

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCE DE LA NATURE ET DE LA VIE

DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES

THESE

Présentée

Par MERDACI Samir

En vue de l'Obtention du Diplôme De Doctorat LMD en Sciences Agronomiques

THEME

**La modélisation de la gestion d'irrigation dans la région de Biskra
en utilisant le traitement des images satellitaires (la télédétection)**

Jury :

Président : Mr. BENKHALED A. Professeur (Université Med Khider – Biskra)
Directeur de thèse : Mr. MASMOUDI A. MCA (Université Med Khider – Biskra)
Examineur : Mr. BOUMARAFA B. MCA (Université Med Khider – Biskra)
Mr. MOSTFAOUI T. MRA (CRSTRA – Biskra)

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

**JE REMERCIE, AVANT TOUT, ALLAH TOUT GRAND ET TOUT
PUISSANT, QUI M'A DONNÉ
LA FORCE, LA SANTÉ ET LE COURAGE ET QUI M'A PERMIS LA
RÉALISATION ET LA FINALISATION DE CE TRAVAIL.**

Je tiens d'abord à exprimer mes parfaites reconnaissances et mes profonds remerciements à mon encadrant Dr. MASMOUDI ALI pour son encadrement, son suivi, ses précieux, fructueux et judicieux conseils ainsi que pour tous les efforts qu'il a déployés pour aiguïser ma curiosité scientifique et la concrétisation de cette thèse.

Je remercie infiniment Pr. BEN KHALED A qui m'a fait l'honneur d'accepter de présider le jury d'examen de cette thèse.

Je remercie profondément Dr. BOUMARAF B. et Dr MASTFAOUI T qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Mes sincères remerciements les plus profonds au Mr. SOUCI D. pour L'encouragement et l'intérêt qu'il m'a apporté et pour ses précieux conseils. Mes meilleurs remerciements sont adressés également à tous mes collègues de l'ITDAS qui m'ont aidé et ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma parfaite gratitude.

Mes profonds remerciements à ma famille pour tous les sacrifices consentis pour me permettre de réaliser cette thèse.

Enfin à tous ceux dont les noms n'ont pu être cités. Puissent-ils reconnaître par ces lignes, l'expression de ma profonde reconnaissance.

QUE DIEU VOUS BENISSE !

إهداء

اهدي بحثي هذا:

إلى من قال الله تعالى فيهما "و أخفض لهما جناح الذل من الرحمة و قل ربي ارحمهما كما

ربياني

صغيرا"

اللذان طالما حلما أن يبصرا نجاحي و أخذنا بيدي ووفرا لي سبيل التعلم و قدما لي الدعم

المعنوي اللازم

"والداي الكريمين اسأل الله الرحمن الرحيم أن يخفضكما وان يجعل هذا العمل في ميزان

حسناتكما و أن

يكون صدقة جارية تنفعكما"

إلى زوجتي الغالية التي صبرت معي وكانت لي السند والمحفز لإتمام هاذ العمل

إلى فلذتا كبدي سلسبيل و ادم حفظهما الله و رعاهما

إلى أخوتي : فؤاد، هشام، عبد الرحيم و علاء الدين أخواتي : لامية، كريمة و سلمى و كل

أفراد العائلة الكبيرة علي تشجيعهم لي ومشاركتي الفرحة

إلى من تتلمذت على أياد يهم، وإلى من أمدوني بنصائحهم و توجيهاتهم

"أساتذتي جزاكم الله خيرا و من علمنا و كل من كان له فضل علينا"

LA LISTE DES ABREVIATIONS

Abréviation	Signification
ITDAS	Institut technique de développement de l'agronomie saharienne
FDPS	Ferme de Démonstration et de la Production de Semence
DRE	Direction des Ressources en Eau
CT	Complexe Terminal
CI	Continental Intercalaire
ONM	Office National du Météo
DSA	Direction des Service Agricole
BOA	Bottom Of Atmospher
TOA	Top of Atmospher
SCP	Semi Automatique Classification
RMSE	Root Main Squar Error
Kc	Coefficient Cultural
ETP	Evapotranspiration Potentiel
ETM	Evapotranspiration Maximal
ETR	Evapotranspiration Réel
ETc	Evapotranspiration de la Culture
NDVI	Normalised Difference vegetation index
SAVI	Soil - Adjusted Vegetation Index
EVI	Enhanced Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
P	Pluviométrie
T max	Température maximale
T min	Température minimale
T moy	Température moyenne
V	Le Vent
H	L'Humidité
RU	La Reserve Utile
RFU	La Reserve Facilement Utilisable
FAO	Food and Agricultrale Organisation
AEP	Alimentation en Eau Potable
SAI	Surface Agricole irriguée
SVA	Sol, Végétale, atmosphère
ESA	European Space Agency
USGS	United States Geological Survey
ODK	Open Data KIT
TIFF	Tagged Image File Format
GBWP	Gross Biomass Water Productivity
TBP	Total Biomasse Production
NIR	Near Infra Red
SWIR	Short Wave Infra red

LA LISTE DES TABLEAUX

Les numéros des tableaux	Le titre	P
01	Précipitations moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018 (ONM)	23
02	Températures moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018	24
03	Vitesse moyenne mensuelle du vent de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018	24
04	L'humidité moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018	24
05	La somme de l'insolation réelle mensuelle moyenne de la région de Biskra durant la période 1989 – 2015	25
06	L'évolution des superficies irriguées 2010/2018	29
07	La répartition des superficies irriguées par système d'irrigation	30
08	La granulométrie du sol du site expérimental	33
09	Les caractéristiques chimiques d'eau utilisée pour l'irrigation	33
10	Description technique du satellite landsat 8 OLI/TIRS	34
11	Résultats du modèle par régression polynomiale pour la saison 2017/2018	37
12	Les résultats du test RMSE (01)	37
13	Les résultats de la régression linéaire pour la saison 2017/2018	38
14	Résultats du Test RMSE (02)	39
15	Résultats du modèle par régression polynomiale pour la saison 2018/2019	40
16	Les résultats du test RMSE (03)	40
17	Les résultats de la régression linéaire pour la saison 2018/2019	41
18	Résultats du Test RMSE (04)	41
19	Bilan de fertilité du sol du lysimetre (ITDAS 2018)	48
20	Le Bilan ionique su sol (ITDAS 2018)	48
21	Le nombre et les fréquences des irrigations apportées durant le cycle végétatif	48
22	La qualité chimique des eaux de drainage du lysimetre (laboratoire de l'ITDAS 2019)	49
23	Caractéristique technique des satellites sentinel 02 (ESA)	55
24	Les principales classes d'occupation du sol dans la plaine de l'Outaya	57
25	Les sous classe d'occupation du sol dans la plaine de l'Outaya	58
26	Le détail final des classes après travaux de classification supervisé	66
27	Les résultats statistiques obtenus après classification	67
28	La table des matrix de confusion	68
29	Les résultats détaillés de la validation par CSP	69

LA LISTE DES FIGURES

Le numéro de la figure	Le titre	P
01	Courbe des coefficients culturaux et définition des phases végétatifs	11
02	Processus d'acquisition de l'information par les satellites optiques	13
03	La décomposition du spectre électromagnétique	14
04	NDVI de la végétation saine et stressée	18
05	Vue satellitaire des cultures (Couleurs vraies et NDVI)	19
06	Découpage administrative de la wilaya de Biskra	21
07	Carte de la situation géographique de la wilaya de BISKRA	22
08	Diagramme ombrothermique de Gaussen de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018	26
09	Localisation de la région de Biskra sur le climagramme.	27
10	Schéma représentatif de l'évolution de la superficie irriguée de la Wilaya de Biskra du 2010 au 2018	30
11	La répartition des SAI par système d'irrigation 2018	30
12	La répartition de la consommation de l'eau par secteur	31
13	Situation géographique du site de l'outaya	33
14	La méthodologie de travail	34
15	Image satellitaire après traitement par ENVI 4.7	35
16	Modèle de régression polynomiale pour la saison 2017/2018	38
17	Illustration de la relation entre le NDVI et le KC pour la saison 2017/2018	38
18	Modèle de régression linéaire pour la saison 2017/2018	39
19	Illustration de la relation entre le NDVI et le KC par régression linéaire pour la saison 2017/2018	39
20	Modèle de régression polynomiale pour la saison 2018/2019	40
21	Illustration de la relation entre le NDVI et le KC pour la saison 2018/2019	41
22	Modèle de régression linéaire pour la saison 2018/2019	42
23	Illustration de la relation entre le NDVI et le KC par régression linéaire pour la saison 2018/2019	42
24	Schémas du Kc modèle de la saison 2017/2018	43
25	Schémas du Kc modèle de la saison 2018/2019	44
26	Lysimetre simple	45
27	Un lysimetre cylindrique mis en place du site expérimental de l'Outaya	46
28	Vue de face du lysimetre au niveau de la parcelle expérimental	47
29	Vue de face du lysimetre au stade épiaison	47
30	Le graphe representant le Kc lysémetrique obtenue pour l'année 2018/2019	49
31	Représentation graphique de tous les Kc obtenue	50
32	La délimitation de la zone d'étude au niveau de la plaine de l'Outaya	52
33	Image satellitaire brute	53
34	La carte d'occupation du sol de la même zone	54
35	La méthodologie adoptée par la FAO pour la classification supervisée	54
36	L'image brute de sentinel 02 de la zone de Biskra	56
37	Parcelle de luzerne	58
38	Parcelle de Blé dur	58

39	Parcelle des serres tunnel	59
40	Sol nue	59
41	La projection des données collectées de la zone d'étude sur QGIS	60
42	La digitalisation des polygones de quelques classes d'occupation des sols	61
43	Les étapes de base du prétraitement	62
44	Les signatures spectrales typiques de la végétation, de l'eau et du sol	63
45	La méthode d'échantillonnage holdout	64
46	Visualisation et importation des signatures à l'aide du plugin SCP	65
47	L'extraction de la signature spectrale de chaque classe	66
48	La carte des cultures de la zone de l'outaya	67
49	La méthodologie utilisée pour l'estimation de la productivité de l'eau par l'approche wapor	70
50	L'Interface du portail wapor	71
51	Les couvertures des zones selon les niveau des résolutions spatial	72
52	Les facteurs influençant la productivité de l'eau	74
53	L'interface du programme jupyter	75
54	La méthodologie adopté par wapor pour l'estimation de la Biomasse	76
55	Le raster TBM de la zone de Biskra	76
56	La méthodologie adopté par wapor pour l'estimation de l'et	77
57	Le résultat de l'estimation de la l'évapotranspiration par télédétection dans notre zone d'étude	78
58	La carte de la productivité de l'eau de la zone de Biskra	78

SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Liste des abréviations	
Résumé	01
Introduction	04
Problématique et contexte de l'étude	06
LA PREMIERE PARTIE ; SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
CHAPITRE 1 L'IRRIGATION DANS LES ZONES ARIDES	
1. Agriculture en zone aride ou « l'aridoculture »	07
1.1. Développement de l'agriculture saharienne	07
1.2. L'irrigation en zones arides	07
2. Eau et l'agriculture dans les régions sahariennes	08
2.1. La détermination des besoins en eau des cultures	08
2.1.1. Pourquoi on détermine les besoins en eau des cultures ?	08
2.2. Comment déterminer les besoins en eau des cultures?	09
2.2.1. Besoin en eau d'irrigation	09
2.2.2. Besoin en eau de la culture (ETM)	10
2.2.3. Choix du coefficient cultural	10
2.2.3.1. Définition des coefficients culturaux	10
2.2.4. Les méthodes d'estimation de l'ET ₀	11
2.2.4.1. Formule de FAO penman – monteith	12
CHAPITRE 02 LA TELEDETECTION ET L'AGRICULTURE	
1. Définition de la télédétection	13
2. l'historique et l'utilité de la télédétection	14
2.1. L'historique de la télédétection	14
2.1.1. De l'avion au satellite	15
2.2. Télédétection et modélisation de l'évapotranspiration	15
3. Mesurer les changements (télédétection et phénologie)	17
3.1. NDVI et phénologie	18
3.2. Indice de végétation amélioré (EVI)	19
3.3. Indice de teneur en eau par différence normalisée (NDWI)	20
CHAPITRE 03 ETUDE DE LA REGION	
1. Présentation de la wilaya de Biskra	21
1.1. Situation géographique et administrative	21
1.2. Relief	22
1.2.1. Les montagnes	22
1.2.2. Les plateaux	22
1.2.3. Les plaines	22
1.2.4. Les dépressions	22
1.2.5. Le sol	23
1.3. Climatologie	23
1.3.1. La pluviométrie	23

1.3.2. La température	23
1.3.3. Le vent	24
1.3.4. Humidité relative	24
1.3.5. Insolation	24
1.3.6. Synthèse climatique	25
1.3.6.1. Diagramme Ombrothermique de Gausсен	25
1.3.6.2. Climagramme d'emberger	26
1.4. Les ressources en eaux	27
1.4.1. Eaux superficielles	27
1.4.1.1 barrages de fontaines des gazelles	27
1.4.1.2 barrages de foug el gharza	27
1.4.2. Eaux souterraines	28
1.4.2.1. Nappes des sables	28
1.4.2.1.1. Mio- plio- quartenaire	28
1.4.2.1.2. Pontien	28
1.4.2.2. Nappes des calcaires	28
1.4.2.2.1. Nappe d'écène inférieur	28
1.4.2.2.2. Nappe de sinonien	28
1.4.2.2.3. Nappe du maestrichtien et turonien:	28
1.4.2.2.4. Nappe albienne et barrémienne: (continental intercalaire):	29
1.5. Qualité des eaux destinées à l'irrigation	29
1.6. Données générales sur le secteur d'irrigation de la wilaya	29
1.6.1. Evolution des superficies irriguées 2010/2018	29
1.6.2. La répartition des superficies irriguées par système d'irrigation	30
DEUXIEME PARTIE ; L'EXPERIMENTATION	
CHAPITRE 04 : TRAVAUX DE MODELISATION	
1. Contexte général et les objectifs de la modélisation	32
1.1. Contexte	32
1.2. Objectif de la modélisation	32
2. Matériel et méthodes	32
2.1. Description de la zone d'étude	32
2.1.1. Les caractéristiques pédoclimatiques de la zone d'étude	33
2.1.1.1. Le sol	33
2.1.1.2. L'eau d'irrigation	33
2.2. Méthode de travail	34
2.2.1. Données utilisées	34
2.1.1.1. Etape 1	34
2.1.1.2. Etape 2	35
2.1.1.2. Etape 3	35
3. Résultats de la modélisation	37
3.1 Les résultats de la première année d'expérimentation 2017/2018	37
3.1.1. La régression polynomiale	37
3.1.2. La régression linéaire	38
3.2 Les résultats de la deuxième année d'expérimentation 2018/2019	39

3.2.1. La régression polynomiale	40
3.2.2. La régression linéaire	41
4. Conclusion des résultats de la modélisation	43
4.1. La première année 2017/2018	43
4.2. La deuxième année 2018/2019	43
5. Calcul du Kc lysimétrique	44
5.1. Contexte	44
5.2. Définition d'un lysimetre	44
5.3. Objectif	46
5.4. La méthode adoptée pour la mesure de l'ETR et du Kc	47
5.5. Interprétation des résultats lysimetrique	50
6. Conclusion général	51
CHAPITRE 05 ; LA CARTOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE PAR TELEDETECTION ET L'ESTMATION DE LA PRODUCTIVITE DE L'EAU	
1. LA CARTOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE	52
1.1. Contexte de l'étude	52
1.2. Objectif de l'étude	52
1.3. La Méthodologie adopté	53
1.3.1. L'Acquisition de l'image	55
1.3.2. La Collecte des données de terrain	56
1.3.2.1 Taille des unités d'échantillonnage	56
1.3.2.2. Homogénéité des unités d'échantillonnage	56
1.3.2.3. La taille de l'échantillon (nombre d'unités d'échantillonnage)	57
1.3.2.4. La répartition des unités d'échantillonnage	57
1.4. Résultats de l'opération de la collecte des données	57
1.4.1. L'export des données sur QGIS	60
1.4.2. La digitalisation des polygones	60
1.5. Cartographie	61
1.5.1. Le prétraitement des images	61
1.5.1.1. Le traitement géométrique	61
1.5.1.2. Le traitement radiométrique	62
1.5.1.3. Le traitement atmosphérique	62
1.5.2. La classification supervisée	63
1.5.2.1. Définition	63
1.5.2.2. Division des données de référence	64
1.5.3. Les résultats de l'opération de classification des cultures	65
1.5. 4. Analyse de l'exactitude (la validation)	68
2. LA PRODUCTIVITE DE L'EAU PAR TELEDETECTION	69
2.1. Le portail wapor	69
2.2. Le projet	70
2.2.1. La base de données wapor	71
2.2.2. Structure de la base de données	71
2.2.3. Variables ou paramètres disponibles sur le portail	72
2.3. Comment estimer la productivité de l'eau dans notre région d'étude	73

2.3.1. Contexte de l'étude	73
2.3.2. Le concept de la productivité de l'eau	73
2.4. La méthodologie adoptée par WaPOR pour l'estimation de la productivité d'eau	74
2.4.1. La méthode directe	74
2.4.2. La méthode indirecte	75
2.5. Les paramètres nécessaires pour le calcul de la productivité de l'eau	75
2.5.1. Calcul de la production de biomasse par télédétection (Le rendement)	75
2.5.2. L'estimation de la consommation en eau ET par télédétection	76
2.5.3. La productivité de l'eau par télédétection	78
2.5.4. Interprétation des résultats	78
2.6. Conclusion générale	79

Résumé

La gestion rationnelle de l'eau d'irrigation à l'échelle parcellaire ou régionale revêt une importance primordiale pour satisfaire les besoins en eau de tous les agriculteurs d'une manière durable. L'indisponibilité de l'information ou des données indispensables à la bonne gestion de ces eaux à l'échelle spatiale et temporelle nous oblige à trouver d'autres alternatives plus performantes et plus fiables, et cela pour améliorer les approches actuelles qui se basent généralement soit sur les formules empiriques ou sur des estimations standards (les calendriers d'irrigation).

