de l'image par similarité et on identifie les classes ensuite.

La classification supervisée fournit souvent de meilleurs résultats, mais elle nécessite des données de référence pour l'apprentissage (campagnes sur le terrain, photo-interprétation, image très haute résolution, etc.).(Idbraim, S. (2009))

VI. Les indices spectraux:

1. L'indice de végétation par différence normalisée ou indice de Tucker (NDVI).

L'indice de végétation est un outil utilisé dans les domaines environnementaux et pour l'agriculture en particulier, car il fournit des informations sur la verdure et l'état de la végétation. La formule de calcul du NDVI est :

$$NDVI = (\text{proche IR} - \text{rouge}) / (\text{proche IR} + \text{rouge})$$

La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement. Le NDVI conserve une valeur constante quelle que 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.

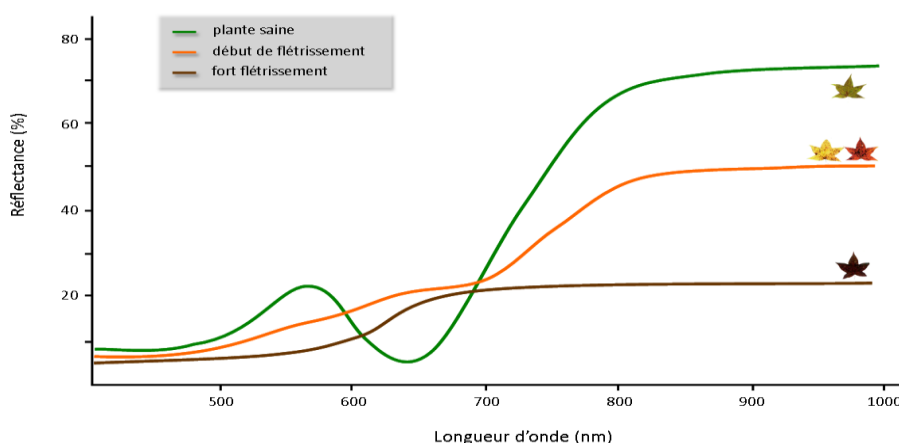


Figure 11 : Variations de la signature spectrale en fonction de l'état physiologique de la végétation
(<http://e-cours.univ-paris1.fr>)

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, 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.

Une végétation en bonne santé absorbe la plupart de la lumière visible qui l'intercepte et réfléchit une partie importante de la lumière PIR. Une végétation en mauvaise santé ou clairsemée réfléchit plus de lumière visible et moins de PIR (Fig. 11).

La puissance de cet indice réside dans sa capacité de distinguer même entre les espèces végétales, car il est directement lié à l'activité photosynthétique des plantes et donc à la capacité d'absorption énergétique du couvert végétal. Il agit comme indicateur de la biomasse chlorophyllienne des plantes.

2. L'indice de l'eau par différence normalisée NDWI (Gao, 1996)

Suivant le même principe que le NDVI, l'indice de teneur en eau par différence normalisée (Normalised Difference Water Index, NDWI) utilise la bande proche infrarouge et une bande de l'infrarouge à courtes longueurs d'onde (short-wave-infrared, SWIR) (Gao, 1996). Au lieu de la bande rouge, où la réflectance est affectée par la chlorophylle, le NDWI utilise une bande de l'infrarouge à courtes longueurs d'onde (entre 1500 et 1750 nm), où l'eau possède un pic d'absorption. La bande du proche infrarouge (Near-infrared, NIR) est la même que celle du NDVI car l'eau n'absorbe pas dans cette région du spectre électromagnétique.

L'indice NDWI se calcule selon l'équation suivante :

$$NDWI = (PIR - SWIR) / (PIR + SWIR).$$

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, cela permet d'estimer l'évolution des superficies des eaux en comparant une série des images satellitaires à différentes périodes du temps (Fig.12). Le NDWI se calcule selon l'équation suivante :

$$NDWI = (bande Verte - Proche infrarouge) / (bande Verte + Proche infrarouge).$$

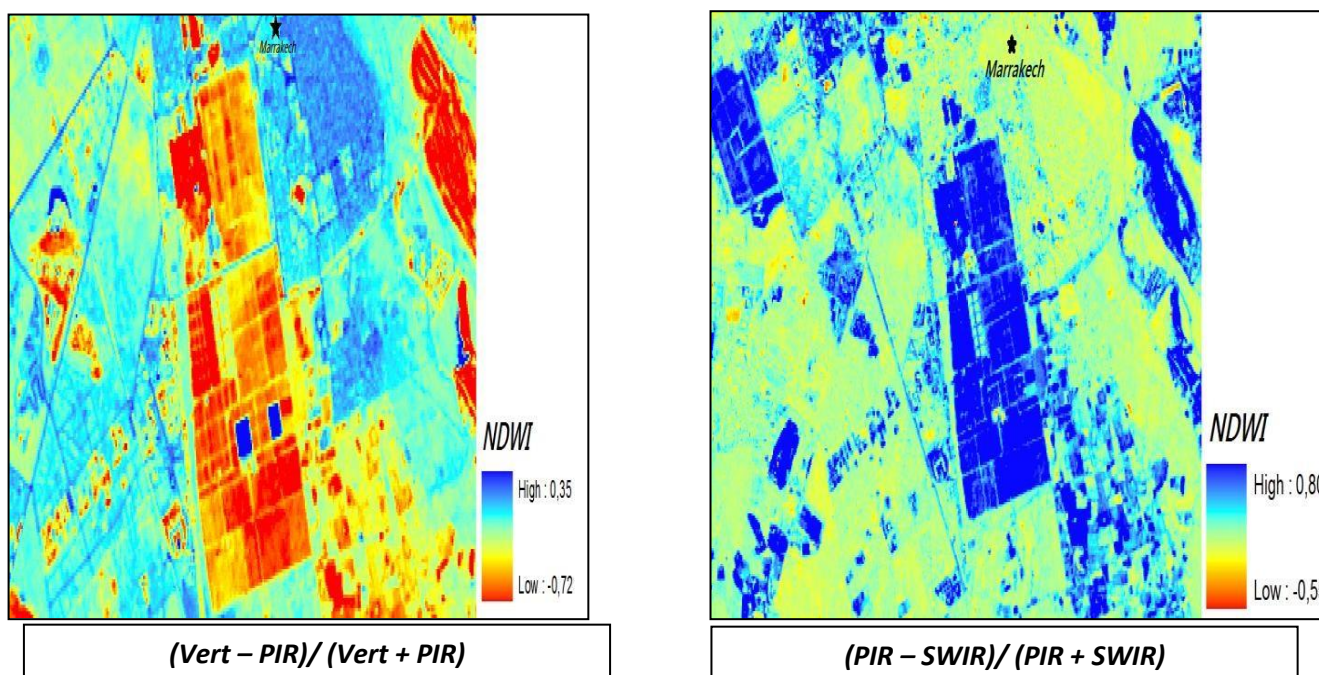


Figure 12 : Les deux types d'indice de l'eau par différence normalisée(NDWI) montrant l'humidité des plantes en bleu adroite, est les surfaces d'eau en bleu à gauche

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

Les valeurs de NDSI varient selon la signature spectrale de la bande infrarouge et le proche infrarouge moyen. Les couleurs claires (valeurs positives) symbolisent les sols et les couleurs sombres (valeurs négatives) symbolisent autres éléments du paysage (Fig. 13). Il est utile dans la cartographie des entités pédologiques, mais aussi certains éléments de constructions environnantes. La formule pour calculer cet indice est :

$$NDSI = (SWIR - PIR) / (SWIR + PIR).$$

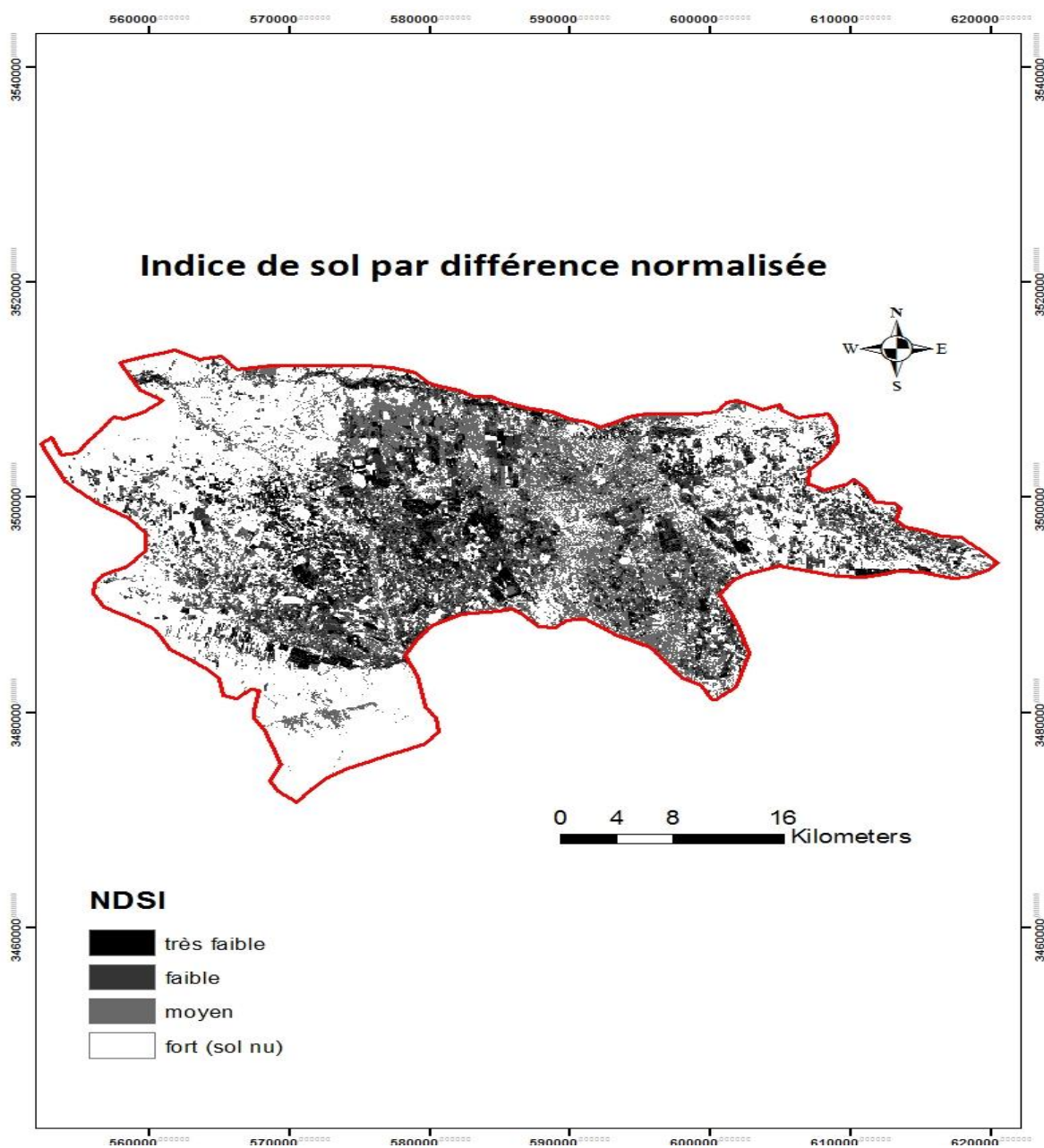


Figure 13 : exemple d'indice par différence normalisé NDSI.

Troisième chapitre :
Résultats, discussions et interprétations

Introduction :

L'image satellite à travers les bandes qui la compose regroupe pas mal d'informations, elle nécessite des traitements spéciaux pour les extraire, La différenciation des paysages repose sur la dissimilitude de leur signature spectrale. Il convient de contrôler la distribution des données pour une éventuelle rectification. De même qu'il convient de rapporter à un même ordre de grandeur les dynamiques respectives de différents fichiers-images avant de les comparer. Ces transformations facultatives ne modifient pas l'information mais elles sont de nature à améliorer les visualisations et la pertinence des traitements ultérieurs.

L'**ArcGis** (10.1) et l'**Erdas Imagine** (9.2) sont des logiciels utilisés pour calculer les indices spectraux (NDVI, NDBI, NDWI, NDSI), et pour faire des classifications supervisées afin de détecter le changement dans l'espace et dans le temps.

Cette classification comme on a cité précédemment est basée sur l'association des pixels qui exprimes les mêmes entités dans la réalité. 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 pour pouvoir les comparer, et pour tracter le maximum d'informations telles que la dynamique spatio-temporelle du couvert végétal, d'urbanisme, d'eau, et de sol nu.

I. Variabilité spatio-temporelle des différents indices.

1. Evolution spatio-temporelle de la végétation dans la ville Marrakech (NDVI).

Les propriétés optiques (réflectance, absorption, transmittance) des feuilles dépendent fortement de la longueur d'onde et cela leur confère un spectre de réflectance très caractéristique. Les facteurs influençant la réflectance sont de deux ordres. Les premiers sont liés à la composition chimique intrinsèque des parties végétales et influencent sur tout le spectre dans le Rouge. Les deuxièmes sont attachés aux aspects structuraux du feuillage et des feuilles et influencent surtout dans le proche infrarouge (Rondeaux, 1996).