Sur ce, la télédétection spatiale apparaît comme la voie la plus prometteuse en proposant une vision objective, exhaustive et répétitive sur des grandes surfaces. La télédétection qui se base sur l'interaction rayonnement électromagnétique-cible, permet d'accéder à certaines variables clés pilotant le processus d'évapotranspiration définissant les besoins en eau des cultures.

La disponibilité des images satellitaires et d'autres données de la télédétection gratuites de plusieurs années avec des différentes résolutions temporelles, spectrales et spatiales au niveau des différents portails open source nous donnera l'opportunité de les exploiter pour découvrir la réalité du terrain et de définir les modalités d'intervention rapide pour résoudre les problèmes liés à la gestion de l'irrigation ainsi que d'autres problématiques liées au développement d'une agriculture durable.

Ce travail est une contribution à l'étude des avantages de l'utilisation de la télédétection :

Premièrement ; le développement et la création des modèles mathématiques qui visent l'amélioration et la calibration des paramètres indispensables à l'estimation des besoins en eau des cultures. Car la télédétection spatiale offre maintenant une information spatialisée et actualisée concernant la végétation qui renseignent de plus sur le développement réel de la végétation (et non son développement supposé) notamment par le biais d'indices de végétation comme le (NDVI). Cette information est bien corrélée à l'activité photosynthétique des végétaux, elle-même déterminante de l'évapotranspiration. Le résultat de ce travail de modélisation a donné des modèles mathématiques qui expliquent la relation entre le K_c et le NDVI par la formule $K_c = f(\text{NDVI})$ et ce qui a donné un nouveau K_c calibré à notre région d'étude et qu'il sera utilisé pour l'estimation des besoins en eau des cultures par la formule : $ET_c = f(\text{NDVI}) \times ETP$.

Deuxièmement ; l'amélioration de la productivité de l'eau à l'échelle parcellaire et régionale dans les régions arides et semi arides et notamment la région de Biskra par la création des cartes de la productivité de l'eau en utilisant les données disponibles au niveau des portails open source telle que le WaPOR, ces cartes vont nous aider à bien analyser la situation actuelle de notre zone d'étude relative à la gestion de l'irrigation en proposant des solutions adéquates qui visent à trouver les modalités efficaces pour l'amélioration de la productivité de l'eau.

Mots clés : *Modélisation; Télédétection; NDVI; Evapotranspiration de la culture ETc; Coefficient cultural Kc ;la productivité de l'eau*

الملخص

تعتبر الإدارة الرشيدة لمياه الري على المستوى الحقلي و الإقليمي ذات أهمية قصوى لتلبية احتياجات جميع المزارعين من المياه بطريقة مستدامة. عدم توفر المعلومات أو البيانات الضرورية للإدارة السليمة لهذه المياه على نطاق المكان والزمان يفرض علينا إيجاد بدائل أخرى أكثر كفاءة وفعالية ، وهذا من أجل تحسين الأساليب الحالية التي تستند بشكل عام إما على الصيغ التقديرية أو على أساس (تقويمات الري العامة المنتهجة من طرف الفلاحين).

بناءً عليه ، أن الاستشعار عن بعد باستعمال صور الأقمار الصناعية هو أكثر الطرق الواعدة من خلال تقديم رؤية موضوعية وشاملة ومتكررة على مساحات واسعة. يوفر الاستشعار عن بُعد ، الذي يعتمد على التفاعل المستهدف للإشعاع الكهرومغناطيسي بين القمر الصناعي والمناطق المراد مراقبتها، إمكانية الوصول إلى بعض المتغيرات الرئيسية التي تقود عملية التبخر والنتح (Evapotranspiration) و التي تحدد الاحتياجات المائية للمحاصيل.

إن توفر صور الأقمار الصناعية وغيرها من بيانات الاستشعار عن بعد المجانية لعدة سنوات مع دقة زمنية وطيفية ومكانية مختلفة على مستوى بوابات المصادر المفتوحة open-source المختلفة تتيح لنا الفرصة لاستخدامها لاكتشاف الواقع على الأرض وتحديد طرائق التدخل السريع لحل المشكلات المرتبطة بإدارة الري وكذلك المشاكل الأخرى المرتبطة بتنمية الزراعة المستدامة.

هذا العمل هو مساهمة في دراسة فوائد استخدام الاستشعار عن بعد في :

أولاً؛ تطوير وإنشاء نماذج رياضية تهدف إلى تحسين ومعايرة الإعدادات الأساسية لتقدير احتياجات مياه الري لأن الاستشعار عن بعد يوفر الآن معلومات مكانية ومحدثة بشأن الغطاء النباتي والتي توفر أيضاً معلومات عن تطور الغطاء النباتي الحقيقي (وليس تطوره المفترض) وخاصة من خلال مؤشرات الغطاء النباتي مثل (NDVI). ترتبط هذه المعلومات ارتباطاً جيداً بالنشاط الضوئي للنباتات photosynthèse ، والذي هو بحد ذاته عامل محدد للتبخر و النتح (Evapotranspiration). أعطت نتيجة هذا العمل نماذج رياضية تشرح العلاقة بين Kc و

NDVI بالصيغة $f(NDVI) = Kc$ وما أعطى Kc جديد والذي سيتم استخدامه لتقدير الاحتياجات المائية للمحاصيل باستخدام الصيغة $ET_0 \times f(NDVI) = ET_c$

ثانياً؛ تحسين إنتاجية المياه على المستوى الحقلي و الإقليمي في المناطق القاحلة وشبه القاحلة خصوصاً منطقة بسكرة من خلال إنشاء خرائط لإنتاجية المياه باستخدام البيانات المتاحة من بوابات المصادر المفتوحة مثل WaPOR و التي سوف تساعدنا على تحليل الوضع الحالي لمنطقة دراستنا بشكل صحيح فيما يتعلق بإدارة الري من خلال اقتراح حلول مناسبة تهدف إلى إيجاد طرق فعالة لتطوير أساليب الري.

الكلمات المفتاح : النمذجة ، الاستشعار عن بعد ، NDVI ، ETc ، المعامل النباتي Kc ، إنتاجية المياه

Abstract

The rational management of irrigation water on a parcel or regional scale is very importante for the evaluation of water requirements of all farmers in a sustainable manner. The unavailability of informations or data essential for the management of these waters on a spatial and temporal scale forces us to find other more efficient and reliable alternatives, and this in order to improve current approaches which are generally based either on empirical formulas or on standard estimates (irrigation calendars).

Space remote sensing appears to be the most promising way by offering an objective, exhaustive and repetitive vision over large areas. Remote sensing, which is based on the interaction between electromagnetic radiation and target, provides access to certain variables keys driving the evapotranspiration process that defining the water requirements of crops.

The availability of satellite images and other free remote sensing data of several years with different temporal, spectral and spatial resolutions at the different open source portals will give us the opportunity to use them to discover the reality on the ground and define the rapid intervention modalities to solve the problems linked to irrigation management as well as other problems linked to the development of sustainable agriculture.

This work is a contribution to the study of the benefits of using remote sensing ; Firstly ; the development and the creation of mathematical models which aims to improving and calibrating the parameters essential for the estimation of crops water requirements Because remote sensing data now offers spatialized and updated information concerning vegetation which also provides information on the real development of the vegetation (and not its assumed development) notably through vegetation indices such as (NDVI). This information is well correlated with the photosynthetic activity of plants, which itself is determinant of evapotranspiration. The result of this modeling work gave mathematical models which explain the relationship between K_c and NDVI by the formula $K_c = f(\text{NDVI})$ that gave a new calibrated K_c to our region of study and that will be used to estimate crop water requirements using the formula: $ET_c = f(\text{NDVI}) \times ET_0$.

Secondly; improving water productivity on a parcel and regional scale in arid and semi-arid regions and in particular the Biskra region by creating water productivity maps using data available from open source portals such as the WaPOR, these maps will help us to properly analyze the current situation in our study area relating to irrigation management by proposing adequate solutions which aims to find effective methods for improving water productivity.

Keywords; *Modeling, Remote Sensing, NDVI, Crop Evapotranspiration ETc, Cultural Coefficient Kc, water productivity*

INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

En Algérie, le Sahara occupe plus de 80 % de la surface totale du pays. Son climat est caractérisé notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, des fortes températures, une luminosité intense, et une forte évaporation (Chehema, 2011)

Au niveau du Sahara Algérienne, l'agriculture constitue l'activité principale et le facteur de stabilisation des population et c'est à ce titre que l'état a retenue dans le cadre de la mise en valeur dans le sud l'option « agriculture saharienne » qui vise un développement harmonieux des régions concernés, favorisant une gestion rationnelle des ressources en eau et en sol, ainsi que la réhabilitation et l'extension de la phoeniciculture (agriculture d'oasis) de même, que la poursuite de la mise en valeur et la promotion des cultures stratégique au moyen de système de production valorisant les particularités climatiques du grand sud et notamment la gestion durable de la ressources en eau précieuse (Khadraoui, 2005)

Sur ce, La gestion rationnelle de cette eau est l'une des priorités des politiques environnementales en Algérie à cause de la très faible disponibilité de l'eau en quantité et en qualité. L'agriculture irriguée concentré dans la région de Biskra est de loin le plus gros consommateur d'eau de la région, puisqu'elle utilise environ 85% des ressources totales mobilisée (DRE Biskra, 2016). La gestion rationnelle de l'eau d'irrigation à l'échelle parcellaire ou à l'échelle régionale revêt donc une importance primordiale pour satisfaire les besoins en eau de tous les agriculteurs, et d'une manière durable. L'indisponibilité de l'information ou des données indispensable à la bonne gestion de ces eaux à l'échelle spatiale et temporelle nous oblige à trouver d'autres alternatives plus performantes et plus fiables.

La télédétection spatiale offre maintenant une information spatialisée et actualisée concernant la végétation ainsi que les séries temporelles d'image qui renseignent de plus sur le développement réel de la végétation (et non son développement supposé) notamment par le biais d'indices de végétation comme le **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**. Cette information est bien corrélée à l'activité photosynthétique des végétaux, elle-même déterminante de l'évapotranspiration (Simonneaux, 2009)

L'agriculture est un utilisateur d'eau clé et un suivi attentif de la productivité de l'eau dans l'agriculture et l'exploration des possibilités de l'accroître est requis. L'amélioration de la productivité de l'eau représente souvent la voie la plus importante pour faire face à l'augmentation de la demande en eau dans l'agriculture. Un suivi systématique de la productivité de l'eau grâce à l'utilisation des techniques de télédétection peut aider à identifier les écarts de productivité de l'eau et à envisager les solutions et pour combler ces lacunes.

Depuis le lancement des satellites civils comme Landsat au début des années 1970 puis des satellites à basse résolution spatiale comme NOAA-AVHRR au début des années 1980, la télédétection est devenue incontournable pour de nombreux domaines comme la climatologie, l'océanographie, l'environnement ou l'agriculture. De façon générale, grâce à la vision synoptique, répétitive et objective quelle apporte sur les différents éléments de la surface terrestre, la télédétection est un outil privilégié pour l'étude et le suivi de la végétation sur l'ensemble du globe. Cela passe par la compréhension des variations spatio-temporelles des

INTRODUCTION

différents types de végétation, de leurs propriétés structurales et biophysiques. Pour l'étude de la végétation, des séries temporelles d'indice de végétation marqueurs de l'activité photosynthétique comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Rouse et al. 1974) sont traditionnellement utilisées (Araya et al. 2016; Lee et al. 2002; Zhenyu Jin & Bing Xu 2013 cité par Bah, 2016). Les indices de végétation sont définis comme étant « des transformations spectrales de deux ou plusieurs bandes conçues pour améliorer la contribution des propriétés de la végétation et de permettre des comparaisons spatiales et temporelles fiables de l'activité photosynthétique terrestre et des variations structurelles de la canopée » (Huete et al. 2002 cité par Bah, 2016).

Dans les zones arides et semi arides, la productivité est souvent limitée par l'approvisionnement en eau des cultures. Des précipitations rares et variables provoquent des déficits hydriques qui réduisent la productivité des cultures (FAO 2018). L'irrigation supprime les restrictions d'eau mais bien que la demande d'eau pour les cultures soit importante par rapport aux autres utilisations, les quantités d'eau disponibles sont limitées et soumises à la concurrence croissante des autres secteurs de la société.

La productivité de l'eau (WP, water productivity) se calcule comme figure dans sa formule généralisée comme suit : $WP = \text{le rendement} / \text{Apport en eau}$ (Billy, 2012)

L'approvisionnement en eau des cultures provient de trois sources : l'irrigation, les précipitations saisonnières et l'eau présente dans le sol à la plantation.

Dans les zones arides et semi arides, l'irrigation est la principale source d'eau mais il faut aussi prendre en considération les pluies qui tombent pendant la saison végétative.

La productivité de l'eau est un indicateur intéressant face au défi d'augmenter la production agricole avec moins de ressources en eau. Mais plus qu'un indicateur, l'augmentation de la productivité de l'eau agricole a été mise en avant ces dernières années comme un objectif majeur, résumé par le slogan « more crop per drop » (« plus de récolte par goutte d'eau »). Or ce concept soulève de nombreuses interrogations, sur les plans théorique et pratique. Il est donc légitime de s'interroger sur l'intérêt de son utilisation comme un objectif en soi dans le cadre de stratégies de développement agricole. (Billy, 2012)

La productivité de l'eau peut se calculer en considérant l'eau apportée par l'homme (irrigation) ou par la nature (précipitations). En fait le concept de WP a d'abord été utilisé pour évaluer les performances des systèmes irrigués, où l'on peut exercer une maîtrise partielle ou totale des apports d'eau. Dans ce cas, l'eau allouée à la culture irriguée représente un facteur de production, visant à combler un manque d'eau. Sa gestion relève du calcul économique, comme les autres facteurs de production (travail, intrants, etc.). (Billy, 2012)

Problématique et contexte de l'étude

La gestion rationnelle de l'eau d'irrigation à l'échelle parcellaire ou à l'échelle régionale revêt une importance primordiale pour satisfaire les besoins en eau de tous les agriculteurs d'une manière durable. L'indisponibilité de l'information ou des données indispensables à la bonne gestion de ces eaux à l'échelle spatiale et temporelle nous oblige à trouver d'autres alternatives plus performantes et plus fiables, et cela pour améliorer les approches actuelles

INTRODUCTION

qui se basent généralement soit sur les formules empiriques ou sur des estimations standards (les calendriers d'irrigation).