En général, l'indice de végétation prend des valeurs qui varient entre -1 et 1. Mais dans notre cas l'indice de végétation par différence normalisée ne dépasse pas 0.78 en 1995 comme valeur maximale (figure 14).

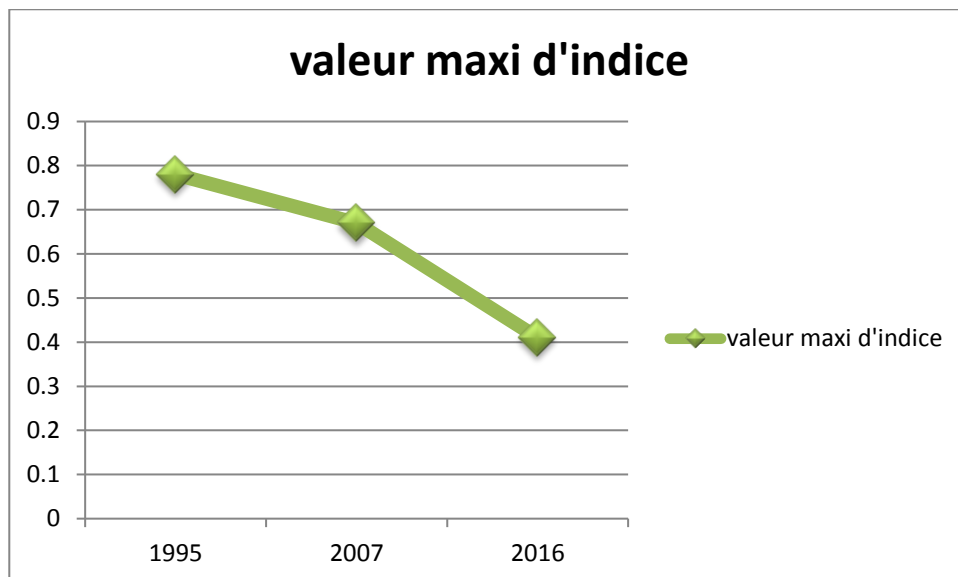


Figure 14 : variation des valeurs de l'indice de végétation NDVI (1995, 2007 et 2016)

La superficie recouverte par la végétation dans la ville de Marrakech a connu une variabilité très importante, durant ces vingt ans passés. La végétation a progressé d'une superficie d'environ 97,38Km² (3,65% de la superficie de la ville). En 1995, la surface végétale a été à l'entourage de 351.47Km², puis elle a connu une légère réduction estimée de 267.42 Km² (70.86%) en 2007. Cependant, en 2016 on remarque une dilatation plus au moins importante avec une superficie de 412.85 km² et un taux de changement de 10.37%.

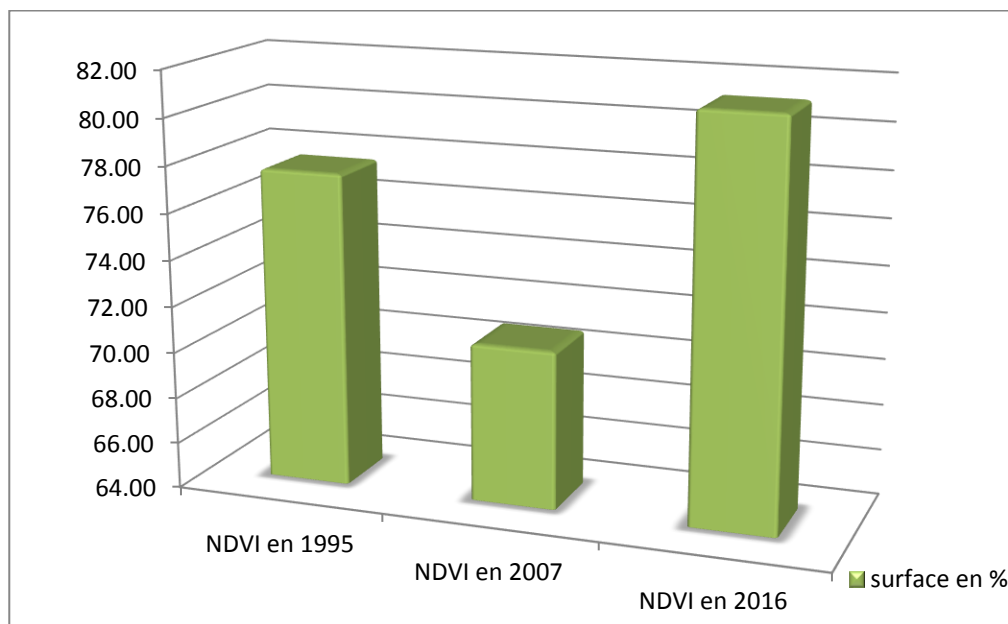


Figure 15 : évolution des surfaces végétales dans la ville de Marrakech entre 1995, 2007 et 2016.

	Nombre de pixels	Surface en Km ²	Surface en %par rapport à la surface de la ville	Taux de changement
NDVI en 1995	390521	351,47	77,58	-
NDVI en 2007	297138	267,42	70,86	6,72%(84,05Km ² de moins)
NDVI en 2016	458717	412,85	81,23	10,37%(145,43Km ² de plus)

TAB 4 : Evolution spatio-temporelle de l'NDVI dans la ville de Marrakech.

La dynamique végétale observée durant cette période, peut s'expliquer par plusieurs facteurs dont les plus importantes sont :

- ✚ les conditions climatiques (période de sécheresse) jouent un rôle primordial dans la variation des surfaces occupées par la végétation, et surtout les pluies qui influencent immédiatement l'accroissement ou la régression de cette surface végétale dans une zone donnée.
- ✚ Evolution de l'urbanisme et l'exploitation des terres, pour la croissance démographique et couvrir les besoins de la population qui dépasse 1.3 million.
- ✚ La stratégie de Maroc vert qui a commencé depuis 2008 qui sert à intervenir dans le développement des espaces déjà existé et de crée des nouvelles zones a valeur agricole.

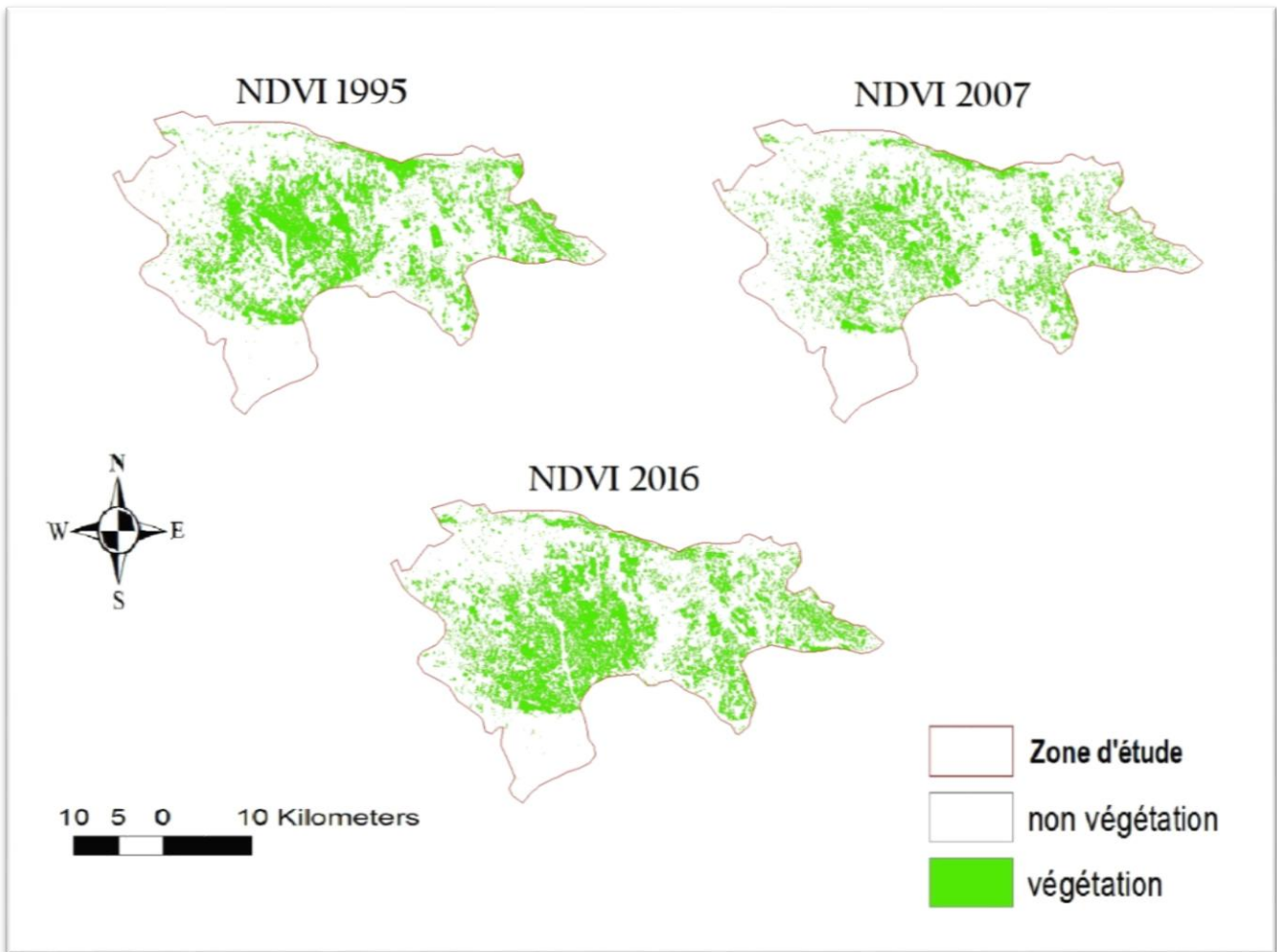


Figure16 : Cartes multi-temporelles d'indice de végétation (NDVI) de la ville Marrakech.

2. Evolution spatio-temporelle du sol dans la ville du Marrakech (NDSI).

Comme il est présenté dans la figure17 la variation de l'indice du sol (superficie du sol) par différence normalisée NDSI d'une date à l'autre entre les années 1995 et 2016. Les valeurs de cet indice sont comprises entre -1 et 1 en générale, mais dans notre cas l'indice du sol par différence normalisée ne dépasse pas 0.58 En 1995 comme valeur maximale.

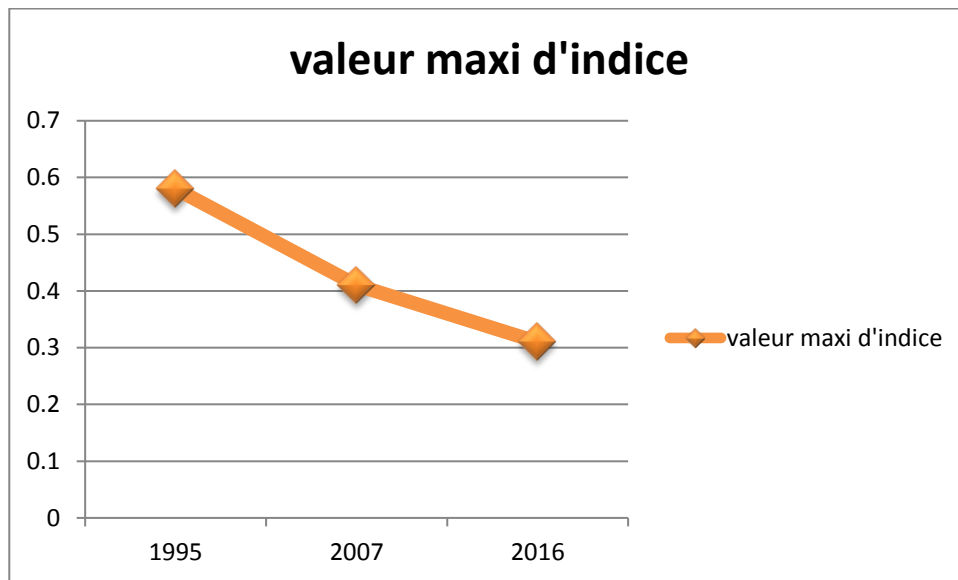


Figure 17 : variation des valeurs de l'indice du sol NDSI.

Selon les résultats présentées dans le diagramme ci-dessus (figure 17), on constate une diminution au niveau de la surface occupée par le sol nu pendant l'intervalle de temps étudié [1995-2016], le taux de changement est estimé de 29,92% de diminution de la superficie total de Marrakech.

Le sol a occupé environ de 1062.82 Km² en 1995, cette surface a connu une diminution de 188.89 Km² en 2007, cette perte de surface a continué jusqu'à 2016 avec une régression estimée de 220.13 Km² entre [2007-2016]. (Tableau 5, figure18).