Sur ce, la télédétection spatiale apparaît comme la voie la plus prometteuse en proposant une vision objective, exhaustive et répétitive sur de grandes surfaces. La télédétection qui se base sur l'interaction rayonnement électromagnétique-cible, permet d'accéder à certaines variables clés pilotant le processus d'évapotranspiration. (Moran et al., 1994; Schmugge and Kustas, 1999; Troufleau, 1996; Vidal et al., 1996 cité par Diarra, 2017)

Dans les régions aride et semi aride, La télédétection est devenu la voix la plus efficaces pour le suivi spatio-temporelle des terres et notamment les terres destinée a l'agriculture. Sur ce, un bon traitement des ces données peut nous offrir des outils d'aide à la décision qui vont participer a bien analysé la situation actuelle relatif à la gestion de l'irrigation soit a l'échelle parcellaire ou à l'échelle régionale.

La disponibilité des images satellitaires et d'autre données de la télédétection gratuites de plusieurs années avec des différentes résolutions temporelles, spectrales et spatiales au niveau des différente portails open source nous donnera l'opportunité de les exploiter pour découvrir la réalité du terrain et de définir les modalités d'intervention rapide pour résoudre les problèmes lier à la gestion de l'irrigation ainsi que d'autre problématique lier au développement d'une agriculture durable.

La télédétection spatiale offre maintenant une information spatialisée et actualisée concernant la végétation qui renseignent de plus sur le développement réel de la végétation (et non son développement supposé) notamment par le biais d'indices de végétation comme le (NDVI). Cette information est bien corrélée à l'activité photosynthétique des végétaux, elle-même déterminante de l'évapotranspiration (simonneux, 2009).

Notre travail vise à

- trouver la relation entre le K_c et le NDVI en trouvant la fonction $K_c=f(\text{NDVI})$ pour aboutir à la formule : $ET_c = f(\text{NDVI}) \times ETP$
- la création des cartes de la productivité de l'eau en utilisant les données disponibles au niveau des portails open source telle que le WaPOR, ces carte vont nous aider a bien analyser la situation actuelle de notre zone d'étude relatif à la gestion de l'irrigation et qui vise a trouvez les modalités efficace pour l'amélioration de la productivité de l'eau.

LA PREMIERE PARTIE

SYNTHESE

BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 : L'IRRIGATION DANS LES ZONES ARIDES**1. Agriculture en zone aride ou « l'aridoculture »**

L'agriculture en zone aride est une spéculation liée aux conditions écologiques (climatiques et édaphiques) de la zone aride, cette activité comme ailleurs, a des impacts sur les ressources naturelles de la région, ressources connues comme fragiles y compris la composante eau souterraines qui constitue un facteur limitant à l'existence où à la durabilité de l'agriculture en zones arides. On estime à l'heure actuelle qu'environ 40% des terres émergées de la planète sont arides, soit 5,2 milliards d'hectares, sur les quelles vivent plus de 2 milliards de personnes. L'Afrique contient 37% de zones arides. En Algérie, ces dernières représentent près de 95% du territoire national, dont 80% dans le domaine hyper aride. (Halitim, 2011). Au fil du temps, les sociétés humaines, dans les régions arides, ont développé des systèmes qui leur permettent de vivre, de s'établir et de développer une économie orientée vers la valorisation du patrimoine locale tout en préservant l'agro-écosystème à travers « le modèle oasien ». Le développement de l'agriculture dans les régions arides est conditionné impérativement par la pérennité des ressources en eau et leur possibilité d'utilisation dans le temps (Laib, 2014)

1.1. L'évolution de l'agriculture saharienne

L'agriculture saharienne est caractérisée par un système oasien, basé essentiellement sur la culture du palmier dattier. Les autres spéculations étaient pratiquées à des fins d'autoconsommation et de quelques échanges commerciaux au niveau des marchés locaux. Pendant les vingt dernières années, un vaste processus de transformation et de réformes structurelles a permis de faire émerger des expériences et des pratiques nouvelles, ainsi qu'un certain nombre de stratégies économiques et sociales. L'Etat est considéré depuis quelques années un véritable vecteur du processus de modernisation de l'agriculture des zones arides et semi-arides du Sud algérien, soutenant techniquement les exploitations du secteur privé, les producteurs de l'agriculture de rente ainsi que les offices de mise en valeur. L'avènement de la mise en œuvre de la loi relative à l'Accession à la Propriété Foncière Agricole (APFA) en 1983, a permis un accroissement substantiel de la base matérielle de production et l'apparition de nouveaux systèmes reposant sur des techniques performantes en l'occurrence la plasticulture orientée essentiellement vers la commercialisation. Dans ce contexte, les activités de recherche et de développement relatives au maraichage ont été définies, aussi bien pour les cultures sous serre que celles de plein champ (ITDAS, 2013 cité par Laib, 2014)

1.2.L'irrigation en zones arides

L'irrigation consiste à approvisionner les cultures en eau par des moyens artificiels, en vue de permettre l'agriculture dans les zones arides et de compenser les effets de la sécheresse pour assurer une dynamique agricole et garantir une production stable. Et cela par la mise en valeur des eaux souterraines puisse être dans certaines zones un aspect important du développement de la petite agriculture, il est rare que l'eau souterraine soit une ressource renouvelable dans les terres arides

La nouvelle dynamique installée dans les zones saharienne et notamment dans la région de Biskra consiste au reconversion des système d'irrigation traditionnelle consommatrice d'eau par des systèmes économiseurs d'eau telle que l'aspersion et l'irrigation localisée aussi bien pour la filière phoeniciculture ainsi que les autres cultures conduites en intensif y compris la plasticulture et la céréaliculture. Car ces zones nécessitent une rénovation de leur technique d'irrigation sachant que l'agriculture pluviale est quasi impossible.

2. Eau et l'agriculture dans les régions sahariennes

Le Sahara Algérien couvre une superficie de plus de deux millions de kilomètres carré et s'étend de l'Atlas saharien et des Aurès jusqu'au frontières Maliennes, Nigériennes et libyenne, soit une distance de plus de deux milles kilomètres (Nord-sud). L'aridité du milieu caractérisé par un climat désertique avec des températures élevés, une forte évaporation et une grande intensité des vents accompagnés le plus souvent de sable et par une très faible pluviométrie. Toutes ces conditions rendent impossible d'envisager toute pratique de culture sans irrigation (Ould rebai 2005).

2.1. La détermination des besoins en eau des cultures

Dans un premier temps, la détermination des besoins en eau d'une culture nécessite la connaissance de divers paramètres concernant, aussi bien la plante elle-même que les données climatiques ou pédologiques de la région.

Selon (Doorenbos et Pruitt, 1975 cité par Boudjelel, 2006) le climat est l'un des facteurs qui influe le plus sur le volume d'eau que la culture perd par évapotranspiration. Les pratiques agronomiques, les techniques d'irrigation, les engrais, les infestations dues aux insectes et aux maladies peuvent aussi influencer le taux d'évapotranspiration.

La détermination de l'évapotranspiration au niveau de la parcelle doit se faire soit par des méthodes expérimentales ou par des modèles empiriques. La méthode expérimental nécessite du matériel couteux et parfois elle nécessite une certaine maîtrise pour aboutir à des résultats fiable. A coté de ces méthodes expérimentales de mesure, plusieurs méthodes (modèles) d'estimation ont été développées pour la détermination de l'évapotranspiration à l'échelle locale pour une surface homogène (en termes de culture, de conditions édaphiques et météorologiques). On s'intéressera surtout à l'approche analytique de Penman-Monteith ainsi qu'aux approches empiriques (méthode du coefficient cultural, modélisation du bilan hydrique), ne nécessitant souvent que quelques mesures basiques pour leurs applications (Diarra, 2017)

2.1.1. Pourquoi on détermine les besoins en eau des cultures ?

Connaître la valeur des besoins en eaux des cultures est à la base de :

- ✓ projet d'irrigation : conception des réseaux d'irrigation (calcul du débit de dimensionnement des ouvrages),

- ✓ gestion des réseaux d'irrigation : prévision à court terme (programmation des apports d'eau),
- ✓ pilotage des irrigations,
- ✓ planification de l'utilisation des ressources hydrauliques : volume d'eau nécessaire pour l'irrigation, surfaces irrigables au vu des ressources, etc.
- ✓ l'amélioration de la productivité de l'eau.

2.2. Comment déterminer les besoins en eau des cultures?

D'après (Doorenbos et Pruitt, 1975) l'estimation de l'évapotranspiration en vue de la programmation de l'irrigation doit se faire en se fondant sur le calcul de l'évapotranspiration maximale et de la pluie efficace (Pe) généralement négligé dans les zones aride.

2.2.1. Besoin en eau d'irrigation

Le besoin d'irrigation, noté (BI) est défini comme étant le volume d'eau qui devra être apporté par irrigation en complément à la pluviométrie et éventuellement d'autres ressources telles que les remontées capillaires (l'apport d'une nappe phréatique), la réserve en eau initiale dans le sol, et la fraction de lessivage (lorsque la salinité influe sur la disponibilité en eau pour les plantes). Le calcul de ces besoins d'irrigation repose sur un bilan hydrique, qui exprime la différence entre les besoins en eau de la culture et les apports d'eau d'origine naturelle, donné par la formule :

$$BI = \frac{(ETc - Pe - Ac - \Delta S)}{(1 - LR)}$$

Avec :

BI : besoin d'irrigation (mm),

ETc : évapotranspiration de la culture (mm),

Pe : précipitation efficace (mm), calculée en retirant à la précipitation totale les pertes par ruissellement ou par percolation profonde,

Ac : ascension capillaire (mm), due aux flux ascensionnels à partir des eaux souterraines,

ΔS : variation de la réserve d'eau du sol (mm), différence entre les quantités d'eau disponible dans la zone racinaire au début et à la fin de la saison végétative,

LR : fraction de lessivage.

BI étant un besoin net, pour calculer la quantité réelle d'eau à apporter à la culture il faut tenir compte des efficacités de transport, de distribution et d'application de l'eau. Si on considère une efficacité globale, produit entre les 3 efficacités décrites, les besoins brut en eau d'irrigation

(BI_{brut}) est :

$$BI_{brut} = BI / eff$$

Où eff : l'efficacité d'irrigation, exprime le rapport entre la hauteur d'eau d'irrigation effectivement requise par la culture et celle qu'on doit prélever à la source.

Pour arriver à calculer les besoins d'irrigation il faut connaître d'abord les besoins en eau maximales des cultures (ETm).

2.2.2 Besoin en eau de la culture (ETM)

En matière d'irrigation, on cherche à placer les plantes dans des conditions de production optimales et on base l'irrigation sur la valeur de l'évapotranspiration maximale (ETM) qui est une valeur ponctuelle liée à l' ET_0 qui est relative à une région par un coefficient cultural, donnée par la formule de base de l'approche climatique :

$$ETM = K_c \times ETP$$

ETM : évapotranspiration maximale d'une culture (mm),

K_c : coefficient cultural,

ETP : évapotranspiration potentiel (mm).

2.2.3. Choix du coefficient cultural

2.2.3.1. Définition des coefficients culturaux

On appelle coefficient cultural d'une culture irriguée, le rapport $K_c = ETM/ETP$

Pour une culture donnée, le coefficient cultural K_c varie avec

- Le stade végétatif
- La variété
- La densité de plantation
- Le climat

K_c est plus élevé sous des climats chauds, venteux et secs que sous des climats frais, calmes et humides (C.T.G.R.E.F, 1979).

Et on peut définir le coefficient cultural (K_c) aussi comme le rapport entre l'évapotranspiration de la culture (ET_c) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), il intègre les effets des 4 caractéristiques primaires qui distinguent une culture de la culture de référence qui sont : la hauteur de la culture, la résistance de surface sol - végétation, l'albédo, l'évaporation de sol (FAO, 1998)

Les facteurs qui influent sur la valeur de K_c sont : les caractéristiques de la culture, les dates de plantation ou de semis, le rythme de son développement et la durée de son cycle végétatif, les conditions climatiques, en particulier au début de la croissance et la fréquence des pluies ou des irrigations.

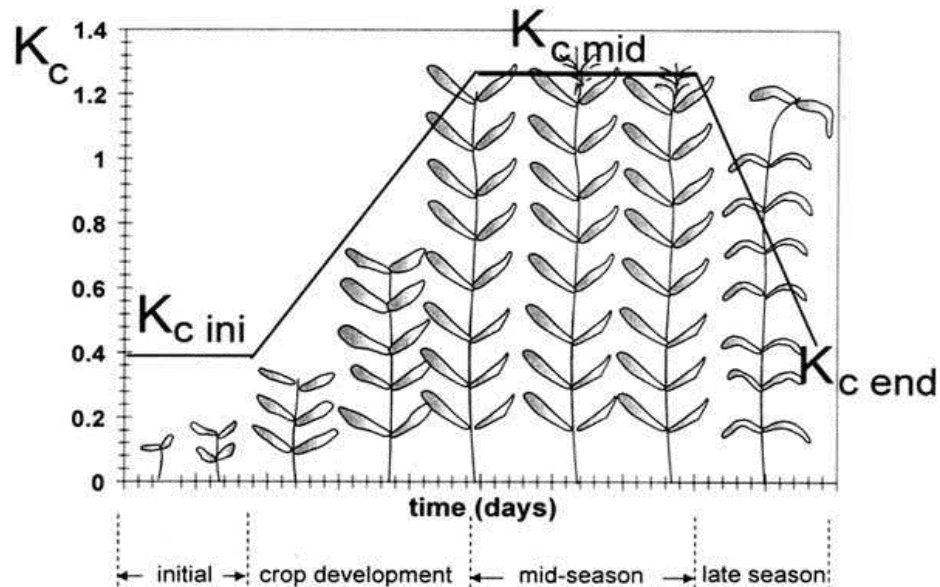


Figure 01 : Courbe des coefficients culturaux et définition des phases végétatifs

(Doorenbos et Pruitt, 1975)

La courbe du K_c sur l'ensemble de la période de croissance a été présentée initialement par Doorenbos et Pruitt (1975). Elle permet de distinguer les 3 valeurs de K_c (initial, mi-saison, et d'arrière saison).

En choisissant le K_c approprié pour une culture donnée et pour chaque mois du cycle végétatif, il faut tenir compte du rythme de son développement, l'époque de plantation ou de semis, les conditions climatiques notamment le vent et l'humidité, et également la particularité de la formule utilisée pour le calcul de l'ETP, ce qui pose un problème d'harmonisation et d'utilisation des valeurs publiées dans la littérature. Et généralement les valeurs du K_c disponible dans la bibliographie et qui s'appliquent sur des large zones ou territoire ne reflètent pas la réalité du terrain à cause de la variabilité spatio-temporelle des paramètres cité ci-dessus.

le K_c varie essentiellement avec les caractéristiques propres de la culture et seulement un peu avec le climat. Cela permet le transfert des valeurs standard de K_c (comme celles proposées dans les Bulletins FAO-24 et 56) d'un endroit à l'autre entre les zones climatiques. Mais pour avoir plus de précision dans la détermination de l'ETC, il est toujours préférable d'utiliser les valeurs de K_c déterminés expérimentalement dans la région elle-même.

2.2.4. Les méthodes d'estimation de l'ETP

L'ETP est considérée comme une donnée climatique, ne dépend que des conditions atmosphériques, de l'énergie disponible à la surface évaporant et la résistance aérodynamique de couvert végétal. Ils existent des méthodes empiriques variables qui ont été développées depuis ces 50 dernières années pour estimer indirectement cette grandeur à partir de données climatiques. Elles sont classées en 4 groupes selon les paramètres utilisés, parmi ces formules on peut citer :

- Les formules combinées :

- de Penman originale (1963),
- de FAO Penman-Monteith (1994) « la plus utilisé dans le monde ».
- Les formules basées sur la température :
 - Blaney-Criddle (1950),
 - Turc,
 - Jensen-Haise,
 - Hargreaves,
 - Thornwaite.
- Les formules basées sur la radiation :
 - FAO-Radiation,
 - Christiansen - Hargreaves (1969),
 - Christiansen – Samani (1985).
- Les formules basées sur l'humidité relative de l'air :
 - d'Ivanov (1954),
 - d'Eagleman (1967),
 - FAO Class A.

2.2.4.1 La formule de l'FAO de PENMAN – MONTEITH :

La formule de Penman-Monteith se distingue parmi les différentes formules par son origine théorique dérivée du bilan de flux énergétique à la surface de couvert végétal, dans un souci de normalisation, la FAO, à travers son groupe d'experts opérants dans différents contextes climatiques, a adapté la formule de Penman-Monteith aux conditions d'un couvert de gazon et propose la formule dérivée comme la nouvelle définition de l'évapotranspiration de référence.

L'évapotranspiration de référence peut s'écrire selon la formule (Allen et al, 1994):

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 U_2)}$$

Avec :

ET₀ : évapotranspiration de référence journalière (mm/j),

Rn : rayonnement net à la surface de culture (M J/m²/j),

G : flux de chaleur échangé avec le sol (M J/m²/j),

T : température moyenne journalière (°C),

U₂ : vitesse moyenne journalière du vent mesuré à 2 mètres (m/s),

e_s et e_a : respectivement la pression de vapeur saturante et la pression réelle de l'air à la même hauteur (kPa),

Δ : pente de la courbe de pression de vapeur saturante à la température T (kPa /°C),

γ : constante psychrométrique (kPa /°C),

900 coefficient pour la culture de référence (kg K/ kJ) liées aux unités utilisées a la distribution de variables ρ, c_p et r_a,

0,34 : coefficient de vent pour la culture de référence (kg K/ kJ) résultant des rapports r_s/r_a,

0,408 inverse de λ = 2,45 MJ/ kg.

CHAPITRE 02 ; LA TELEDETECTION ET L'AGRICULTURE

1. Définition de la télédétection

La télédétection se définit de plusieurs manières, mais l'une des définitions les plus utilisées est celle fournie par le Centre Canadien de la Télédétection. « La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'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 enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information. ». Pour l'acquisition, des images des capteurs imageurs actifs ou passifs sont embarqués dans les satellites. Pour « obtenir » les images, un capteur passif utilise l'énergie solaire réfléchie (visible) ou absorbée et retransmise (infrarouge thermique) par la surface observée alors qu'un capteur actif se sert de la rétrodiffusion du signal radar qu'il a émis sur la surface qu'il observe. La Figure 2 ci-dessous illustre le processus d'acquisition d'image par un satellite qui utilise un capteur passif (satellite optique). (Bah, 2016)

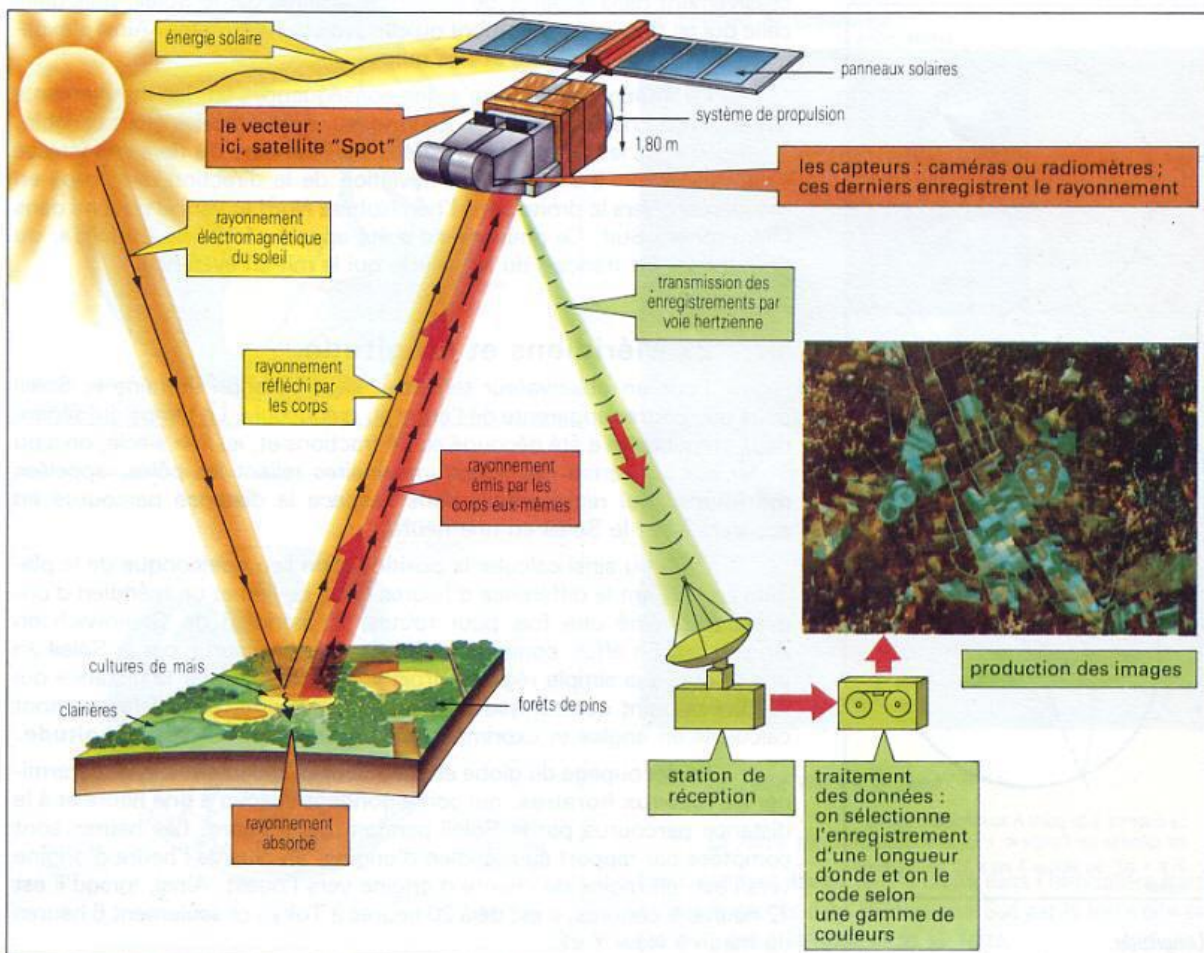


Figure N° 2: Processus d'acquisition de l'information par les satellites optiques
(<http://www.alertes-meteo.com/geographie/teledetection.php>)

Le spectre électromagnétique se décompose en plusieurs régions, en fonction de leurs longueurs d'onde, dont certaines sont exploitables en télédétection (Figure 03) : – le visible

qui s'étend de 0.4 à 0.7 μm et contient les trois couleurs fondamentales de la synthèse additive (le rouge entre 0.6 et 0.7 μm , le vert entre 0.5 et 0.6 μm , le bleu entre 0.4 et 0.5 μm) ; – le proche infrarouge (PIR) de 0.7 à 1.5 μm ;– le moyen infrarouge (MIR) de 1.5 à 3 μm ;– l'infrarouge thermique de 3 à 15 μm ; – les hyperfréquences de 1 mm à 1 m.

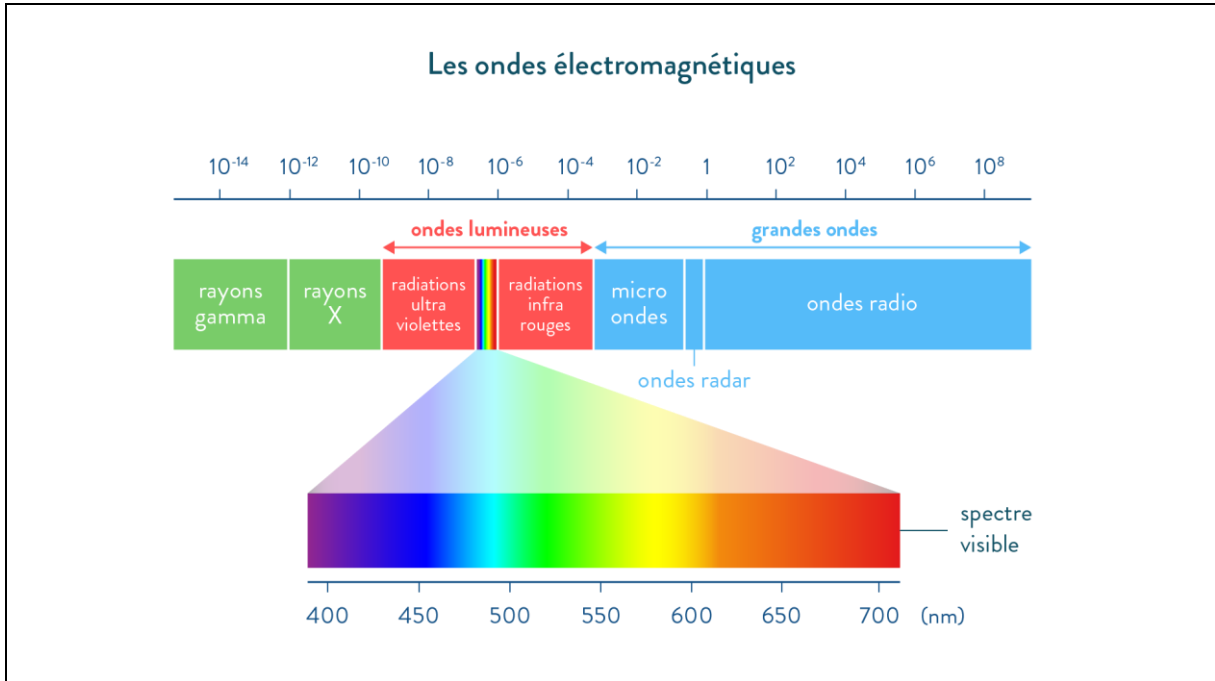


Figure N° 03 : la décomposition du spectre électromagnétique (www.schoolmoov.fr)

2. L'histoire et l'utilité de la télédétection

2.1 L'histoire de la télédétection

La télédétection moderne est née de la photographie aérienne, dont la vue générale et verticale a modelé nos habitudes d'inventaire, de cartographie et de surveillance de l'environnement et des ressources depuis plus d'un siècle. Elle intègre les développements les plus récents de la recherche spatiale, de la physique et de l'informatique pour constituer aujourd'hui un outil des plus puissants et des plus flexibles pour la gestion du milieu, la planification et le développement économique.

La télédétection devint possible le jour du premier vol en ballon en 1783. Cet événement historique, jumelé à l'invention de la plaque photographique permet de prendre, en 1858, la première photographie aérienne de Paris. C'est le point de départ de tout un cheminement qui jettera les bases de la télédétection contemporaine. Grâce aux nombreux développements survenus dans le domaine de l'aviation depuis le début du xxe siècle, il était désormais possible de sillonner le ciel et d'obtenir une vision d'ensemble de notre milieu. Parallèlement, de nouveaux capteurs sont développés. Dès 1855, le physicien Maxwell envisage la possibilité de réaliser des photographies en couleurs basées sur trois surfaces respectivement sensibles aux trois couleurs fondamentales : le rouge, le vert et le bleu. La première pellicule couleur est mise au point en 1895, mais il a fallu attendre jusqu'en 1935 la sortie du premier film couleur commercial par la société Kodak.

Jusqu'à l'avènement de l'aviation, la perception que nous avons de notre environnement était limitée. Dans un premier temps, la photographie aérienne a donc surtout apporté un autre point de vue, une vision plus globale de notre milieu, mais sans étendre le spectre des couleurs que nous pouvions percevoir. Pourtant, les physiciens savaient depuis plusieurs années déjà que la lumière est une onde électromagnétique dont nos yeux n'ont qu'une perception très limitée. Ce que nous appelons rayons X, ultraviolet, lumière visible, infrarouge et micro-ondes ne sont que des manifestations différentes d'une même famille d'ondes qui ne diffèrent que par la fréquence (ou la longueur d'onde), de la même manière qu'une lumière jaune diffère d'une lumière rouge (Ferdinand Bonn, 1994).

L'exploration des domaines non visibles a connu une histoire presque parallèle à celle du visible, puisque le rayonnement infrarouge a été découvert par Herschel en 1800. On a commencé à pouvoir le mesurer en 1880 et ce n'est qu'en 1931 qu'a été mis au point le premier film sensible au proche infrarouge pour l'armée américaine. Il a fallu attendre 1942 pour que celui-ci soit commercialisé et 1960 pour que l'on commence à l'utiliser pour l'étude de la végétation (Ferdinand Bonn, 1994).

Les applications de la télédétection qui se font dans le cadre de systèmes d'information géographique permettent de combiner les données de télédétection à toute une gamme d'informations diverses. Par exemple, pour prévoir et cartographier l'érosion dans un bassin versant, il faut combiner des données météorologiques et topographiques, des données sur la végétation, sur les types de sol et sur les pratiques agricoles dans un système où la modélisation et les scénarios sont possibles. Seule une portion des données est dérivée directement des images de télédétection, mais cette portion est indispensable à l'identification des secteurs d'intervention prioritaires pour les gestionnaires de la conservation des sols.

2.1.1. De l'avion au satellite

À partir de 1960, on a assisté à l'apparition des photographies à haute altitude à partir de ballons ou d'avions comme les U2, puis de photographies obtenues à partir de plates-formes orbitales comme les capsules MERCURY, GEMINI et APOLLO. La série de photographies multibandes obtenues par APOLLO-9 est particulièrement intéressante parce qu'elle annonce en quelque sorte la configuration spectrale du satellite ERTS-1, lancé le 23 juillet 1972 et rebaptisé ultérieurement LANDSAT-1. C'est vraiment LANDSAT qui a lancé la télédétection à l'échelle internationale, en offrant à des coûts raisonnables une grande quantité de données numériques. Ces données ont aussi permis le développement des systèmes de traitement numérique des images (Ferdinand Bonn, 1994).

2.2 Télédétection et modélisation de l'évapotranspiration

La gestion de l'irrigation passe par la connaissance du terme d'évapotranspiration (le terme prépondérant des échanges SVA). La mesure de l'évapotranspiration peut être effectuée de façon ponctuelle et directe en se basant par exemple sur l'évapotranspiromètre, le lysimètre, le bac d'évaporation, la covariance turbulente..., mais ces mesures expérimentales ne sont

représentatives que d'une zone ne dépassant pas le kilomètre, En outre, elles sont difficiles à maintenir pour des mesures en routine et sont, pour certaines, coûteuses à l'achat. Les facteurs qui conditionnent les échanges SVA (type de culture, bilan radiatif au dessus de la culture, la température de surface et de l'air, l'humidité de l'air, le vent, les caractéristiques du sol...) sont pourtant spécifiques à chaque parcelle, entraînant une forte variabilité spatiale de ces échanges. Du fait du nombre important de processus mis en jeu et de leur complexité, le recours aux modèles numériques est une nécessité absolue. Un modèle est une représentation mathématique des processus biophysiques régissant le fonctionnement des surfaces. Les modèles numériques décrivent de manière simplifiée les Transferts d'énergie et de matière qui s'opèrent entre le Sol, la Végétation et l'Atmosphère (on parle de modélisation de type TSVA pour Transferts Sol-Végétation-Atmosphère) (Diarra, 2017).

L'estimation de l'évapotranspiration par télédétection optique et thermique a fait l'objet de nombreuses approches méthodologiques ces trente dernières années. Nous pouvons retenir trois catégories de modèles : (Hamimed, 2014)

- Ceux utilisant des relations semi-empiriques simples permettant de relier l'évapotranspiration journalière à une mesure instantanée de température de surface (Seguin et Itier, 1983). L'intérêt de ces modèles est de contourner trois problèmes : 1/ l'estimation des longueurs de rugosité de surface (intervenant dans le flux de chaleur sensible), 2/ l'absence de mesure en continu des températures de surface et 3/ l'estimation du flux de chaleur conductif dans le sol qui est négligeable à l'échelle journalière. Toutefois ils présentent des limites liées à la mauvaise représentativité spatiale de la température de l'air, mesurée localement, et à la difficulté de prise en compte de l'hétérogénéité d'une surface.
- Ceux utilisant des relations déterministes s'appuyant sur une description détaillée des sols et des couverts végétaux (EZZAHAR et al., 2012 ; MUZYLEV et al., 2010 ; OLIOSO et al., 1999). Ces modèles sont souvent qualifiés de type "Transfert Sol-Végétation Atmosphère (TSVA)". Ils ne dépendent pas des données de télédétection pour leur mise en œuvre. Cependant ils peuvent être employés en combinaison avec ces données, en utilisant des procédures d'assimilation (OLIOSO et JACOB, 2002). Ces modèles permettent de simuler les transferts de masse et d'énergie entre le sol, la végétation et l'atmosphère à des échelles de temps inférieures à l'heure, en accord avec la dynamique des processus 199 atmosphériques et de surface. Ils ont l'inconvénient d'être très complexes à mettre en œuvre, car ils nécessitent souvent la connaissance d'un nombre important de paramètres, difficiles à estimer, se prêtant mal à l'intégration spatiale et auxquels ils peuvent être très sensibles.
- Ceux permettant d'éviter les principaux écueils des deux précédents, tout en conservant leurs avantages respectifs. Ils tiennent compte des phénomènes physiques lorsque cela est possible, et s'appuient sur des formulations empiriques dans le cas contraire (JACOB, 1999).