	Nombre de pixels)	Surface en Km ²	surface en %	Taux de changement
NDSI en 1995	1180914	1062,82	77,75	-
NDSI en 2007	971032	873,93	63,93	-13,82%(188,89Km²)
NDSI en 2016	726448	653,80	47,83	-16,1%(220,13Km²)

TAB 5 : Evolution spatio-temporelle de NDSI dans la ville de Marrakech.

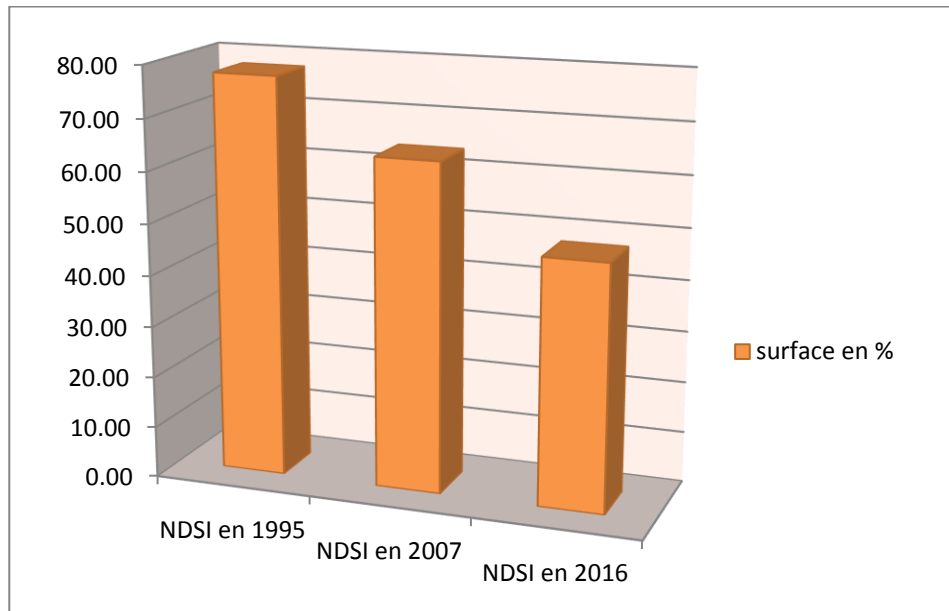


Figure 18 : évolution des surfaces du sol dans la ville de Marrakech.

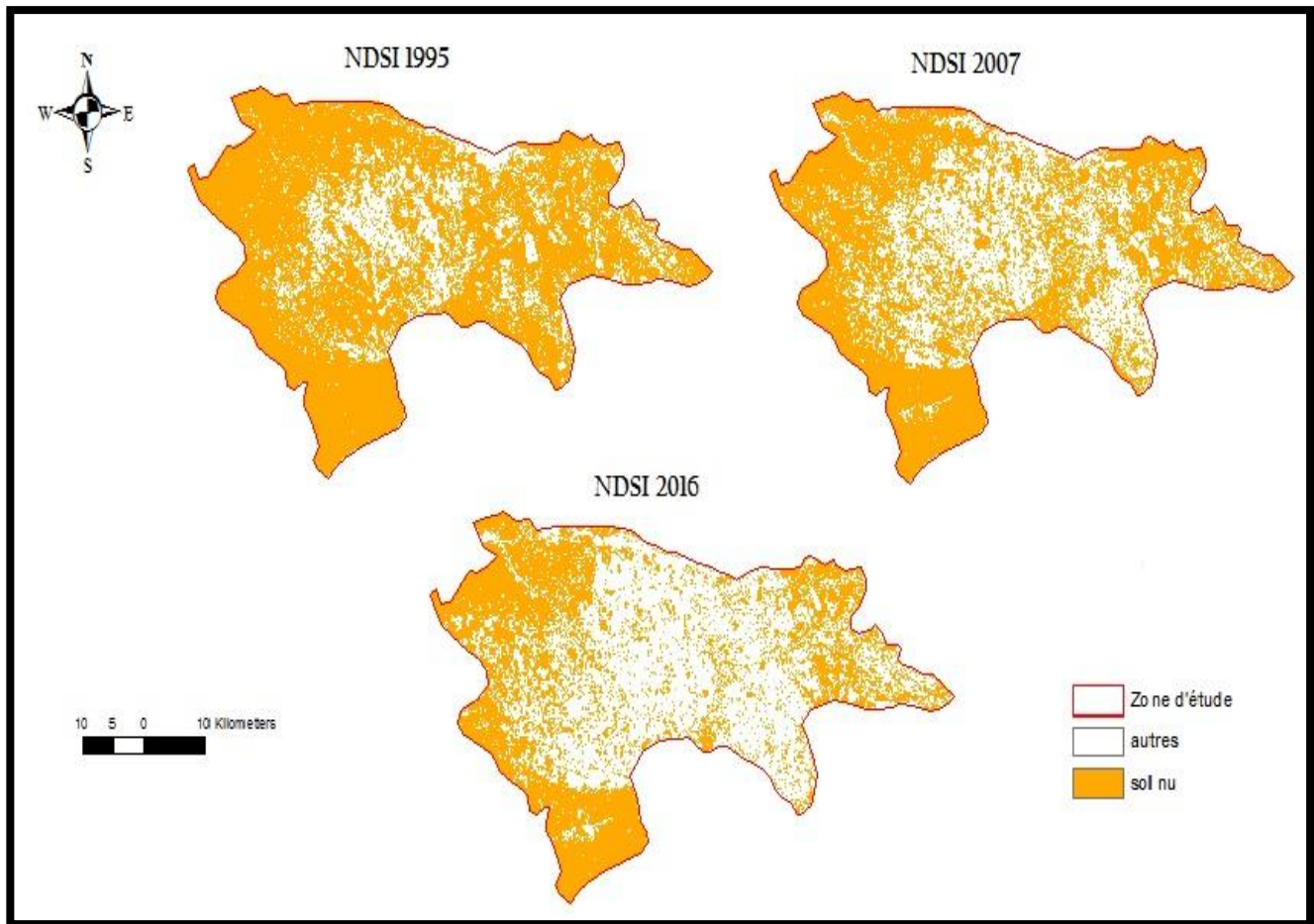


Figure 19 : Carte d'indice du sol (NDSI) dans la ville de Marrakech (1995-2016).

Ce dynamisme de la variation de la superficie du sol peut être expliqué par certains paramètres qui interviennent sur la nature et la qualité pédologique on cite :

- ✚ Le climat (une diversité des sols existe tout au dépend de climat).
- ✚ La nature de couvert végétal.
- ✚ L'état de végétation (morte ou vivante qui a un rôle dans la structure et la texture du sol).
- ✚ La nature de roche mère.
- ✚ Le temps d'altération.
- ✚ L'urbanisme et les infrastructures en général.

Dans le cas particulier de la ville de Marrakech on va essayer de faire une corrélation des du sol de la végétation pour voir la relation entre les deux thèmes.

➤ Corrélation entre l'indice de végétation et celui du sol :

Après l'enregistrement des rayonnements réfléchis par les surfaces terrestres par des capteurs (Landsat TM et OLI), et par la suite la détection des caractéristiques physiques et biologiques de l'élément qui recouvre cette surface. En remarque bien, que le développement de surfaces recouvertes par la végétation implique une régression des surfaces occupées par le sol. Cela explique que la surface végétale en 1995 a été d'environ 351,47km² contre 1062,82Km² pour le sol dans la même année, tandis qu'en 2016 la surface recouverte par la végétation est à l'entourage de 412,85Km² contre 653,80Km² pour le sol dans la même année.

L'indice du sol NDSI est en corrélation étroite avec NDVI (Fig.20), les sols réfléchissent mieux dans l'infrarouge moyen (MIR) et contrairement à la végétation il absorbe une grande partie de proche infrarouge (PIR). Ces deux entités sont toujours liées les unes aux autres, ce qui explique la variation synchronisée entre eux. Selon la figure 20, on constate que la surface du sol nu diminue en faveur d'augmentation du couvert végétal depuis 2007 jusqu'à 2016.

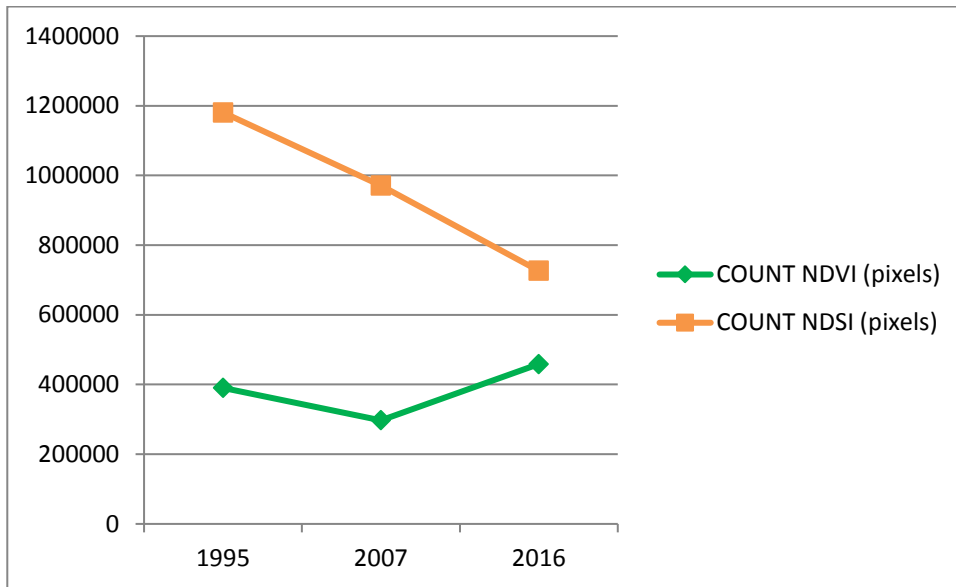


Figure 20 : Variation des indices NDSI et NDVI dans la ville de Marrakech.

3. Evaluation spatio-temporelle des surfaces d'eau dans la ville (NDWI).

L'indice de l'eau par différence normalisée NDWI est définie comme étant un rapport entre la différence des réflectances du vert et du proche infra-rouge et la somme de ces réflectances. Cet indice nous permettra de suivre l'évolution spatio-temporelle des surfaces d'eau dans la ville de Marrakech. NDWI calculé à partir des images Landsat (Résolution spatiale 30 m) calibrées et corrigées des effets atmosphériques prend ses valeurs entre 1 et -1. Cet indice à une valeur maximal de (0.66) dans l'année 2007, comme il varie d'un temps à l'autre et d'un point à un autre durant cette périodes étudiée (1995-2016). (Figure 21,22).

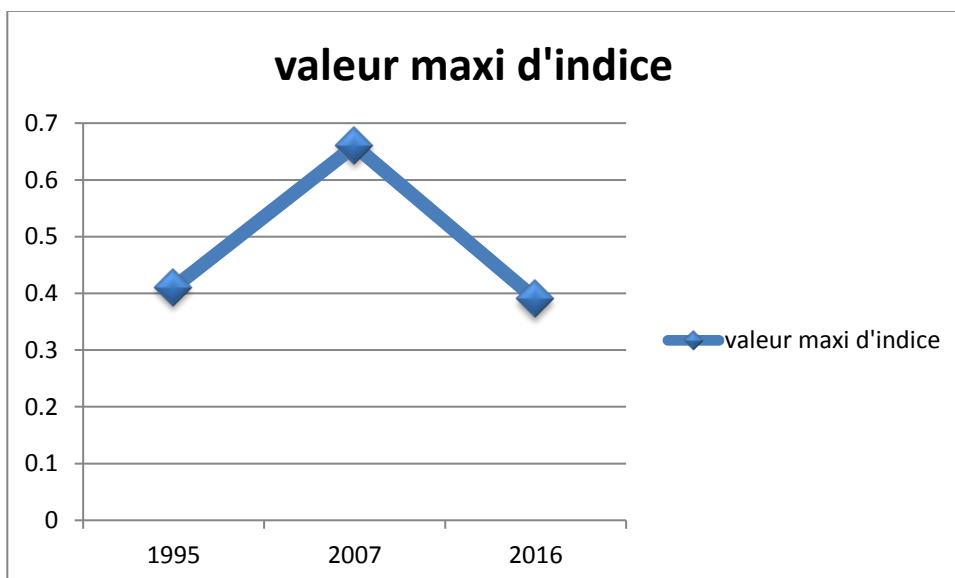


Figure21 : Variation de l'indice de l'eau dans la ville de Marrakech (1995-2016).

Dans le tableau (6) et la figure (22) présentés ci-dessous, qui montrent les variations de surfaces d'eau dans la ville entre les années 1995 et 2016, on remarque que la superficie d'eau en 1995 est de

1,86Km². Puis elle se réduit jusqu'à 0,93Km² dans l'année 2007, après cette date la surface commence à augmenter de 1.58 % (0.49 Km²) en 2016.

	COUNT (pixels)	Surface en Km ²	surface en %	Taux de changement
NDWI en 1995	2065	1,86	5,95	-
NDWI en 2007	1031	0,93	2,97	2,98%(0,93Km ²)
NDWI en 2016	1580	1,42	4,55	1,58%(0,49Km ²)

Tab 6 : variation de la superficie de l'eau dans la ville de Marrakech (1995-2016).

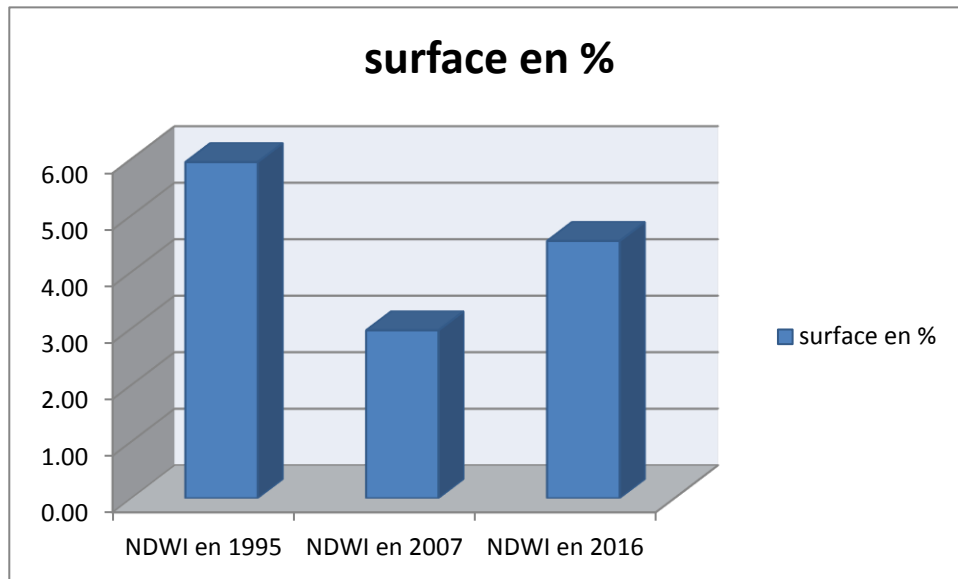


Figure22 : diagramme de la variation des superficies de l'eau dans la ville de Marrakech (1995-2016).

Cette variation de la superficie de l'eau qui change durant ces vingt ans peut être expliquée par l'intervention de plusieurs facteurs notamment, l'accroissement démographique qui entraîne une forte exploitation des ressources et les changements climatiques surtout l'augmentation de la température.

En 2007 on remarque une forte diminution de la surface des eaux. Cela s'explique par le changement climatique et l'augmentation de la température qu'est connu durant les années d'avant 2007.

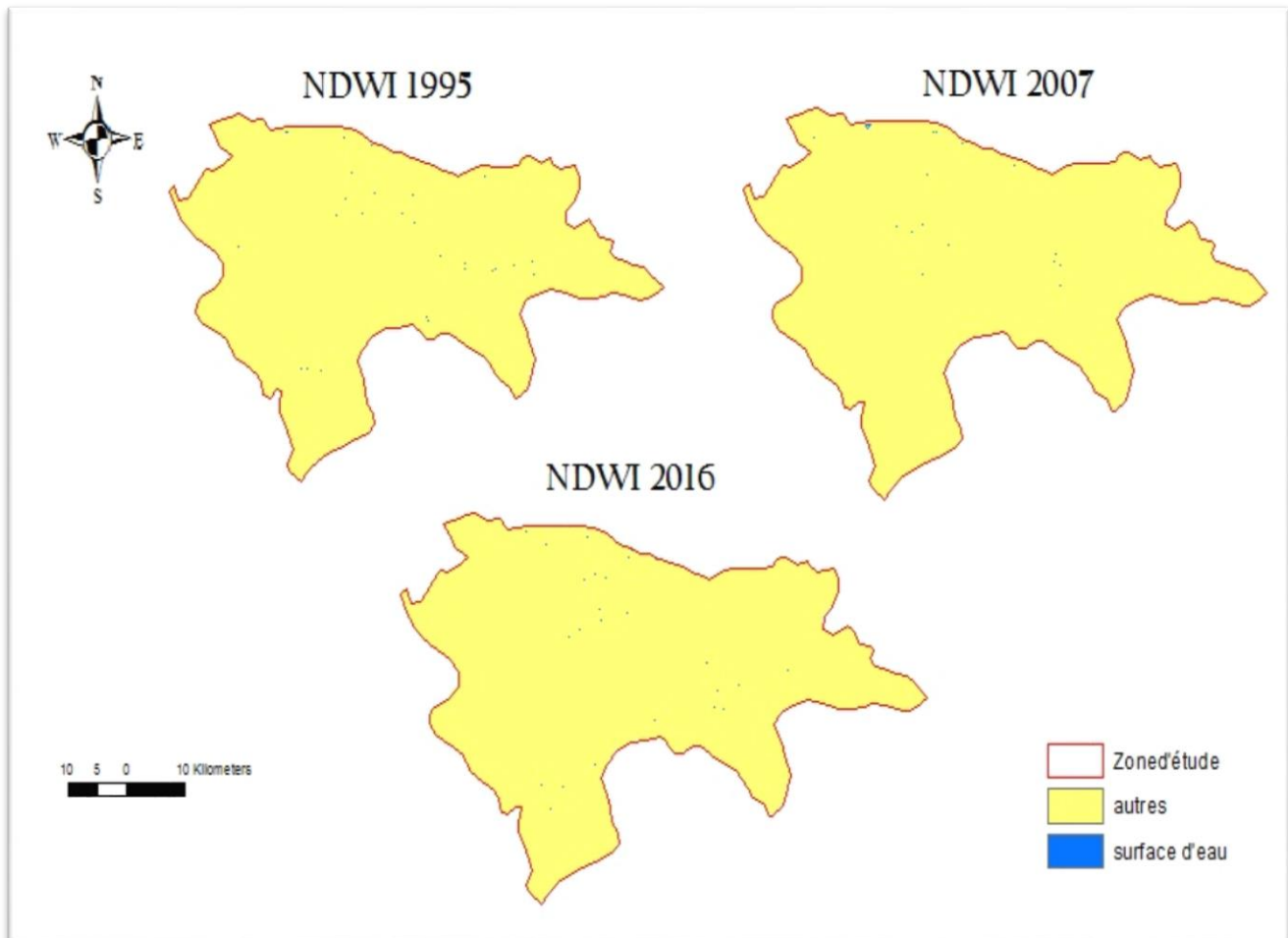


Figure23 : Carte d'indice de l'eau (NDWI) dans la ville de Marrakech (1995-2016).

4. Evolution spatio-temporelle de l'indice de l'urbanisme dans la ville de Marrakech (NDBI).

Le phénomène urbain est à l'heure actuelle un enjeu important à l'échelle planétaire. C'est pourquoi, il est absolument nécessaire de se doter de moyens conceptuels et méthodologiques qui peuvent en améliorer la compréhension et le suivi. Cet effort est important bien que les règles de production, les modes d'implantation et d'évolution, les caractéristiques de peuplement (solde naturel, migration, etc.) ainsi que les formes d'urbanisation ne soient pas précisément comparables. La modélisation urbaine a facilité ces investigations en favorisant une conceptualisation du système urbain selon deux approches complémentaires : l'une analytique, utilisée pour la description et la mise en relation des composantes urbaines ; l'autre synthétique répondant au besoin d'articulation de ces composantes au sein d'une même unité territoriale plus ou moins élastique.

Pour la détermination de l'indice de l'urbain, il n'existe pas aucune relation ou formule qui calcule cet indice d'une manière précise et exacte. Mais d'après les recherches effectuées durant la réalisation de cet projet, on a pu à trouver une formule qui détermine l'indice de l'urbanisme mais avec une confusion avec NDWI. Et qui se présente au-dessous sous forme de :

(BANDE 4 – BANDE 1) pour LANDSAT TM ; (BANDE 5 – BANDE 2) pour LANDSAT OLI.

Les calculs réalisés reflètent aussi les surfaces d'eau existante dans la zone d'étude. Donc pour avoir déterminé les surfaces de l'urbain seulement, on va soustraire celles de l'eau après. Le tableau (7) et la figure (24) suivante montrent la variation spatio-temporelle de la superficie de l'urbanisme dans la ville de Marrakech entre 1995 et 2016.

	Surface en Km ²	surface en %	Taux de changement
NDBI 1995	115,74	20,28	-
NDBI 2007	146,12	25,60	+5,32%(30,38Km²)
NDBI 2016	308,90	54,12	+28,52%(162,78Km²)

TAB 7 : variation spatio-temporelle de la superficie de l'urbain de la ville de Marrakech entre 1995 et 2016.

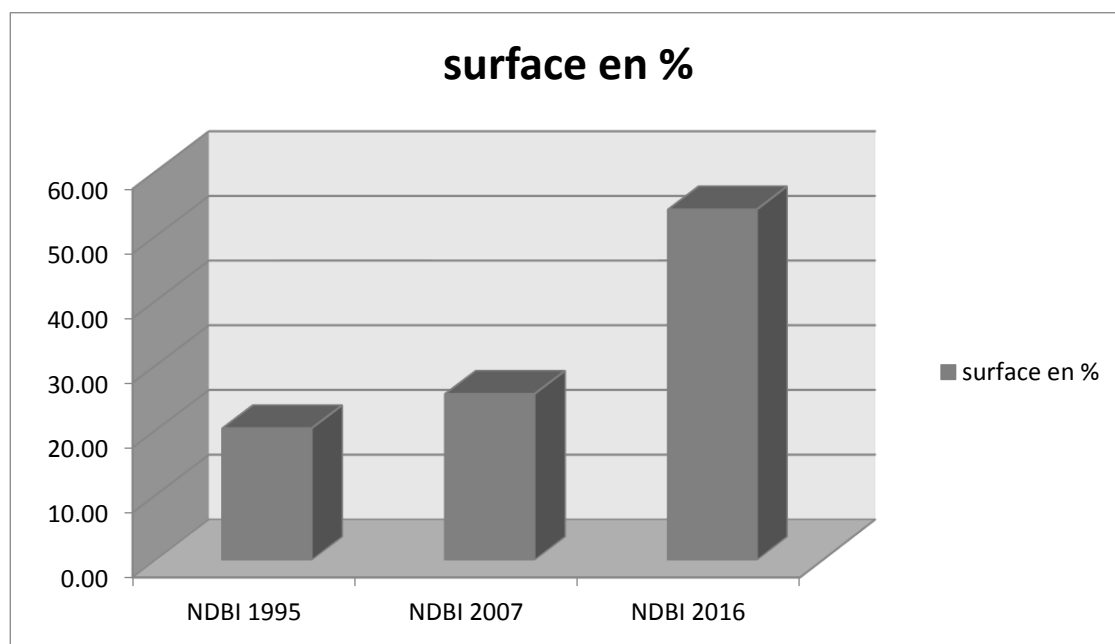


Figure24 : diagramme de l'évolution de la surface de l'urbanisme en % dans la ville de Marrakech (1995-2016).

La superficie recouverte par l'urbain dans la ville de Marrakech a connu une variabilité très importante, durant ces vingt ans passés. L'urbanisme a progressé d'une superficie d'environ 193,16Km² (33.84% de la superficie de la ville).

En 1995, la surface a été de 115.74 Km², puis elle a connu une légère augmentation estimée de 146.12 Km² (5.32%) en 2007. Cependant, en 2016 on remarque une dilatation plus au moins importante avec une superficie de 308.90 km² et un taux de changement de 28.52%.