Chaque modèle a ses propres spécificités qui dépendent principalement de leur contexte d'application. Les développements actuels ont pour objectif de mieux prendre en compte la

complexité du milieu étudié, c'est à dire la végétation et ses interactions avec son environnement (sol et atmosphère). De nombreux efforts sont également consacrés à une meilleure description des échanges hydriques dans le sol. Cependant, une description plus précise du milieu étudié se traduit généralement dans la modélisation par la prescription d'un nombre plus important de paramètres. L'estimation de ces paramètres peut s'avérer délicate. Généralement, ils sont entachés d'incertitudes faute de moyens mis en œuvre, d'erreur de mesures ou de paramètres non directement mesurables et sujets à des problèmes de variabilités spatiale et temporelle. Ceci a alors pour conséquence de limiter les modèles complexes à une application à l'échelle locale et de conduire à une mauvaise estimation et à des dérives temporelles des variables simulées. (Diarra, 2017).

Ainsi, une approche combinant les mesures expérimentales ponctuelles à la modélisation et la télédétection spatiale multi-capteurs et multi-résolution représente la meilleure option possible afin d'apporter des éléments scientifiques pour la gestion de l'eau agricole, sur de larges superficies en prenant en compte les variabilités de surface. Au cours de cette décennie, plusieurs approches ont été développées afin de bénéficier de l'apport de la télédétection (optique et thermique) en agriculture, on peut citer entre autres:

- l'utilisation pour pouvoir effectuer des plans de ferme, utiles pour les mesures de superficies et des potentiels de rendements
- la détection des anomalies dans le développement des cultures. En comparant les images de la saison en cours aux saisons précédentes. Ceci permet aux agriculteurs de voir l'impact des pratiques culturales.
- l'exploration des relations qui existent entre les mesures électromagnétique de télédétection et certaines variables biophysiques spécifiques à la culture (la surface foliaire, la température de la végétation...) ou au sol (l'humidité, la température du sol...). L'information recueillie par les capteurs spatiaux est une grandeur électromagnétique qu'il convient de rendre utile au thématiciens.

3. Mesurer les changements (télédétection et phénologie)

L'une des applications majeures de la télédétection est le suivi des processus advenant sur la planète. Les images peuvent être utilisées pour analyser des processus de court terme, par exemple pour observer le cycle de Croissance de certaines cultures en vue d'évaluer les rendements d'une récolte donnée. On analyse alors des images satellitaires prises à différentes étapes du cycle au cours de l'année, notamment: préparation des sols, ensemencement, établissement des plants, croissance active, floraison, fructification et murissement des fruits ainsi que la récolte.

Les images peuvent aussi servir à étudier des processus de moyen et long terme. Les analyses de la dégradation des forêts et des changements d'affectation des terres représentent des exemples majeurs d'application de cette approche. Il est en effet possible de comparer des images issues d'années différentes. Ces images doivent être prises à la même période de l'année, de façon à réduire au maximum l'expression de variables telles que la qualité de la lumière, la géométrie de l'observation et, dans le cas d'écosystèmes végétaux, les différences

de comportement d'une communauté au cours de l'année (Singh, 1986; Mouat *et al.*, cité par Chuvieco, 1998).

3.1. L'indice de végétation normalisé NDVI

Il existe diverses méthodes permettant d'étudier les changements saisonniers de végétation à travers des images satellite, l'une d'entre elles consistant à appliquer des indices de végétation associés à l'intensité de vert (Chuvieco, 1998 in Thomas, 2004). Le NDVI est une mesure du bilan entre l'énergie reçue et l'énergie émise par les objets sur la Terre. Lorsqu'il est appliqué à des communautés végétales, cet indice établit une valeur mesurant l'intensité de vert d'une zone donnée, c'est-à-dire indiquant la masse de végétation présente dans celle-ci, ainsi que son état de santé ou sa vigueur de croissance. Le NDVI est un indice sans dimension, aussi sa valeur est-elle comprise entre -1 et +1. Dans la pratique, les valeurs situées en dessous de 0,1 correspondent aux étendues d'eau et aux sols nus, tandis que les valeurs plus élevées indiquent une forte activité de photosynthèse, propre aux terres arbustives, aux forêts tempérées, aux forêts humides et aux terres agricoles.

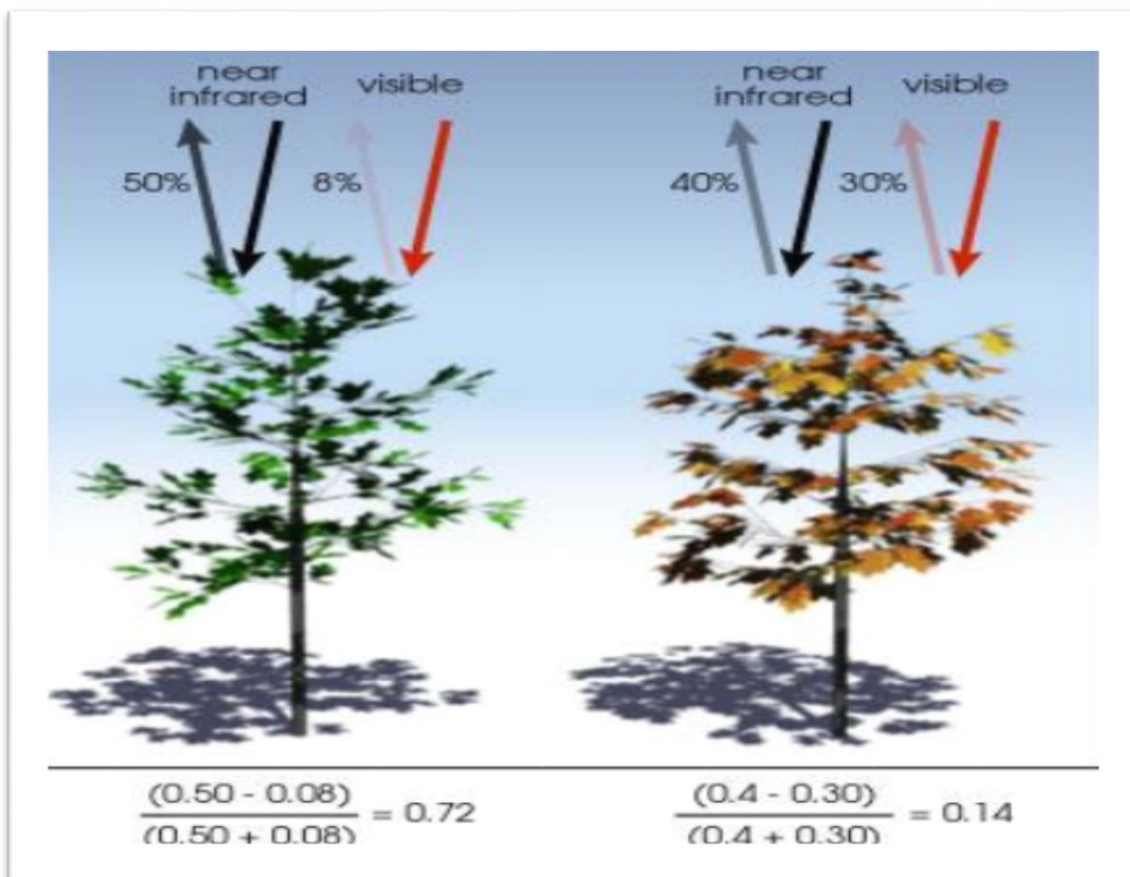


Figure N° 04: NDVI de la végétation saine et stressée. La différence entre la réflectance rouge (ici appelée visible) et la réflectance NIR est plus grande dans une végétation saine, ce qui conduit à un NDVI plus élevé. (Source : earthobsarvatory.nasa.gov)

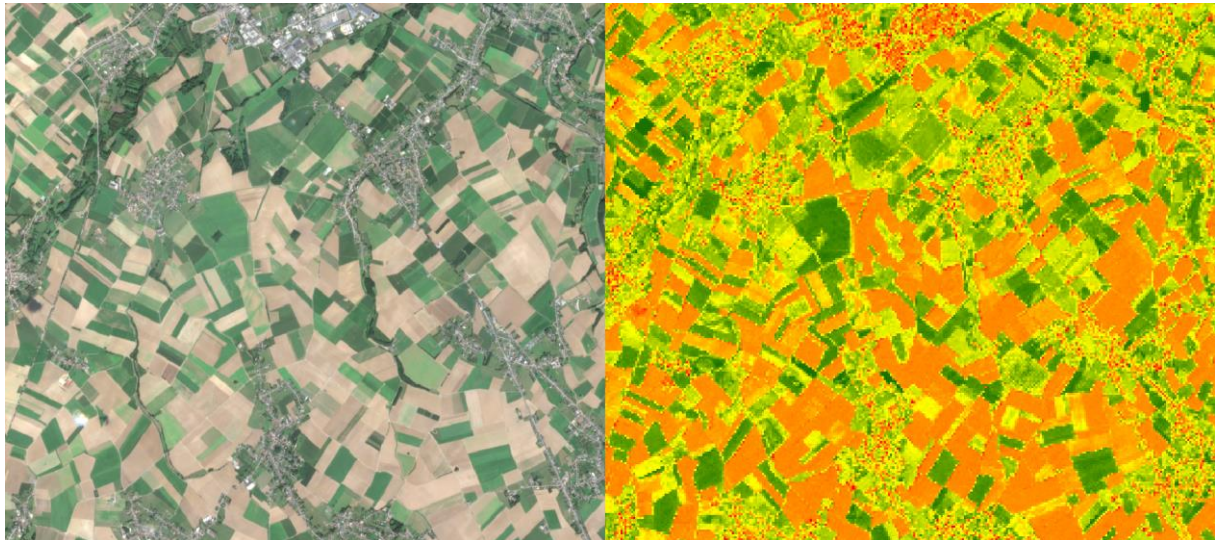


Figure N° 05 : Vue satellitaire des cultures (Couleurs vraies et NDVI)

(<https://www.quadratic.be/lindice-ndvi-dans-lagriculture>)

3.2. Indice de végétation amélioré (EVI)

L'indice de végétation amélioré (EVI) est un indice de végétation " optimisé " conçu pour améliorer le signal de la végétation avec une sensibilité améliorée dans les régions à forte biomasse et un meilleur suivi de la végétation grâce à un découplage du signal de fond de la canopée et une réduction des influences de l'atmosphère. L'EVI est calculé selon cette équation:

$$EVI = \frac{G \times (NIR - ROUGE)}{(NIR) + (C1 \times ROUGE) - (C2 \times BLEU) + L}$$

Où

G = facteur de gain (2,5)*

C1 = coefficient de résistance aux aérosols (6)*

C2 = coefficient de résistance aux aérosols (7,5)*

L = ajustement du fond du couvert forestier (1)*

*Valeurs normalement utilisées, provenant de l'algorithme MODIS-EVI

Alors que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est sensible à la chlorophylle, l'EVI est plus sensible aux variations structurelles de la canopée, y compris l'indice de surface foliaire (LAI), le type de canopée, la physiologie des plantes et l'architecture de la canopée. Les deux indices de végétation se complètent dans les études mondiales sur la végétation et améliorent la détection des changements de végétation et l'extraction des paramètres biophysiques de la canopée

Une autre différence entre l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et EVI est qu'en présence de neige, le NDVI diminue, tandis que l'EVI augmente (Huete, 2002) À côté du NDVI et l'EVI qui sont des estimations de l'activité photosynthétique chez les plantes, d'autres aspects de la végétation peuvent également être estimés grâce à des indices.

3.3. Indice de teneur en eau par Différence Normalisée (NDWI)

L'indice d'eau par différence normalisée (NDWI) est un indice communément utilisé pour montrer les plantes touchées par le stress hydrique car il est fortement corrélé à la teneur en eau des plantes et, par conséquent, un bon indicateur du stress hydrique de la végétation. Ainsi, il peut être utilisé pour reconnaître le stress hydrique dans les premiers stades et éviter les dommages sur les cultures (Gao, 1996). En appliquant fréquemment cet indice, la gestion de l'eau peut être améliorée. L'indice est calculé de la même manière que le NDVI. Cependant, il ne repose pas sur la différence entre la bande NIR et la bande ROUGE, mais sur la différence entre la bande NIR et la bande SWIR 1.

Le **NDWI** est calculé comme suit :
$$\frac{(NIR - SWIR1)}{(NIR + SWIR1)}$$

Les valeurs vont de -1 à +1. La végétation à haute teneur en eau indique des valeurs élevées. À l'inverse, la végétation à faible teneur en eau et une faible couverture végétale indiquent des valeurs faibles.

CHAPITRE 03 : ETUDE DE LA REGION

1. Présentation de la wilaya de Biskra

La wilaya de Biskra est issue du découpage administratif de 1974 et elle englobe actuellement 12 daïras et 33 communes. La wilaya est située au centre-est de l'Algérie aux portes du Sahara. Le Chef lieu de la wilaya est située à 400 km au Sud-est de la capitale, Alger. La wilaya s'étend sur une superficie de 21 671 km

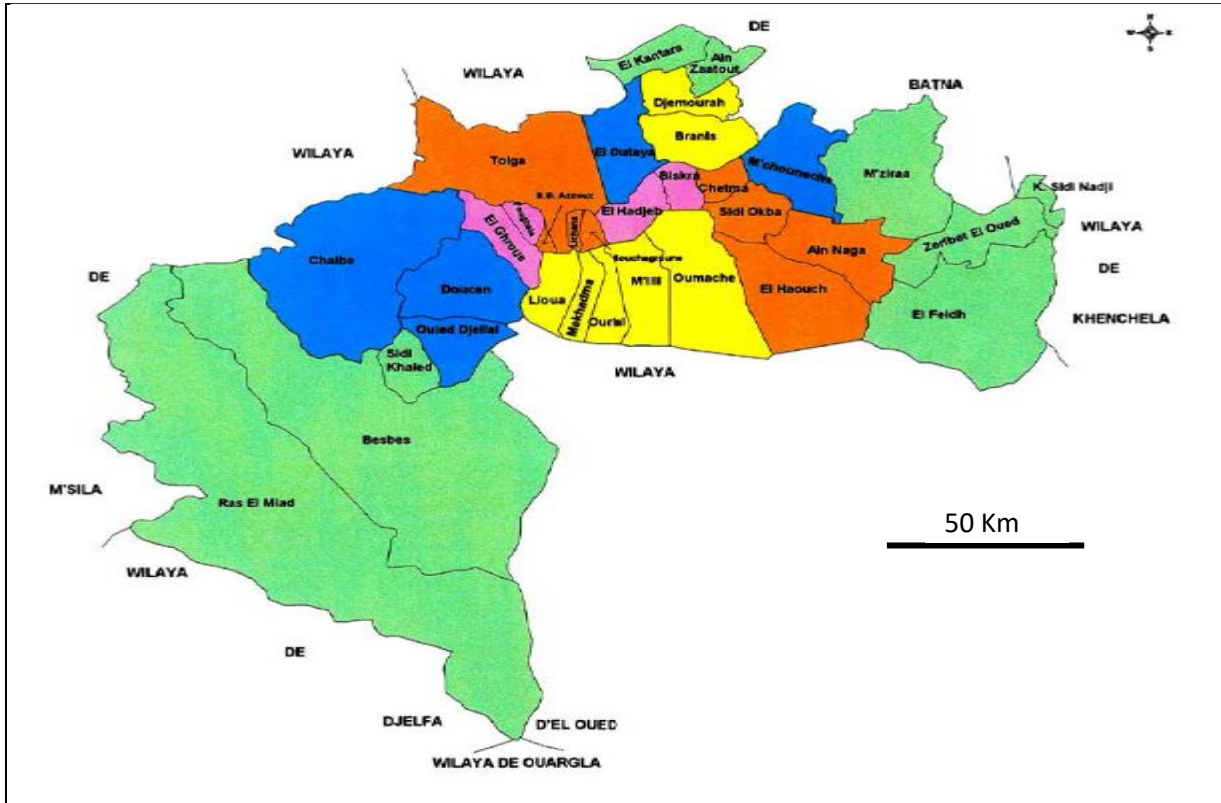


Figure N° 06 : Découpage administrative de la wilaya de Biskra (monographie de la Wilaya de Biskra 2017)

1.2.1 Situation géographique et administrative

La wilaya de BISKRA se situe dans une zone charnière entre le Tell et le Sahara, son chef lieu se situe sur :

- la latitude : 34° 48 33 N
- la longitude : 5° 44 E
- l'altitude : 82 m (station météo de l'aéroport ONM)

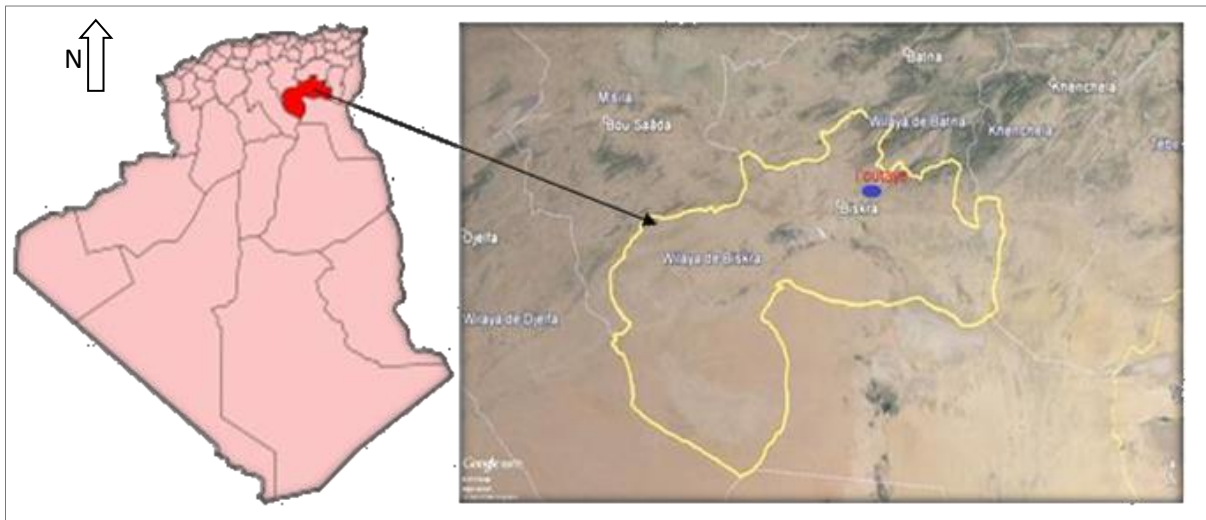


Figure N° 07: Carte de la situation géographique de la wilaya de BISKRA (via google earth)

La wilaya de BISKRA est limitée par les wilayas suivantes :

- Batna au Nord.
- M'Sila au Nord- Ouest.
- Khenchela au Nord- est.
- Djelfa, et El Oued au Sud.