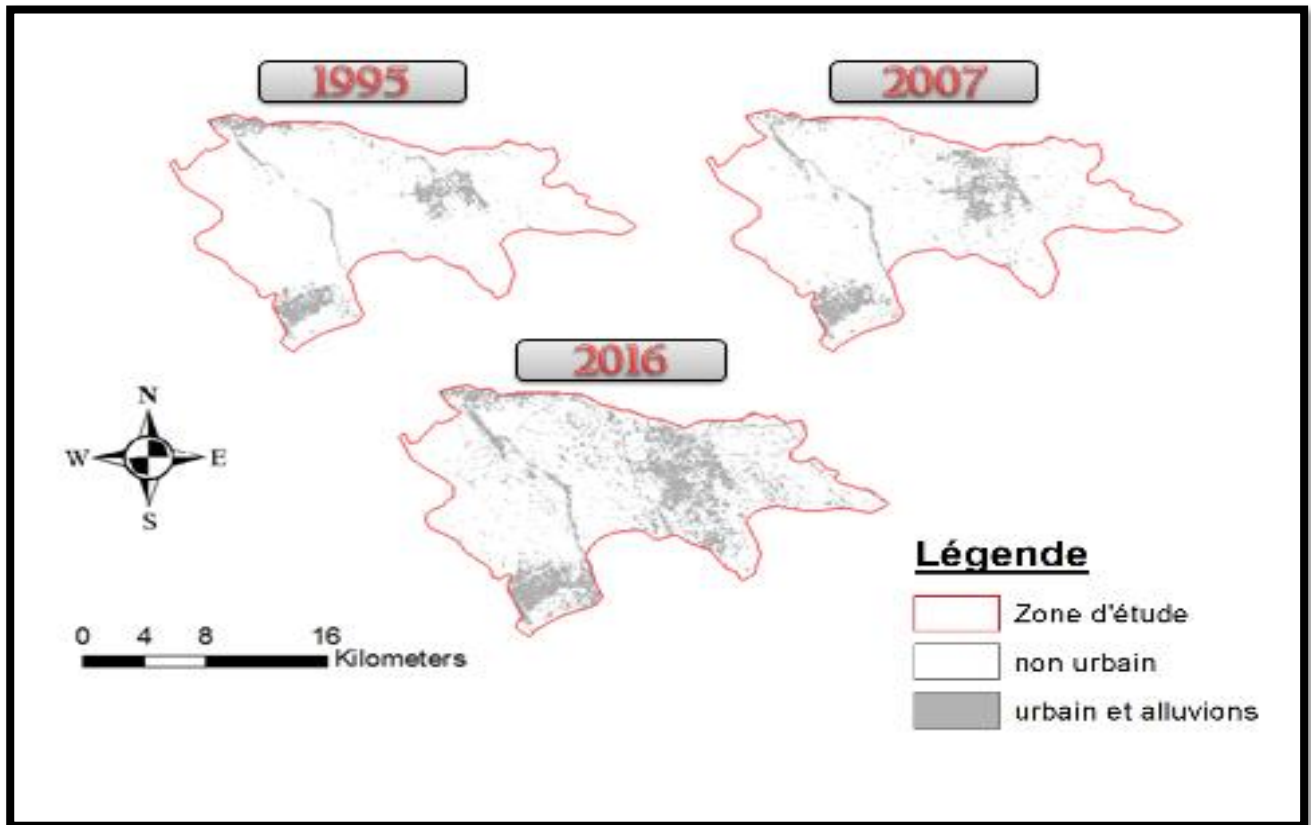


Figure 25 : carte d'indice de l'urbain de la ville de Marrakech entre 1995 et 2016.

D'après la carte de l'indice de l'urbain montrée ci-dessus, on constate que La ville Marrakech a connu une évolution très importante au niveau de la superficie des bâtiments et les infrastructures pendant ces vingt dernières années. Ce dynamisme se montre par un élargissement très vite surtout vers l'ouest et vers le sud avec l'augmentation de la densité de population depuis les années 1990 (Fig.25).

Remarque :

Après les calculs réalisés de l'indice, et l'analyse des résultats et des cartes obtenues. On remarque bien l'existence d'une petite confusion au niveau des bâtiments et les infrastructures détecter avec les alluvions des rivières (oueds) et celles des hauts niveaux détecter (au sud).

Cette confusion apparait tout simplement normale et logique, car les matières de construction des bâtiments et des infrastructures, en plus de tous ce qui relie avec l'urbain sont formées par des alluvions et les autres matières qui sont détecter géologique d'où la même signature spectral.

II. Comparaison de classification supervisées et cartes des indices calculés :

1. Cartes d'occupation du sol :

La carte d'occupation du sol est une carte établie á partir d'une classification supervisée des images satellitaires qui a pour principe de de fournir au logiciel des échantillons de pixels qui représentent les mêmes caractéristiques (réflectance) qui représente une région de référence homogène appelée zone d'apprentissages ou zone d'entraînement.

Pour élaborer la classification, on a d'abord digitalisé des parcelles d'entraînement sur les images pour chaque classe déterminée à priori ceci à base du NDVI, ce qui nous a permet de réaliser une carte des différentes plantations qui existent dans la ville.

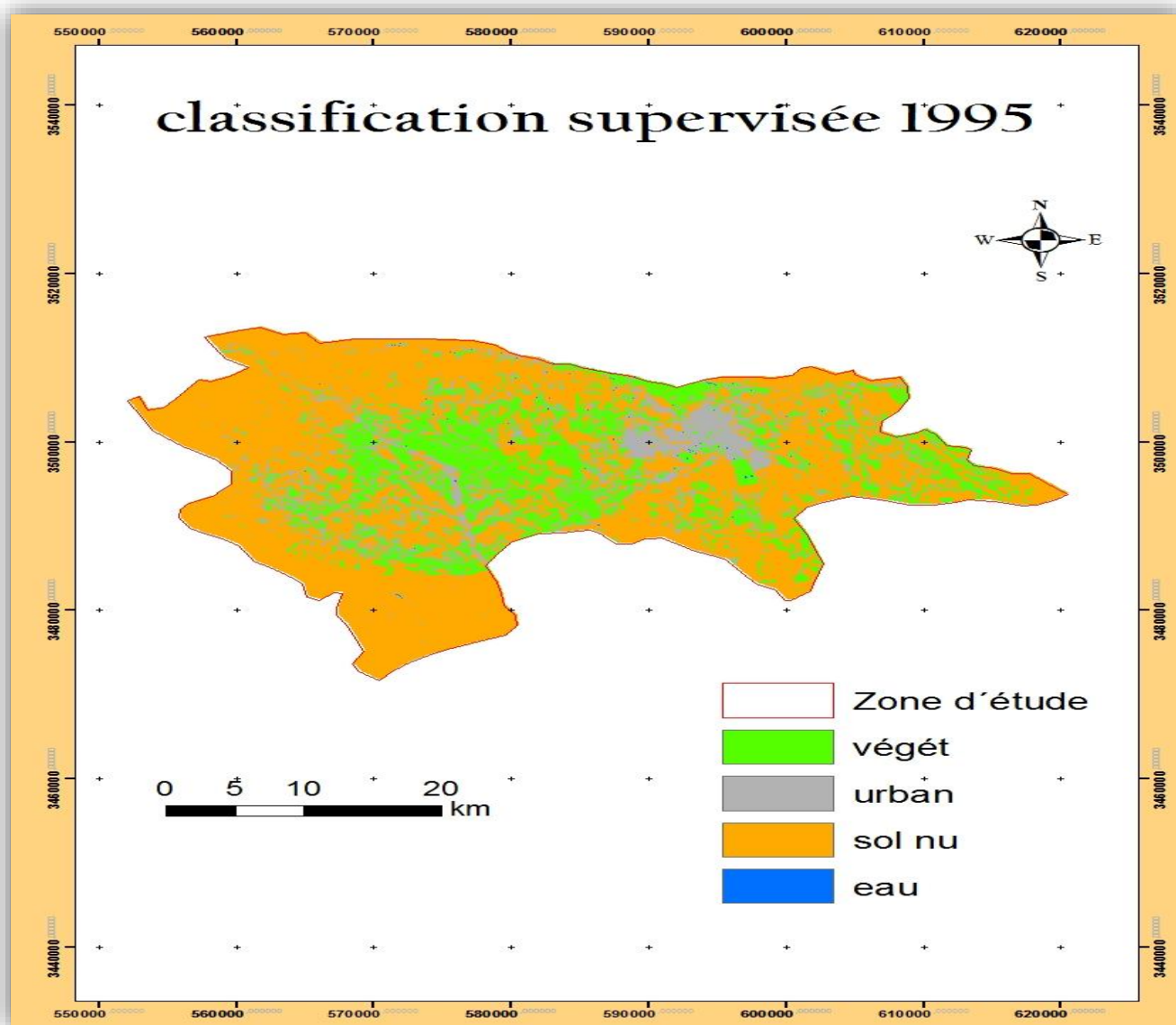


Figure26 : Carte d'occupation du sol issue de l'image Landsat TM 1995.

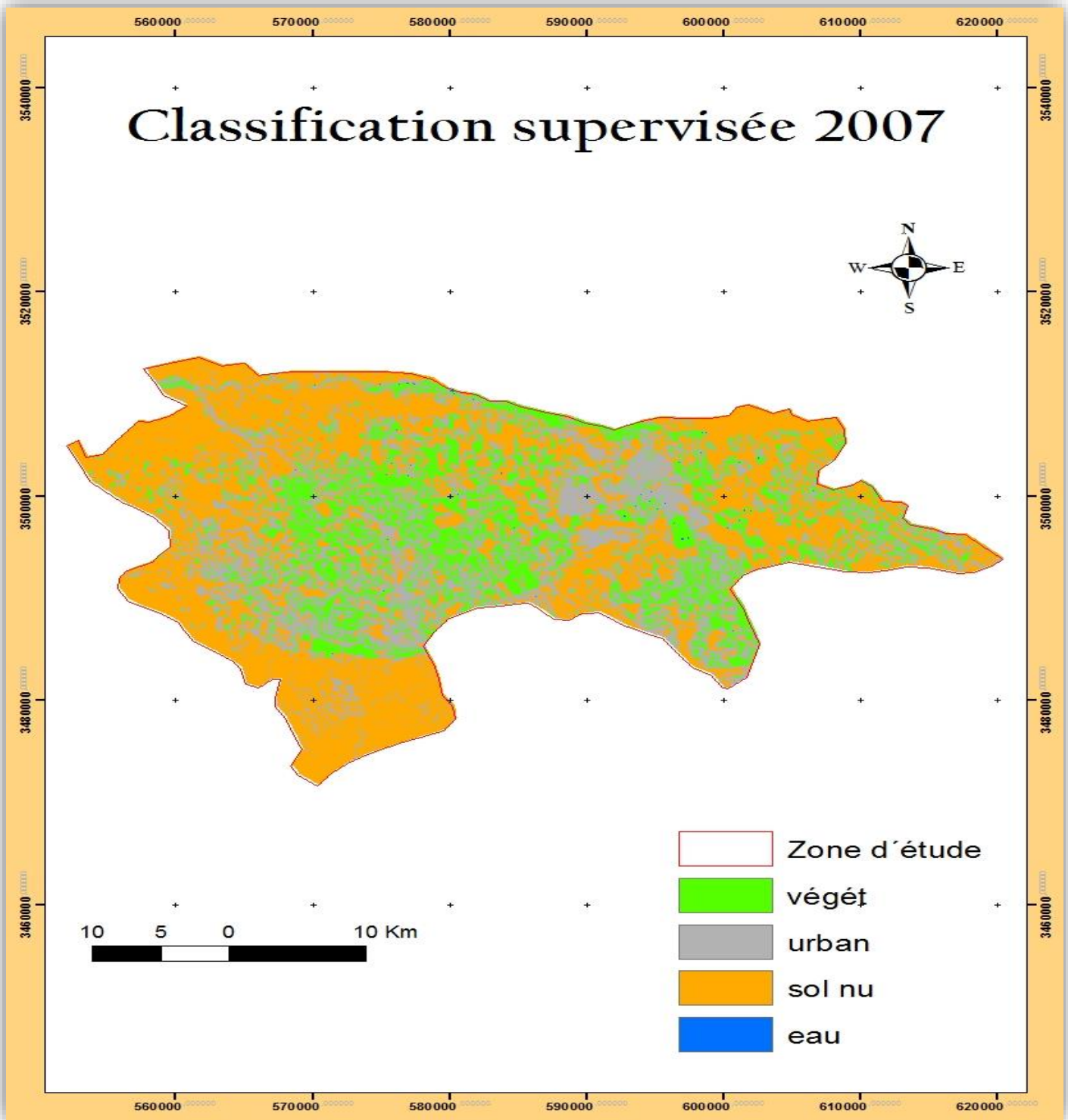


Figure27 : carte d'occupation du sol de la ville de Marrakech 2007 (Landsat TM).

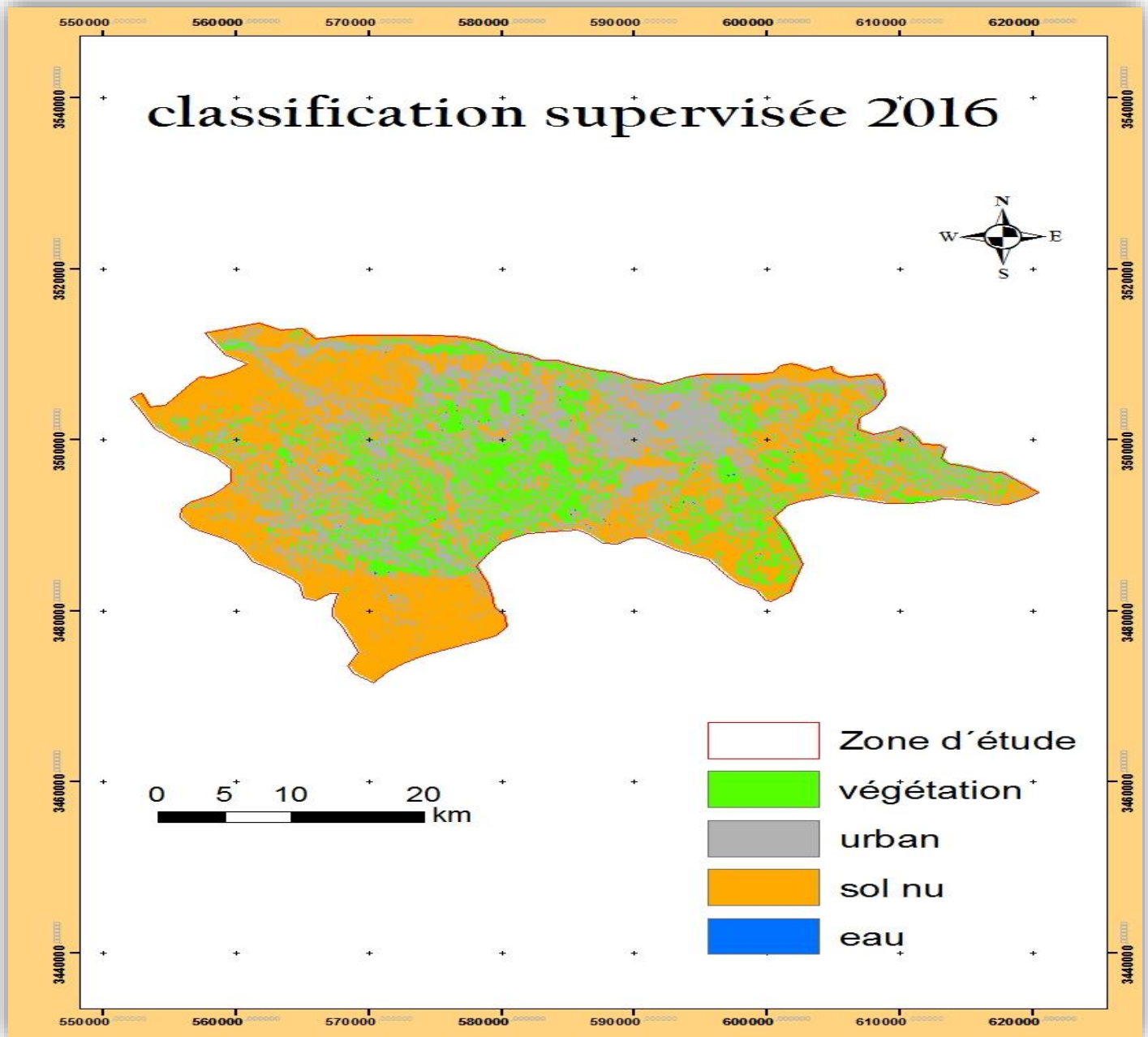


Figure28 : Carte d'occupation du sol de la ville de Marrakech (Landsat OLI 2016).

Ces cartes montrent une relation étroite entre les différentes entités qui la compose, l'augmentation de la surface occupée par la végétation entraîne une diminution de la surface occupé par le sol.

La carte d'occupation du sol sert à nous donner une idée sur la répartition de couvert végétal, du sol nu, d'urbanisme ainsi que les surfaces d'eaux dans la ville de Marrakech entre 1995 et 2016.

	1995	2007	2016
végétation	297,68	269,46	284,68
urbain	188,78	435,88	473,70
sol nu	879,58	661,19	607,97
eau	1,00	0,51	0,69
superficie Totale	1367,04	1367,04	1367,04

Tab8 : variation de la superficie (en km²) des différents éléments de la ville entre 1995 et 2016.

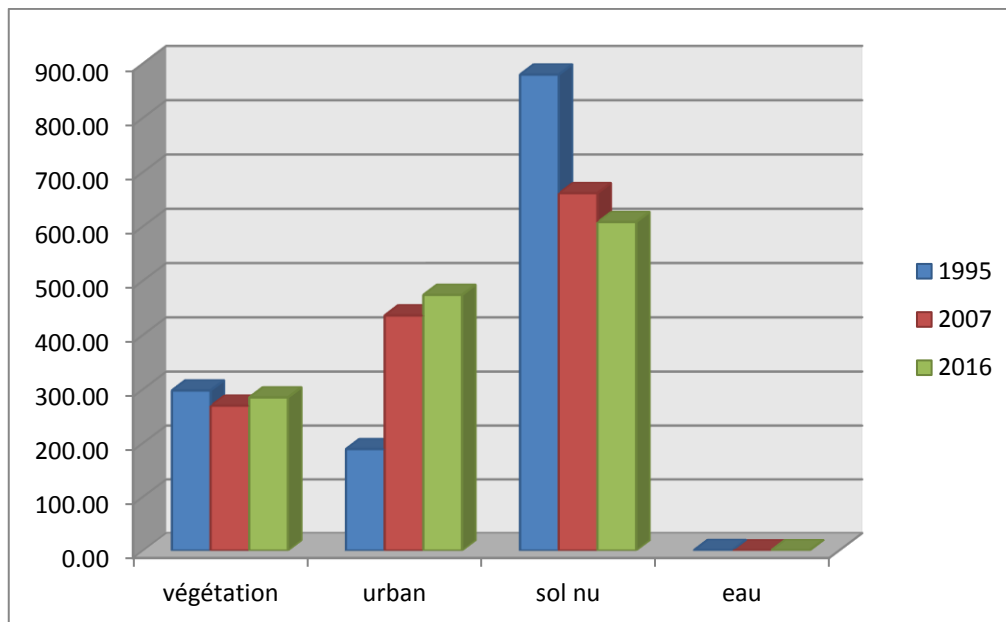


Figure29 : Diagramme d'évolution de la superficie (en km²) du sol de la ville entre 1995 et 2016.

2. Comparaison de la classification supervisée et indices (exemple du sol) :

La production des cartes d'occupation du sol à partir d'une image satellitaire est basée sur des méthodes de classification de l'image. Souvent la plus utilisée est celle de la classification supervisée. Cette méthode s'utilise le plus souvent afin de classifier et créer une carte représentant plusieurs classes. Contrairement à l'indice spectral qui sert toujours à calculer les variations d'une seule classe.

Dans cette partie on va réaliser une comparaison entre ces deux méthodes, on va comparer la superficie calculée d'après les deux méthodes, en prenant les variations du sol nu comme exemple.

<i>superficie calculée du sol en Km²</i>			
	<i>D'après la classification supervisée</i>	<i>D'après l'indice</i>	<i>défférence</i>
1995	<i>879,58</i>	<i>1062,82</i>	<i>183,24</i>
2007	<i>661,19</i>	<i>873,93</i>	<i>212,74</i>
2016	<i>607,97</i>	<i>653,80</i>	<i>45,83</i>
Total	<i>2148,73</i>	<i>2590,55</i>	<i>441,82</i>

TAB 9 : variation de la superficie du sol d'après les deux méthodes de la ville Marrakech.

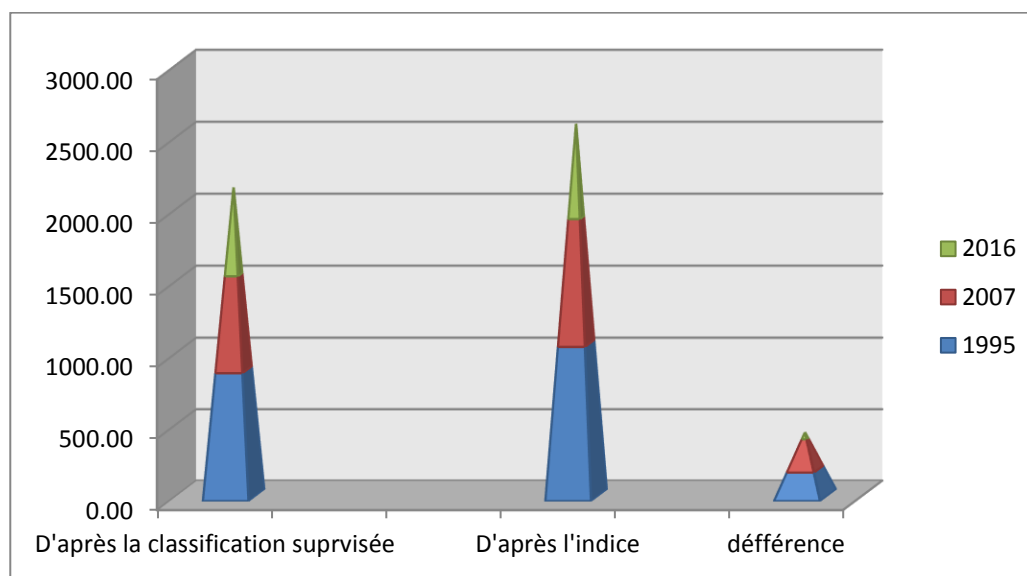


Figure 30 : Diagramme de comparaison de la surface calculée d'après les deux méthodes.

III. Application d'autres traitements.

1. Traitement ACP (Analyse en Composante Principale) :

Suite à la confusion entre les différentes entités étudiées 'ACP (analyse en composante principale) nous permet de faire résoudre ce problème en utilisant les bandes principales d'une image satellitaire qui regroupe l'essentiel des informations.

Une ACP se déroule selon les méthodes statistiques traditionnelles, la particularité pour la télédétection réside dans le très grand nombre de données à traiter (les pixels). L'approche générale consiste à définir, dans l'espace multi spectral, de nouveaux canaux résumant l'information contenue dans l'image. Ce procédé vise à donc maximiser (statistiquement) la quantité d'information (ou variance) des données originales dans un nombre restreint de composantes.

De plus, les données de bandes multi spectrales différentes ont souvent une corrélation très élevée et contiennent de l'information similaire. Les nouveaux canaux découplés apportent ainsi une information nouvelle. Ainsi, si l'on travaille sur les 3 canaux SPOT, on obtient trois composantes

principales ACP1, ACP2, ACP3. Dans la plupart des cas, on trouve alors les ordres de grandeurs suivants.

L'axe 1 est assez proche de la somme des valeurs de comptes numériques pour un même pixel. Cela ressemble à un canal panchromatique. En simplifiant, ce néo canal contient plus des 2/3 de l'information multi spectrale d'origine.

La deuxième composante met généralement en valeur l'opposition entre le visible et l'infra-rouge. Cela ressemble à un indice de végétation dont la formule brute serait du type : $IR - R$. C'est donc sur ce canal que l'on détectera le mieux les divers types de végétation.

L'ACP3 met plutôt en valeur les différences entre les deux canaux du visible.

L'analyse des composantes principales ou d'autres transformations complexes peuvent être utilisées comme techniques de rehaussement visuel pour faciliter l'interprétation ou pour réduire le nombre de bandes qui seront fournies comme données d'entrée à une procédure de classification numérique.

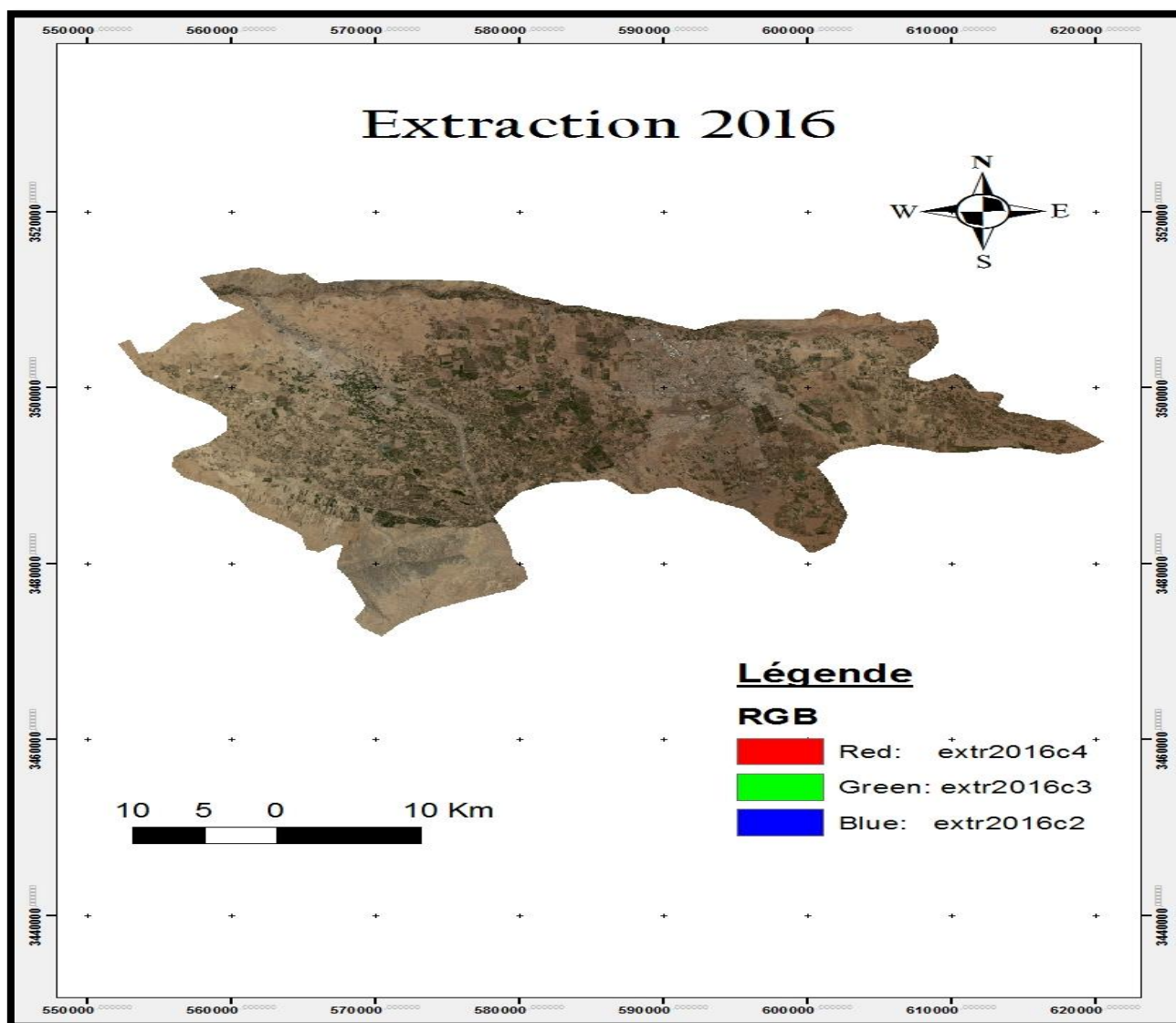


Figure 31 : Image avant traitement ACP de la ville Marrakech (2016).