1.2. Relief

La wilaya de Biskra constitue la transition entre les domaines atlasiques plissés du Nord et les étendues plates et désertiques du Sahara au Sud. On passe d'un relief assez élevé et accidenté au nord à une topographie de plateau légèrement inclinée vers le Sud. Le relief de la wilaya de Biskra est constitué de quatre grands ensembles géomorphologiques (Anonyme, 2003 cité par Boucetta, 2018).

1.2.1. Les montagnes

Situées au Nord de la wilaya, elles sont généralement dénudées de toute végétation naturelle. au Nord se découpent plusieurs chaînes atlasiques, dont l'altitude maximale peut aller jusqu' à 1500 m et dont la moyenne est de l'ordre de 300 m (Boucetta, 2018)

1.2.2. Les plateaux

Localisés en grande partie à l'Ouest de la wilaya, ils s'étendent sur une superficie de 1210848 hectares (soit 56% de l'étendue de la wilaya). La végétation des plateaux maigre constitue des sites privilégiés de parcours.

1.2.3. Les plaines

Occupant la partie centrale de la wilaya de Biskra, et couvrent la quasi-totalité des Daïra d'El-Outaya et Sidi-Okba, et la commune de Doucen.

1.2.4. Les dépressions

Situées au Sud-Est de la wilaya, elles constituent une assiette où se forment des nappes d'eau très minces constituant ainsi les chotts dont le plus important est le chott Melghir dont le niveau peut atteindre -33m au dessous de celui de la mer.

1.2.3 - Le sol

L'étude morpho analytique des sols de la région de Biskra montre l'existence de plusieurs types de sols. D'après des études pédologiques réalisées par (Khachai 2001 cité par Boucetta 2018), les sols de la wilaya de Biskra présentent les caractéristiques suivantes:

- La région du Sud, sont surtout caractérisées par les accumulations salées, gypseuses et calcaires.
- La région Est, sont définies par les sols alluvionnaires et les sols argileux fertiles.
- La région Nord (ou zones de montagne) sont le siège de la formation des sols peu-évolués et peu fertiles.
- Enfin, la plaine située au Nord-Ouest de Biskra où les sols argileux-sodiques sont irrigués par les eaux fortement minéralisées qui constituent le caractère de la pédogénèse de cette région.

1.3. Climatologie

Le climat saharien est caractérisé notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, une luminosité intense, une forte évaporation et de grands écarts de température (Ozenda, 1991). Nous notons par ailleurs, que les données utilisées pour caractériser l'état climatique de notre région d'étude émanent de l'ONM (Office National de Météorologie) de la station sise à l'aéroport de Biskra.

1.3.1. La pluviométrie

La pluie est parmi les facteurs les plus importants en raison de l'influence bénéfique ou néfaste qu'elle exerce sur l'agriculture. Dans la région, la pluviométrie est insignifiante, en plus des faibles quantités de précipitations annuelles s'ajoute a une grande irrégularité dans la distribution. En effet, aucune agriculture n'est possible sans irrigation (Laib, 2014). Le régime des précipitations dans la région d'étude est consigné dans le tableau N°01.

mois	jan	fév.	mar	avr	mai	jui	juil	at	sep	oct	nov	déc	total
P (mm)	20.6	12.1	13.9	16.1	11.3	7.9	1.7	4.3	15.9	17.1	16	13.9	150.8

Tableau N°1 : Précipitations moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018 (ONM)

Il ressort du tableau N° 01 que le total des précipitations annuelles dans la région de Biskra est très faible et caractérisé par une irrégularité remarquable avec maximum de sècheresse qui a été enregistré durant le mois de juillet avec une pluviométrie de 1.7 mm par contre durant le mois le plus arrosé (octobre), elle est de 17.1 mm

1.3.2. La température

La température est le second facteur après la précipitation qui conditionne le climat d'une région (Laib, 2014). La région de Biskra est caractérisée par des fortes températures pouvant atteindre une moyenne annuelle de 22,7 °C. Les mois les plus chauds durant la période (1989-2018) sont Juin, Juillet et Août présentant respectivement une moyenne mensuelle de 31.1°C, 34,4°C et 33.8°C. Les mois les plus froids sont le mois de Décembre avec 13 °C, le mois de Janvier avec 12°C et le mois de février avec 13,8 °C. A titre illustratif, le tableau N° 2 montre les températures moyennes mensuelles dans la zone de Biskra.

Mois	J	fev	mar	avri	Mai	juin	juil	aout	sept	oct	nov	dec	Moy annuel
T mx	17	19.1	23.2	26.8	32.4	37.5	40.8	40	34.7	29	22.2	17.9	28.4
T mn	6.8	8.2	11.5	15.2	20	24.7	27.9	27.7	23.4	18.2	12	8.1	17
T my	12	13.8	17.4	20.7	26.2	31.1	34.4	33.8	28.9	23.6	17.1	13	22.7

Tableau: 2 - Températures moyennes mensuelles de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018(ONM).

1.3.3 Le vent

C'est un phénomène continu au désert où il joue un rôle considérable en provoquant une érosion intense grâce à la particule sableuse qu'il transporte en contrepartie une sédimentation également importante qui se traduit par la formation des dunes (Ozenda.1983). ainsi qu'il est l'un des facteurs qui augmente l'évapotranspiration qui contribue à dessécher l'atmosphère. Les données sur la vitesse moyenne du vent pour la région d'étude au cours de la période 1989-2018 sont consignées dans le tableau suivant:

mois	jan	fév.	Mar	avr	Mai	jui	juil	aout	sep	oct	nov	déc	moy
Vitesse de vent (m/s)	4	4.6	4.9	5.5	5.2	4.6	4.0	3.7	3.9	3.8	4.0	3.7	4.3

Tableau: 3 - Vitesse moyenne mensuelle du vent de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018(ONM).

La vitesse maximale du vent a été enregistrée au cours du mois d'avril avec une moyenne de 5.5m/s. Par contre, la minimale a été relevée en mois d'aout et décembre avec 3.7 m/s.

1.3.4. Humidité relative

Les données caractérisant l'humidité relative de l'air de la région de Biskra au cours de la période allant de 1989 à 2018 sont reportées sur le tableau n°04.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Déc.	moy
H (%)	56.7	49	43.9	39.2	33.6	29.5	26.4	30.6	40.1	47.7	53.6	59	42.3

Tableau: 4 - l'humidité moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018(ONM).

La lecture du tableau ci- dessus montre que le mois de décembre est le plus humide avec 59% par contre le taux d'humidité le plus faible est noté en Juillet avec 26.4%

1.3.5. Insolation

L'insolation est un facteur important dans la mesure où il influence directement le degré d'activité végétative des cultures. Etant donné la forte intensité de ce facteur dans la région, il peut fort bien favoriser l'installation des primeurs et procurer tout au moins quelques jours de précocité (khadraoui, 2007).

Dans le tableau N° : 5, nous avons présenté les données concernant l'insolation réelle moyenne mensuelle de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018.

Mois	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Moy
I (h et 1/10h)	224.2	223.4	262.6	285.8	320.8	331.6	356.6	326.7	270	246.9	220.6	217.8	273.9

Tableau N° 5 : La somme de l'insolation réelle mensuelle moyenne de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018(ONM).

Le nombre moyen mensuelle d'heures d'insolation est de 273.9h, le phénomène est régulier passant d'un minimum en décembre de 217.8 heures à un maximum en Juillet de 356.6 heures.

1.3.6 - Synthèse Climatique

La synthèse climatique consiste à déterminer la période sèche et la période humide par le biais du diagramme ombrothermique de Gaussen ainsi que l'étage bioclimatique des régions d'étude grâce au climagramme pluviométrique d'Emberger.

1.3.6.1 Diagramme Ombrothermique de Gaussen

Le diagramme ombrothermique de GAUSSEN met en évidence la notion des saisons humide et sèche. La figure N° 08 présente en abscisse les mois et en ordonnée les températures (T) et les précipitations (P) ayant une échelle double pour les premières tel que $P = 2 T$. GAUSSEN considèrent qu'il y'a une sécheresse lorsque les précipitations mensuelles exprimées en millimètres sont inférieures au double de la température moyenne mensuelle exprimée en degrés Celsius (Dajoz, 1971).

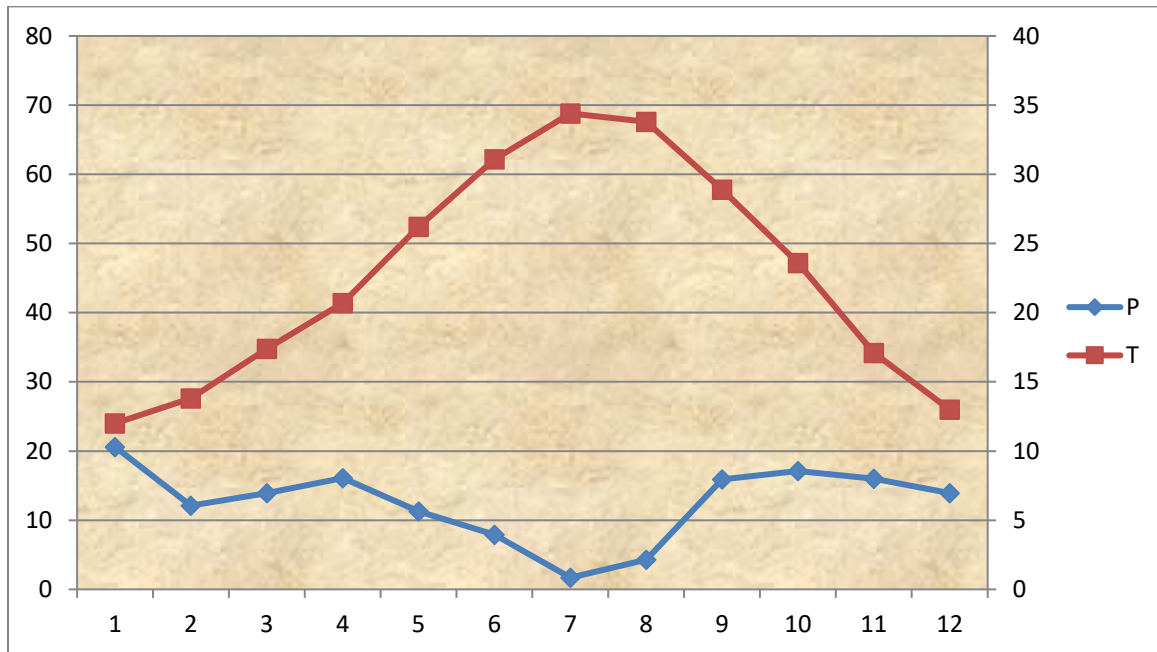


Figure N° 08 : Diagramme ombrothermique de Gausson de la région de Biskra durant la période 1989 – 2018 (ONM).

L'analyse du diagramme montre que la période sèche dans la région de Biskra durant la période 1989 à 2018 s'étale sur toute l'année, elle est plus accentuée en été.

1.3.6.2. Climagramme D'emberger

La formule du quotient pluviométrique d'Emberger et qui a été modifiée par STEWART (1969) et est comme suit: $Q2 = 3,43 (P/ M - m)$

- ✓ P est les précipitations annuelles en mm.
- ✓ M est la moyenne des températures maximales du mois le plus chaud.
- ✓ m est la moyenne des températures minimales du mois le plus froid.

Pour une approche bioclimatique de la région de Biskra durant la période de 1989 à 2018, la valeur de ce quotient est de **15.21** où **P** est égal à 150.8 mm; **M** à 40,8 °C et **m** à 6.8 °C

En rapportant cette valeur sur le climagramme d'Emberger (Fig. 09) nous trouvons que la région de Biskra se situe dans l'étage bioclimatique saharien et se caractérise par des précipitations faibles, de fortes températures, une grande luminosité et une évaporation intense.

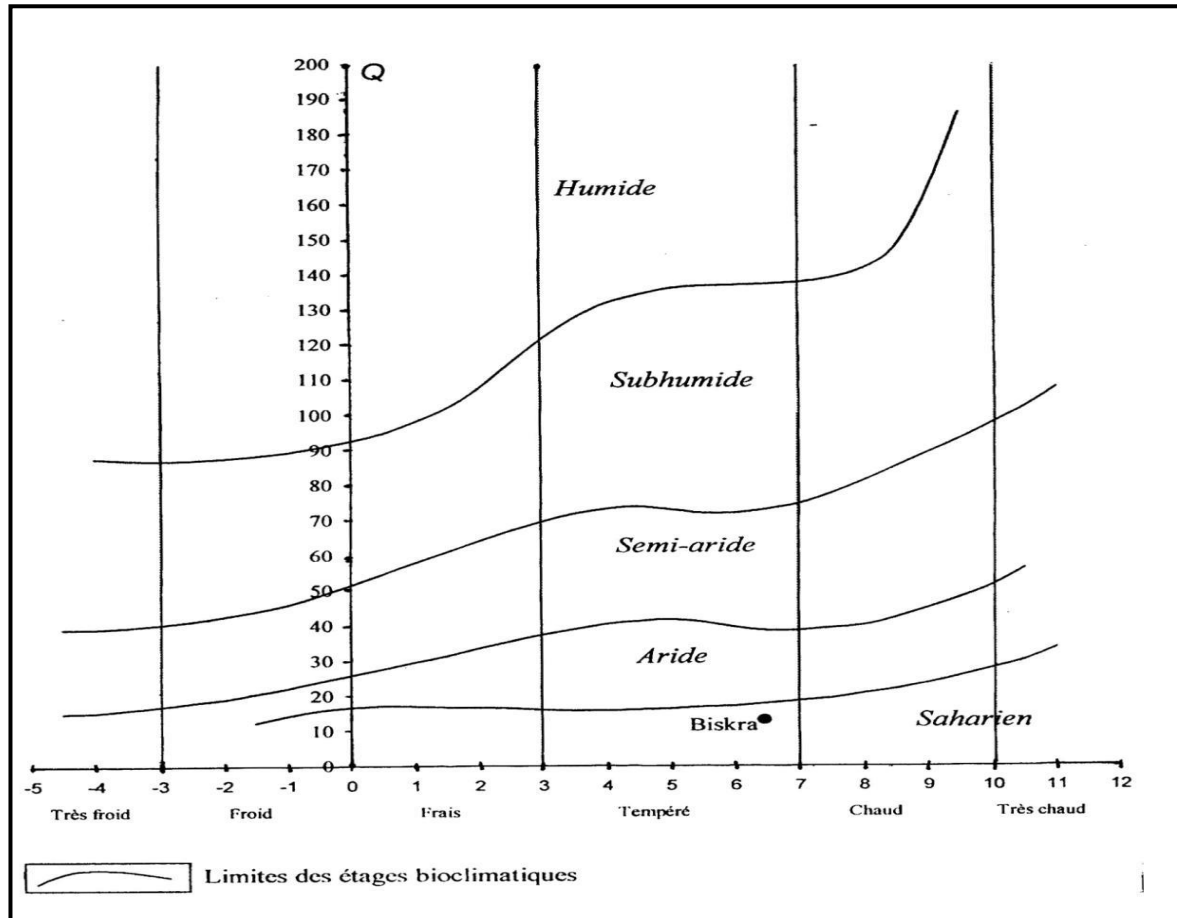


Figure N° 09 : Localisation de la région de Biskra sur le climagramme.

1.4. Les ressources en eaux

La Wilaya de Biskra, située dans une zone charnière entre le Tell et le Sahara, jouit sur le plan hydrique d'un double avantage: les eaux superficielles du nord (Aures, Atlas tellien) qui quadrillent la quasi-totalité du territoire de la wilaya (Oued Biskra, Oued Djeddi, Oued El Arab, Oued Al Abiod), et les eaux souterraines du Sahara septentrional (CI-CT) en plus de la nappe phréatique. (DRE BISKRA, 2014).

1.4.1. Eaux superficielles

Dans la région de Biskra on trouve deux grands barrages pour le stockage de l'eau :

1.4.1.1 Barrages de Fontaines des gazelles ;

Mis en service en 2000, il irrigue le grand périmètre d'irrigation (GPI) de M'kinet dans la commune d'el Outaya sur une superficie de 1137 hectares, ainsi que des terres Arches.

1.4.1.2 Barrage de Fom El Gharza ;

Il irrigue environ 130 000 palmiers dans la commune de Sidi Okba. La capacité du barrage est 17.5 millions de m³, avec un volume régularisable de 9 millions de m³ par an. (DRE Biskra 2014)

1.4.2. Eaux souterraines

La wilaya de Biskra présente plusieurs réservoirs aquifères d'importance bien distincte de part leur constitution lithologique, leur structure géologique et les facilités d'exploitation qu'ils présentent, ces aquifères ont pour étage géologique

- le Mio-Plio quaternaire
- le Pontien
- L'Eocène inférieur
- Le sénonien
- Mæstrichtien
- Turonien
- Albo – Barrémien

1.4.2.1. Nappes des sables:**1.4.2.1.1. Mio- plio- quaternaire**

Constitué d'une alternance de sable, argile, graviers et galets, elle couvre une grande superficie de la wilaya, et elle est fortement exploitée. Cette nappe présente un système très hétérogène représenté par des couches de diverses perméabilités, la profondeur est de 100 à 300 m, et les débits extraits moyen de l'ordre de 15l/s.

1.4.2.1.2. Pontien

A l'Est de la wilaya de Biskra, une nappe sableuse épaisse et profonde située au dessous du mio - pliocène, cette nappe est désignée sous le nom de Pontien, profondeur de 700 à 900 m, et le débit extrait est de l'ordre de 10 à 15 l/s

1.4.2.2. Nappes des calcaires :**1.4.2.2.1. Nappe d'Eocène inférieur:**

Cette nappe est constituée essentiellement de calcaires fissures d'âge Eocène inférieur, elle est la plus sollicitée dans les palmeraies de Ziban, la profondeur varie de 100 m à 500 m, les débits sont de l'ordre de 10 à 30 l/s.

1.4.2.2.2. Nappe de sénonien

Elle est en continuité hydraulique avec l'éocène inférieur dans la partie Nord-Ouest de la wilaya, par contre dans la zone D'Oumache et M'lili une épaisse couche de marne et marno - calcaire sépare les deux nappes d'où la profondeur importante du sénonien (900 m) et des débits jaillissants de 20 à 30 l/s.

1.4.2.2.3. Nappe du maestrichtien et turonien

Au Nord et au Nord Est de la wilaya la nappe des calcaires est représentée par un aquifère très important qui est le maestrichtien et le turonien (nappe peu exploitée) les profondeurs sont de 100 ml à 400 ml, et les débits de l'ordre de 10 à 30 l/s

1.4.2.2.4 Nappe albienne et barrémienne (Continental intercalaire)

C'est un réservoir très important constitué essentiellement de grés et de Marne d'age Albien et barrémien d'une profondeur de 1600 à 2400 ml et un débit moyen de 80 l/s jaillissant, la température de l'eau peut dépasser 60°. Cette nappe est exploitée dans la wilaya par 19 forages. (ANRH Biskra 2014)

1.5. Qualité des eaux destinées a l'irrigation

La salinité du sol et de l'eau constitue le problème majeur dans beaucoup de pays du monde. Selon DUBOST (1994) cité par MASMOUDI (2012), au Sahara les eaux contenant moins de 0.5g de sels peuvent être considérées comme exceptionnelles et celles de moins de 1g parfaites pour la consommation humaines. Jusqu'à 2g ce sont des eaux d'irrigation de qualité excellente pour l'irrigation. Entre 2 et 5g, il s'agit d'eaux salées et au dessus de 5 g on peut dire qu'elles sont très salées. Leur effet sur le sol et les végétaux est d'autant plus nocif que leur utilisation est mal étudiée.

D'autre part, la demande de l'eau douce est constamment en augmentation pour différentes utilisations compétitives (domestique, agriculture, industrie) ce qui créer un besoin crucial d'utilisation de l'eau salée en agriculture (MASMOUDI, 2012)

Le recours à l'utilisation de l'eau salée devient de plus en plus une nécessité absolue vu l'absence ou la rareté des ressources d'eau douce dans certaines régions (MASMOUDI, 2011)

Le manque d'eau de bonne qualité constitue désormais une contrainte majeure lorsque l'on veut créer de nouveaux périmètres irrigués (CHEVRY, 1995). L'eau salée sera utilisée en plus à l'avenir à cause de développement de la demande de l'eau d'irrigation (VAN HOORN, 1991 in MASMOUDI, 2011) .

1.6. Données générales sur le secteur d'irrigation de la wilaya

1.6.1. Évolution des superficies irriguées 2010/2018 (la plus récente)

Wilaya	Sup irrig 2010 (ha)	Sup irrig 2011 (ha)	Sup irrig 2012 (ha)	Sup irrig 2013 (ha)	Sup Irrig 2014 (ha)	Sup irrig 2015 (ha)	Sup irrig 2016 (ha)	Sup irrig 2017 (ha)	Sup irrig 2018 (ha)
Biskra	98433	100680	102503	104079	105920	108622	109500	111170	116964

Tableau N°06; L'évolution des superficies irriguées 2010/2018 (Source; DSA Biskra, 2018)

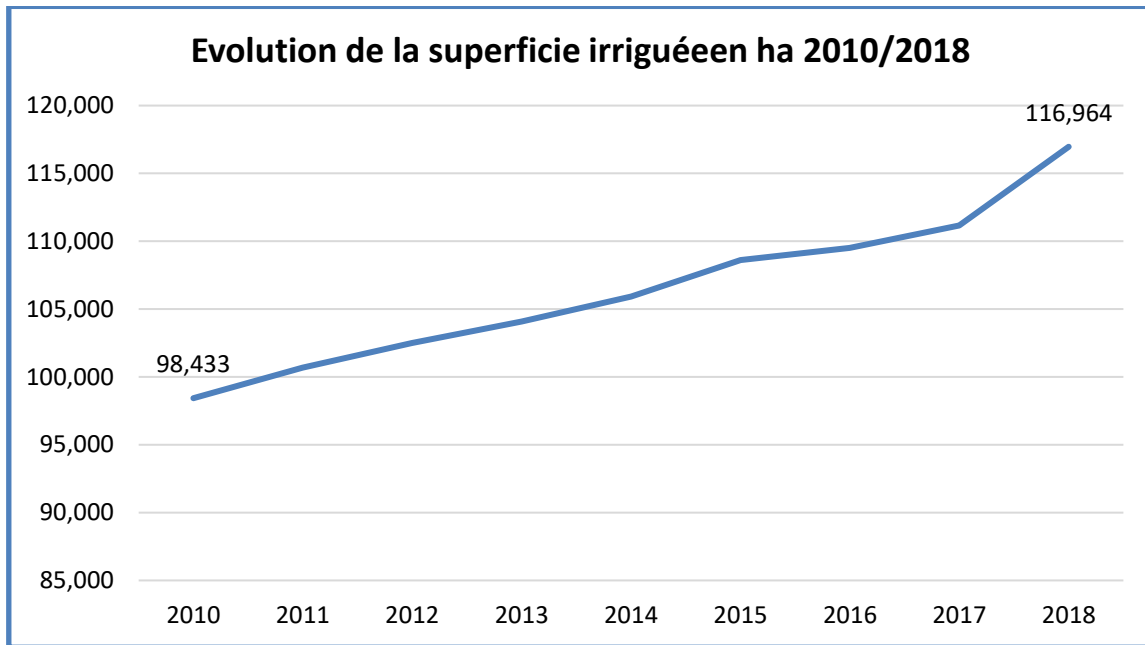


Figure N° 10 : Schéma représentatif de l'évolution de la superficie irriguée de la Wilaya de Biskra du 2010 au 2018

1.6.2. La répartition des superficies irriguées par système d'irrigation

Systèmes d'irrigation	Gravitaire	aspersion	pivots	Goutte à goutte	total
Superficie (ha)	59269	1565	749	55381	116 964
Pourcentage	51 %	≈ 1 %	≈ 1 %	47 %	100 %

Tableau N°07 : La répartition des superficies irriguées par système d'irrigation (Source ; DSA Biskra 2018)

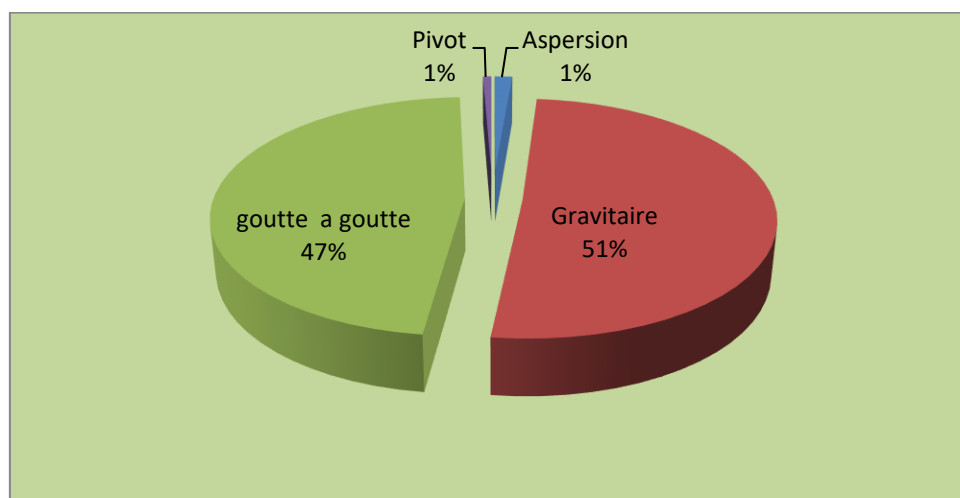


Figure N°11; La répartition des SAI par système d'irrigation (DSA Biskra, 2018)

On remarque dans le tableau N° 07 et la figure N°11 que la majorité des terres sont irrigués par les systèmes traditionnels (51 %) et les systèmes économiseurs d'eau occupent (49 %) avec (47 %) goutte à goutte, 1 % aspersion par des kits classique et (1 %) par des pivots.

Ces chiffres nous confirment que l'irrigation dans la wilaya de Biskra consomme beaucoup d'eau en se référant aux statistiques réalisées par les services de la DRE qui indiquent que les eaux destinés à l'irrigation présentent 89 % des ressources en eaux disponibles par contre celles destinées à l'alimentation par l'eaux potable présente 10 % et 1 % pour l'industrie.

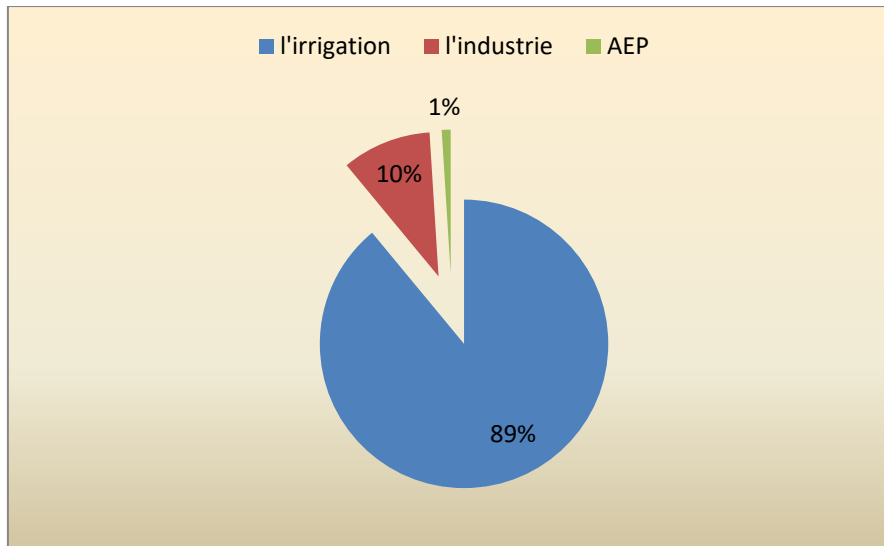


Figure N°12 : La répartition de la consommation en l'eau par secteur dans la wilaya de Biskra (DRE Biskra 2016)

LA DEUXIEME PARTIE

L'EXPERIMENTATION

CHAPITRE 04 : TRAVAUX DE MODELISATION**1. Contexte général et les objectifs de la modélisation****1.1. Contexte général**

La gestion rationnelle de l'eau d'irrigation à l'échelle parcellaire ou à l'échelle régionale revêt une importance primordiale pour satisfaire les besoins en eau de tous les cultures d'une manière durable. L'indisponibilité de l'information ou des données indispensable à la bonne gestion de ces eaux à l'échelle spatiale et temporelle nous oblige à trouver d'autres alternatives plus performantes et plus fiables.

Sur ce, la télédétection spatiale apparaît comme la voie la plus prometteuse en proposant une vision objective, exhaustive et répétitive sur de grandes surfaces. La télédétection qui se base sur l'interaction rayonnement électromagnétique-cible, permet d'accéder à certaines variables clés pilotant le processus d'évapotranspiration. (Moran et al., 1994; Schmugge and Kustas, 1999; Troufleau, 1996; Vidal et al., 1996 cité par Diarra, 2017)

1.2. Objectif de la modélisation

La télédétection spatiale offre maintenant une information spatialisée et actualisée concernant la végétation ainsi que les séries temporelles d'image qui renseignent de plus sur le développement réel de la végétation (et non son développement supposé) notamment par le biais d'indices de végétation comme le (NDVI). Cette information est bien corrélée à l'activité photosynthétique des végétaux, elle-même déterminante de l'évapotranspiration (Simonneaux, 2009).

Notre travail vise à trouver la relation entre le K_c et le NDVI en trouvant la fonction $K_c=f(\text{NDVI})$ et qui sert de sa part de trouver la formule $ET_c = f(\text{NDVI}) \times ETP$ déterminante des besoins en eaux de la culture d'orge

2. Matériel et Méthodes**2.1. Description de la zone d'étude**

Le site expérimental se situe dans la pleine de l'Outaya (wilaya de Biskra) dans le Sud Est Algérien au niveau de l'annexe de la ferme de démonstration et de production de semence **FDPS** qui appartient à l'Institut Technique de Développement de l'agriculture Saharienne **ITDAS** avec les coordonnées géographiques (34° 55' N) et (5° 39' E) et l'altitude de 180 m.