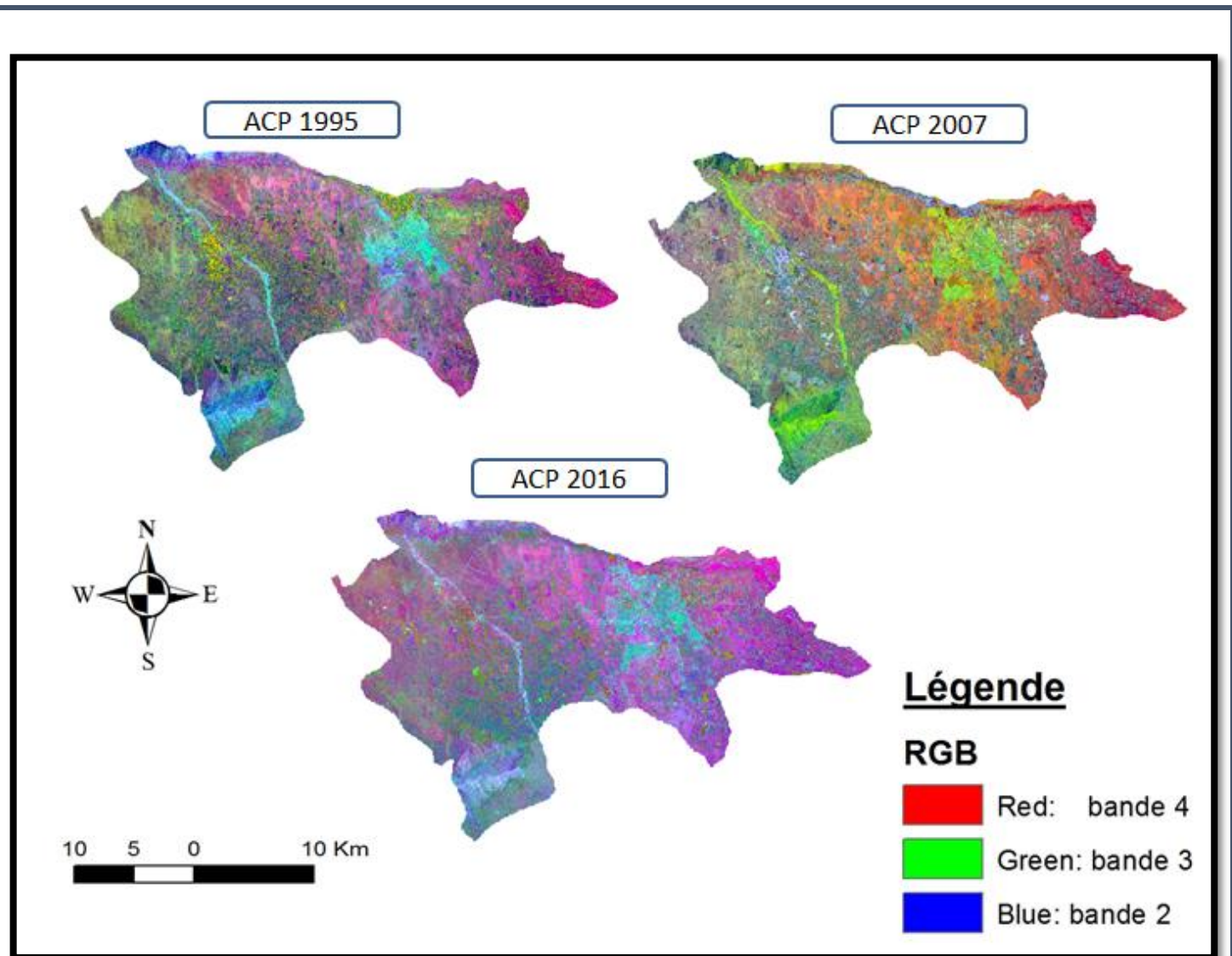


Figure32 : Composé coloré à base des ACP 4, 3,2 dans les différentes périodes de la ville Marrakech (1995-2016).

2. Application de la technique « Change détection » pour l'estimation du changement de la couverture terrestre du Marrakech entre 1995 et 2016 :

Cette technique nous permet de faire visualisé le changement spatio-temporel dans la ville a partir des indices de végétation déjà calculé NDVI1995, NDVI 2007 et NDVI2016 et qui sont soumis à une opération de la soustraction dans la fonction « raster calculator » au niveau de logiciel ArcGis :

$$\text{NDVI 2016} - \text{NDVI 2007} = \text{change detection 2016-2007}$$

$$\text{NDVI 2007} - \text{NDVI 1995} = \text{change detection 2007-1995}$$

Les couleurs dans ces cartes (figure 33, 34,35) par change détection ont les significations suivantes :

- ✚ La couleur verte indique les zones d'extension de la végétation.
- ✚ la couleur rouge indique les zones où le couvert végétal a régressé (disparu).
- ✚ la couleur jaune représente les zones inchangées.

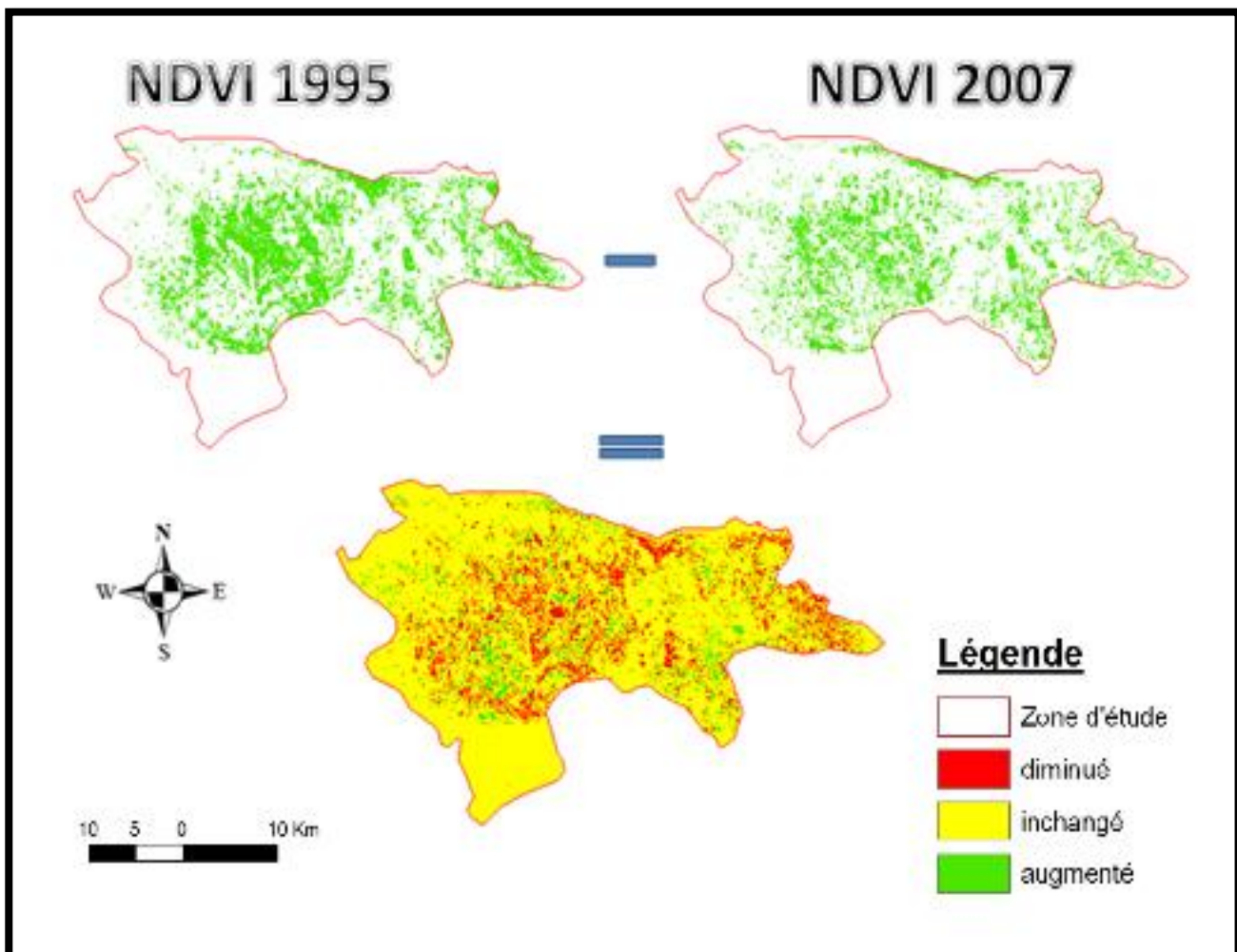


Figure 33 : technique de la détection du changement du couvert végétal de la ville Marrakech (1995-2007).

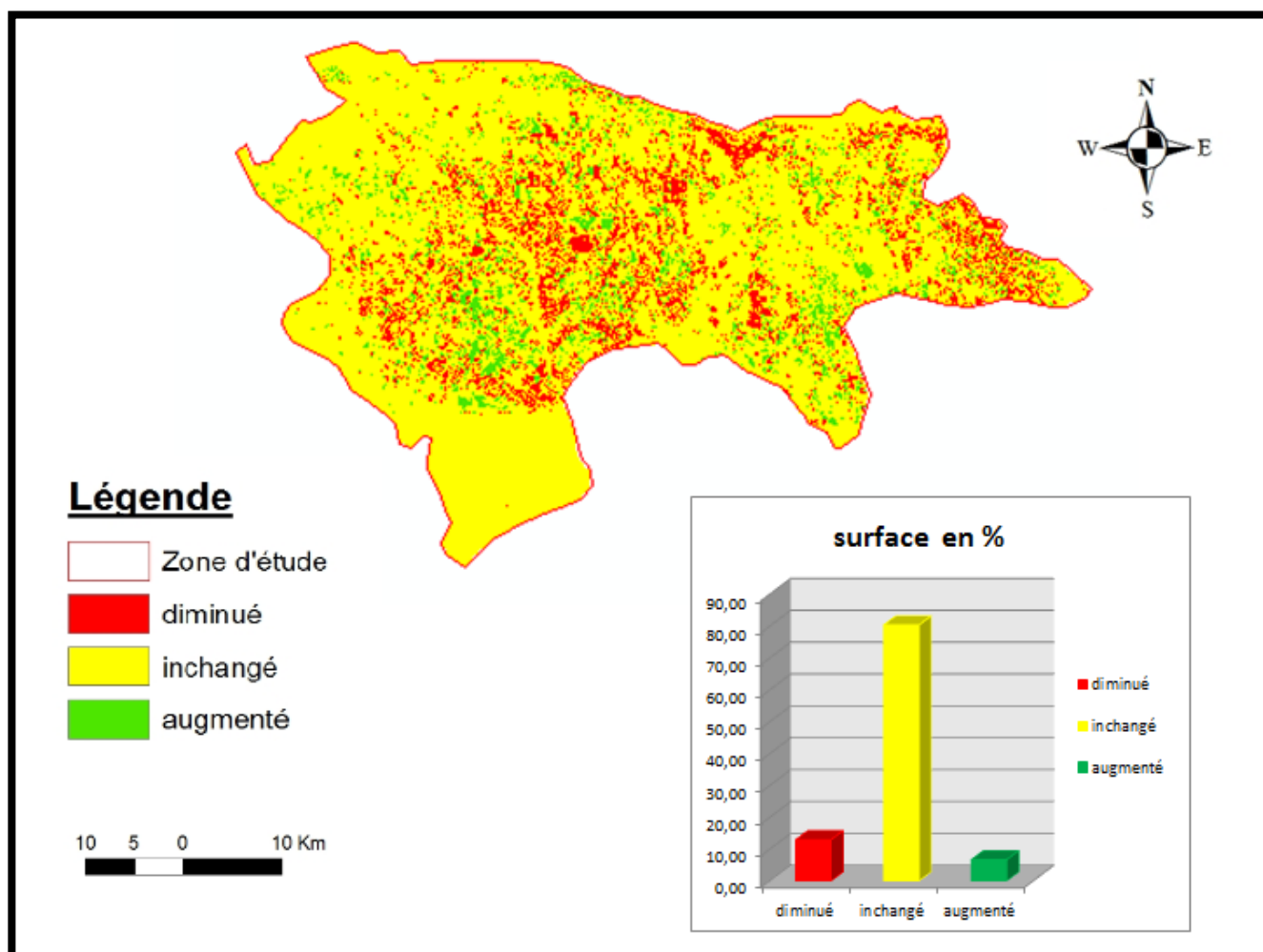


Figure 34 : Carte de la détection du changement du couvert végétal dans la ville Marrakech entre 1995 et 2007 à base du NDVI des images Landsat TM.

A partir de l'analyse de la (figure 34) et le tableau 10 (au-dessous) on constate que dans cette période [1995-2007] la ville a connu un taux de changement de 6.26%, ce changement est une diminution de surface occupé par le couvert végétal en chiffre on parle d'une perte de 116.76 Km², et une augmentation de 6.71% (60.36 Km²).

NDVI 1995-NDVI 2007			
	count (pixels)	count(Km)	superficie en %
Diminué	195937	116,76	12,97
Inchangé	1213013	722,87	80,32
Augmenté	101294	60,36	6,71
Total	1510244	900,00	100,00

TAB 10 : variation de la superficie du couvert végétal d'après la technique (change detection) entre 1995 et 2007 de la ville Marrakech.

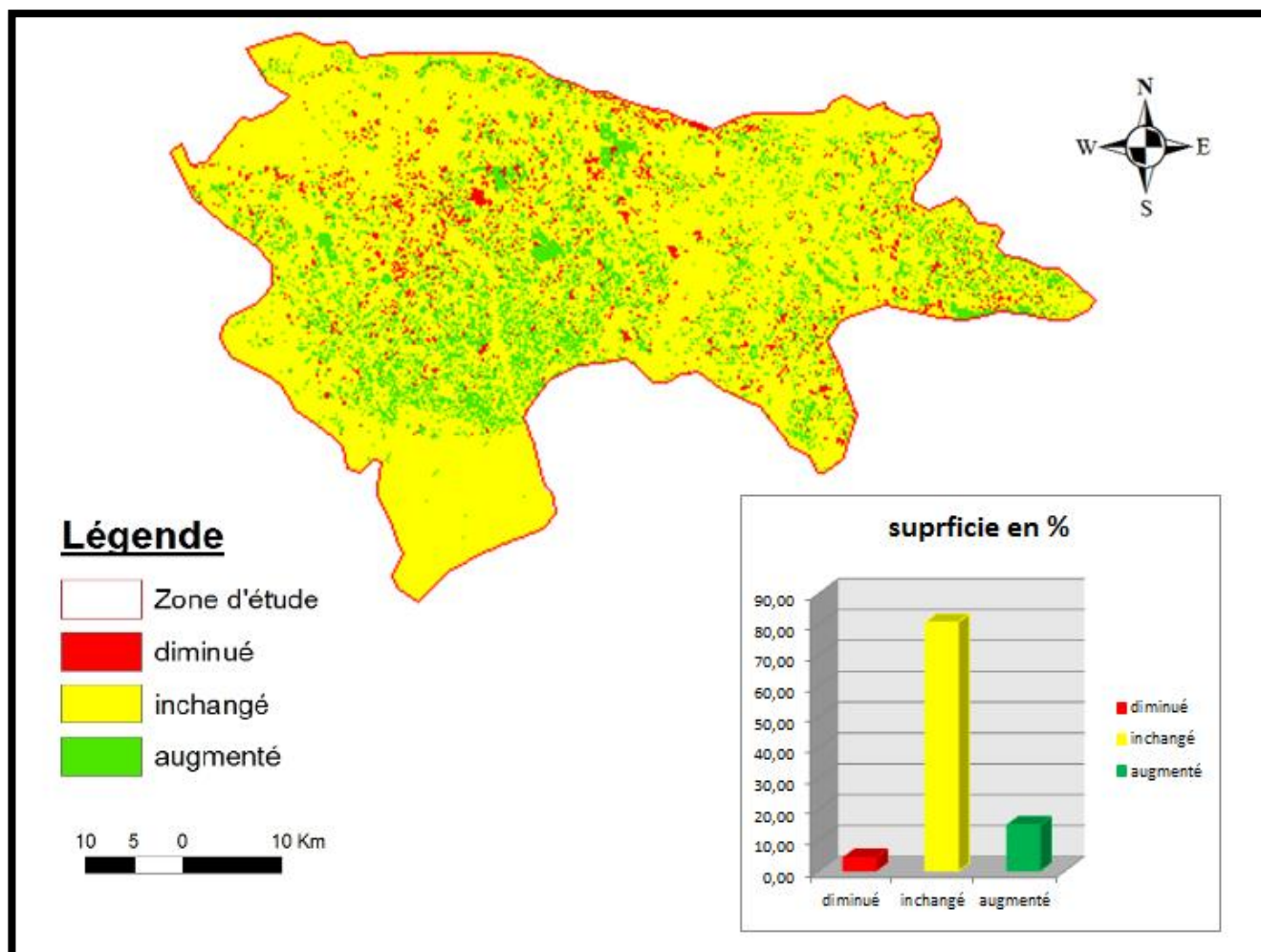


Figure 35 : Carte de la détection du changement du couvert végétal dans la ville Marrakech entre 2007 et 2016 à base du NDVI des images Landsat TM.

Au cours de cette période (entre 2007 et 2016), il n’y a pas un grand changement au niveau de l’extension de la végétation dans la plaine (Fig.35, Tableau 11), on note un taux de changement de 10.64%. Par rapport à la première période [1995-2007] la perte de surface végétal n’était pas remarquable (93.23Km²).

NDVI 2016-NDVI 2007			
	count (pixels)	count(Km)	superficie en %
Diminué	66201	39,23	4,36
Inchangé	1224949	725,81	80,65
Augmenté	227780	134,96	15,00
Total	1518930	900,00	100,00

TAB 11 : variation de la superficie du couvert végétal d’après la technique (change detection) entre 2007 et 2016 de la ville Marrakech.

Conclusion :

D'après les résultats du travail on peut dire que la télédétection est un outil privilégié, Elle permet l'acquisition de données régulièrement distribuées dans l'espace et le temps pour caractériser les surfaces continentales en termes d'occupation du sol. Ces données peuvent être utilisées dans un schéma de modélisation spatialisée pour appréhender le fonctionnement et la dynamique des agroécosystèmes. D'un point de vue économique, l'utilisation de la télédétection offre la possibilité de réduire les coûts d'obtention de l'information à l'échelle d'une région ou d'un pays.

Notre étude a pour objectif d'estimer le taux de variation de la couverture terrestre (surface d'eau, végétation urbanisme et sol) dans la ville de Marrakech, en calculant les différentes indices à partir des images Landsat (1995 ; 2007 ; 2016) et en utilisant la technique de classification et de « change détection ».

Nous avons fixé le mois de juin comme date de référence pour toutes les images traités pour éliminer la perturbation du nuage et pour mettre l'accent sur la végétation qui pousse toute l'année et les surfaces d'eau permanentes à fin de suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace. Les images recueillit analysé, traitée et interprétée ont permis de cartographier l'évolution des éléments d'occupation du sol dans la zone d'étude et ont abouti aux résultats suivant.

L'examen des cartes de NDWI calculés à partir des images Landsat, montrent un recul global des étendues d'eau (ou humidité des sols et des plantes) dans la ville de Marrakech. Cette diminution est d'environ 0,93Km² entre [1995-2007].mais dans ces 10 dernières années on constate une augmentation de 0.49Km², cela est dus grâce à la stratégie de Maroc vert qui a était lancé en 2008 pour raisonné l'utilisation des eaux dans la ville et de crée des nouveaux zones à intérêt agricole alors la construction des ouvrages pour stocké de l'eau (bassin d'irrigation dans les fermes) ce qui explique cette augmentation des surfaces d'eau.

Le thème du sol nu a occupé environ de 1062.82 Km² en 1995, cette surface a connu une diminution de 188.89 Km² en 2007, cette perte de surface a continué jusqu'à 2016 avec une régression estimée de 220.13 Km² entre [2007-2016]

Les images Landsat traitées ont montré que La superficie recouverte par la végétation dans la ville de Marrakech a connu une variabilité très importante, durant ces vingt ans passés. La végétation a progressé d'une superficie d'environ 97,38Km² (3,65% de la superficie administrative de la ville). En 1995, cette surface végétale a été de 351.47Km², puis elle a connu une légère réduction estimée de 267.42 Km² (70.86%) en 2007. Cependant, en 2016 on remarque une dilatation plus au moins importante avec une superficie de 412.85 km² et un taux de changement de 10.37%.

Dans la période [1995-2016] l'urbanisme a progressé d'une superficie d'environ 193,16Km² (33.84% de la superficie de la ville), la croissance démographique est l'une des causes qui aboutit á cette dilatation de l'urbanisme, mais aussi la croissance économique de Marrakech grâce aux

investissements.

Le traitement des images satellitaires est basé sur l'application de plusieurs méthodes différentes. En citant par exemple la classification qui sert à classer et à créer une carte représentant plusieurs classes afin de produire des cartes d'occupation du sol. La deuxième est celle des indices spectraux comme une méthode mathématique qui calcule les variations d'un seul élément détecté par des formules spécifiques utilisant des bandes d'absorption spécifiques pour chaque élément. La troisième est la technique d'analyse en composante principale (ACP), qui a permis de résoudre les problèmes issus de la confusion des pixels des différentes entités étudiées en utilisant les bandes principales d'une image satellitaire qui regroupe l'essentiel des informations.

Chacune de ces techniques citées a des avantages et des inconvénients mais la classification supervisée reste la meilleure surtout quand elle est précédée par ACP pour mieux détecter et regrouper un ensemble de pixels qui exprime la même entité dans la réalité.

Références bibliographiques :

Abourida A. (2007), APPROCHE HYDROGEOLOGIQUE DE LA PLAINE DU HAOUZ (MAROC) PAR TELEDETECTION, ISOTOPIE, SIG et MODELISATION. Thèse De Doctorat, université Cadi Ayyad, 160 pp.

AkiodeOlukemiAdejoke & al.(2014). Analysis of Change Detection of Birnin-Kudu Land Cover Using Image Classification and Vegetation Indices. Journal of Environment and Earth Science ISSN 2224-3216 (Paper) ISSN 2225-0948 (Online) Vol.4, No.21, 2014.

Ambroggi R. et Thuile G., (1952), HAOUZ DE MARRAKECH XIXème, Cong. Géol. International morphologies régionales, 3ème Série, Maroc, N°4, hydrologie du Maroc.

Bonn F., and Rochon G.,(1992), PRECIS DE TELEDETECTION - Volume 1 - Principes et Méthodes .Universités Francophones, Presses de l'Université du Québec/AUPELF.

Collin-Delavaud A, Toudert D.-Apport d'une simple composition colorée à l'étude de l'espace urbain : Mexicali (Mexique) AUPEL-UREF, Liège, 1996.

Chatelain A. - Télédétection et milieu urbain. Doc. Pédagogique EHESS 1993.

El Halim, M. (2015).Apport de la télédétection dans l'évaluation de la variation des surfaces d'eau et du couvert végétal dans la Plaine du Haouz entre 1984 jusqu'à 2014. Mémoire de master, Univ. Cadi Ayyad Marrakech, Maroc.

Weber Ch., Dureau F. - Télédétection urbaine et SIG. Anthropos Paris 1995.

Lenco M. - Etude par télédétection des écosystèmes des agglomérations françaises. La cartographie urbaine aujourd'hui. Cahiers du CREPIF, n°54, mars 1996, Paris, 99-114

El hannani, M. & al. (2015). Atlas régional région du Tadla Azilal, Maroc, 2015.

Girard C.M., (1999), TRAITEMENT DES DONNEES DE TELEDETECTION. Edition DUNOD Paris, ISBN 2 10 004185 1, pp. 527.

Idbraim, S. (2009).Méthodes d'extraction de l'information spatiale et de classification en imagerie de Télédétection : Applications à la cartographie thématique de la région d'Agadir (Maroc). Thèse Doctorat.

ROBIN M.2002 Télédétection. Des satellites aux SIG. Coll Fac Géographie, Nathan Université.

Web_ référence:

www.glovis.usgs.gov

www.infoclimat.fr

www.researchgate.net

<https://landsat.gsfc.nasa.gov>

www.u-picardie.fr/beauchamp/Maroc/GEOL_MRKCH.html

www.geographie.ens.fr/IMG/file/kegomard/Teledetection