Figure N° 13: Situation géographique du site de l'outaya (la carte via Google)

2.1.1. Les caractéristiques pédoclimatiques de la zone d'étude

2.1.1.1. Le sol

Le sol à une texture argileux limoneuse ayant les caractéristiques suivante (CE=12 dS/m de l'extrais saturé, pH de 8.17 et le calcaire total de 39%) la réserve utile est de l'ordre de 180 mm/m et le taux de la matière organique est de l'ordre de 2%.

Les analyses du sol et la granulométrie ont été faite au niveau du laboratoire de l'institut technique de développement de l'agriculture saharienne (ITDAS).

Granulométrie				
Argile (%)	Limon (%)		Sable (%)	
	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier
34.62	26.23	18.52	20.13	0.50
	44.75		20.63	

Tableau N°08 ; la granulométrie du sol du site expérimental

2.1.1.2. L'eau d'irrigation

Selon la classification des eaux (USDA,1954) , Les eaux du site expérimental sont classés comme des eaux très salée CE >4 ds/m. ces eaux sont pompées à partir d'un forage qui débit 13litre/seconde et proviennent de la nappe mio-pliocène avec une profondeur de 60m.

Les analyses physicochimiques de l'eau ont été faites au niveau du laboratoire de l'institut technique de développement de l'agronomie saharienne, et ils sont récapitulés dans le tableau N°09.

Type	CE (ds/m)	pH	Cations (méq/l)				Anions (méq/l)			
			Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CO ₃ ^{- -}	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ^{- -}
Eau de forage	4.8	7.5	25.4	6.4	7.4	0.06	0.8	5.2	26.5	21.5

Tableau N° 09 ; les caractéristique chimique d'eau utilisé pour l'irrigation

2.2. Méthode de travail

la méthodologie à adopter pour la réalisation de ce travail est comme l'indique l'organigramme illustré dans la figure N° 14 cité ci-dessous ;

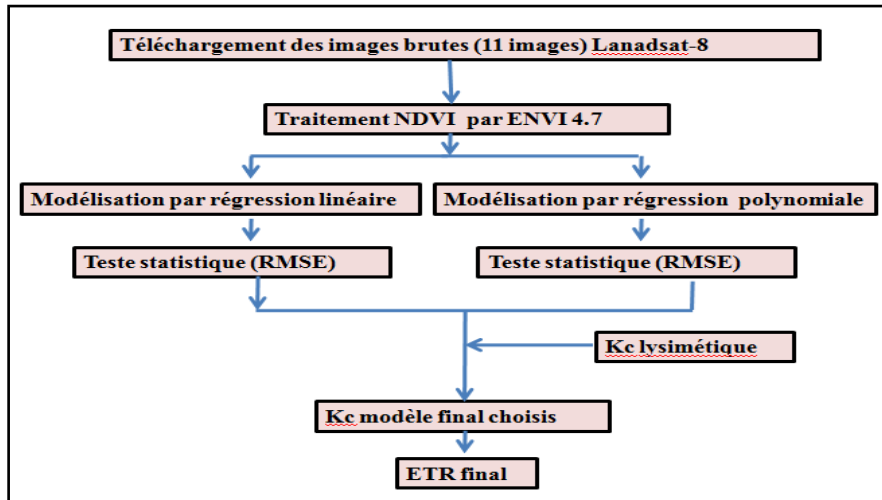


Figure N° 14 ; La méthodologie de travail

Le travail est basé sur le traitement des images satellitaire téléchargés périodiquement chaque 16 jours auprès de **LANDSAT 8 OLI/TIRS C1 level-1** disponible gratuitement sur « USGS earth explorer » de la même zone (Biskra) ou se trouve notre parcelle d'étude durant la période du cycle de l'orge « du novembre jusqu'au mois de juin » pour deux cycle, la saison 2017/2018 et 2018/2019.

La résolution spatiale des pixels et de 30 m, et on les à transformés à 15m en utilisant la méthode du spectral-sharpening (gram-schmidt) en utilisant le logiciel ENVI 4.7

	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Tableau N° 10 ; description technique du satellite landsat 8 OLI/TIRS

La parcelle qui fait l'objet de notre étude est de 05 ha occupée par la culture d'orge (*Hordeum vulgare*), qui sera destiné à l'alimentation du bétail et qui se situe au niveau de la Ferme de Démonstration et de la Production de Semence de l'ITDAS. Cette parcelle est irriguée par le système d'aspersion (poste intégral fixe) qui couvre la totalité de la parcelle.

2.2.1. Données utilisées

2 .1.1.1 Etape 1

Les images ont été téléchargés auprès du site « earthexplorer.usgs.gov » gratuitement durant tout le cycle de l'orge du décembre, jusqu'à la sénescence en mois de mai et le début de juin.

2 .1.1.2. Etape 2

Parmi plusieurs indices de végétation qui existent, l'indice le plus connu et le plus utilisé et l'indice de végétation par différence normalisée NDVI ou indice de tucker (Thomas, 2004) son expression est la suivante ;

$$\text{NDVI} = \frac{\text{PIR} - \text{R}}{\text{PIR} + \text{R}} \quad (\text{Razagui, 2014})$$

PIR = Proche Infra Rouge

R = Rouge

L'indice de végétation est un indicateur de l'activité chlorophyllienne de la végétation, les valeurs de NDVI sont comprises en théorie entre le -1 et +1, les valeurs négatives correspondent aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau et les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieur à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les reflectance sont à près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge.

Les formations végétales quant à elle, ont des valeurs de NDVI positives généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées entre (0,7 et 1) correspondent aux couverts végétaux les plus denses (Kortli, 2013)

Pour le traitement des images satellitaires (format TIFF), chaque image a été traitée séparément par le logiciel ENVI 4,7 pour faire ressortir les valeurs de l'NDVI de chaque image qui correspondent à une période du cycle végétatif.

Les valeurs NDVI ont été calculées à partir des images à ciel clair élaboré sur une période de 16jours

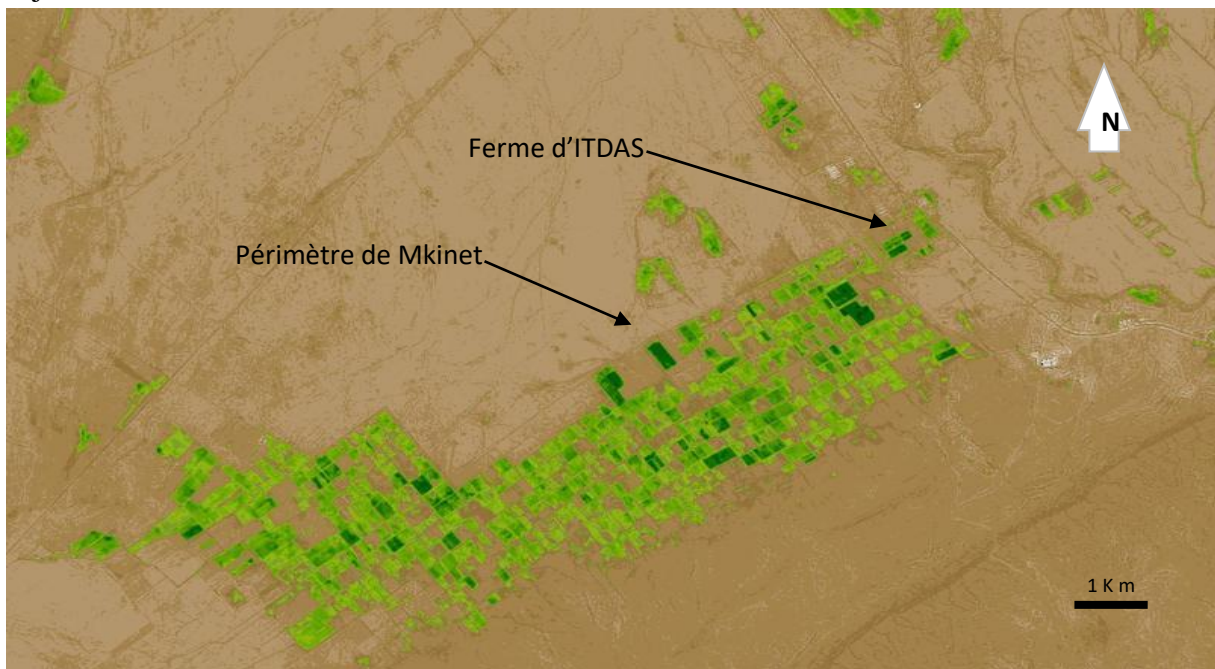


Figure N°15 ; Image satellitaire de la zone d'étude après traitement par ENVI 4.7

Le travail est réalisé dans le but de trouver une relation entre les valeurs du coefficient cultural K_c et les valeurs du NDVI sachant que le K_c est un paramètre déterminant des besoins en eau de la culture ou l'évapotranspiration de la culture ET_c

$$ET_c = K_c \times ETP \quad (\text{FAO, 1998})$$

Pour le calcul d' ET_c , on a besoin d'estimer l' ETP à partir de la station agro météorologique de l'aéroport de la wilaya de Biskra et les données du site (tutempo.fr), et le K_c empirique est estimé à partir du bulletin FAO N° 56 (FAO, 1998)

Le K_c de la culture d'orge change durant le cycle de la culture entre 0,1 et 1,15 selon les stades végétatif de la culture (FAO, 1998)

Le NDVI décrit l'activité photosynthétique du couvert végétal.

Sur ce, notre travail vise à trouver la relation entre le K_c et le NDVI en trouvant un modèle $K_c=f(\text{NDVI})$ qui sert à sa part de trouver la formule

$$ET_c = f(\text{NDVI}) \times ETP$$

2.1.1.2. Etape 3 « L'analyse statistique »

Pour la validation de notre modèle nous avons utilisé un critère qui s'appelle; le RMSE (Root Mean Squar Error ou L'erreur quadratique moyenne) (BARNSTON, 1992)

Cet indice fournit une information sur l'écart moyen entre la prévision et l'observation quelque soit le signe de celui-ci (surestimation ou sous-estimation du modèle). Plus le modèle sera éloigné de l'observation, plus l'erreur aura un impact conséquent sur le résultat de la RMSE.

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est l'écart type des résidus (erreurs de prédiction). Les résidus sont une mesure de la distance qui sépare les points de données de la ligne de régression; Le RMSE est une mesure de l'étendue de ces résidus. En d'autres termes, il indique la concentration des données autour de la ligne du meilleur ajustement. L'erreur quadratique moyenne est couramment utilisée dans les analyses de climatologie, de prévision et de régression pour vérifier les résultats expérimentaux.

La formule est la suivante:

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2}$$

RMSE = Root Mean Squar Error ou L'erreur quadratique moyenne

MSE = Mean Squar Error

\hat{y} = valeurs prédite de y

N = taille de l'échantillon .

Où .:

$$RMSE_{\text{Error}} = \sqrt{1 - r^2} SD_y$$

SD_y = l'écart type de y.

Lorsque des observations et des prévisions standardisées sont utilisées en tant qu'entrées RMSE, il existe une relation directe avec le coefficient de corrélation. Par exemple, si le coefficient de corrélation est égal à 1, le RMSE sera égal à 0, car tous les points se trouvent sur la ligne de régression (et par conséquent, il n'y a pas d'erreur).

3. Résultats de la modélisation

3.1. Les résultats de la première année d'expérimentation 2017/2018

Les tableaux cités ci-dessous montrent la relation entre le Kc empirique et le NDVI dans notre cas d'étude

3.1.1. La régression polynomiale entre le Kc et le NDVI

				Le modèle	
Date	NDVI : x	Kc : y	Kc Modèle	Résidus	Résidu au carré
18/12/2017	0,217	0,1	0,139	0,039	0,002
03/01/2018	0,272	0,2	0,137	-0,063	0,004
19/01/2018	0,535	0,3	0,265	-0,035	0,001
04/02/2018	0,653	0,513	0,398	-0,115	0,013
20/02/2018	0,934	0,725	0,902	0,177	0,031
08/03/2018	0,966	0,938	0,976	0,038	0,001
24/03/2018	1,00	1,15	1,059	-0,091	0,008
09/04/2018	1,00	1,15	1,059	-0,091	0,008
25/04/2018	0,876	0,775	0,776	0,001	0,000
11/05/2018	0,732	0,4	0,513	0,113	0,013
27/05/2018	0,234	0,1	0,137	0,037	0,001
				Moy des carrés des résidus	0,008

Tableau N° 11 ; Résultats du modèle par régression polynomiale pour la saison 2017/2018

Root Mean Square Error		
RMSE (Erreur Quadratique) =		0,087
Le modèle estime très bien le Kc		

Tableau N°12 ; Les résultats du test RMSE (01)

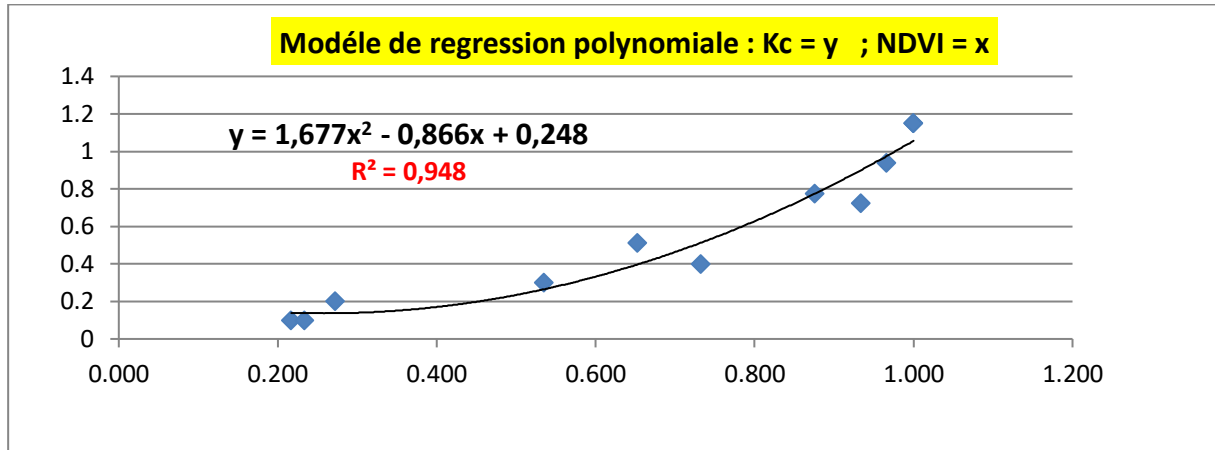


Figure N°16 ; Modèle de régression polynomiale pour la saison 2017/2018

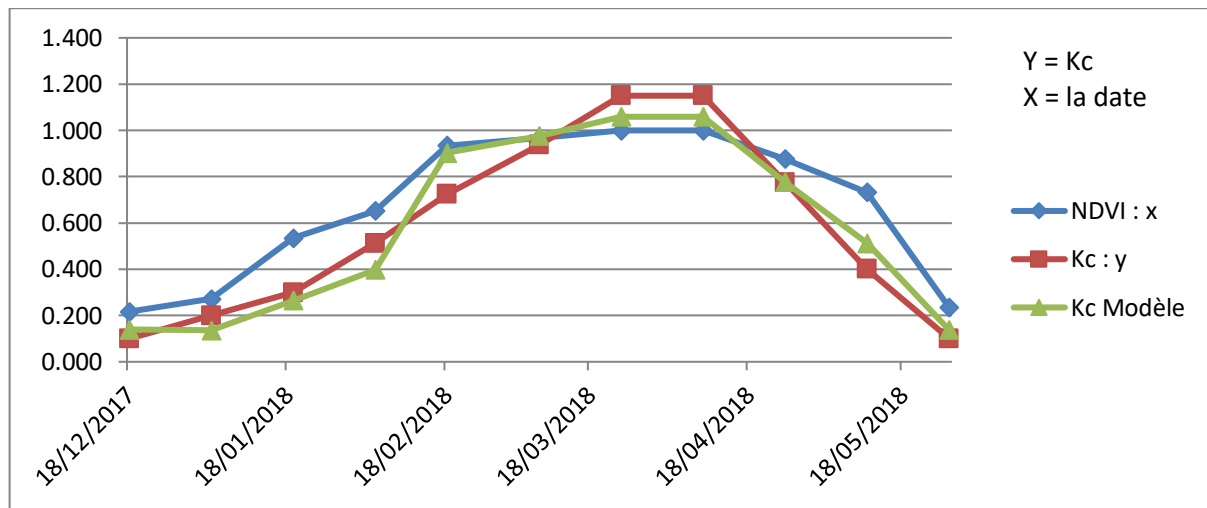


Figure N° 17 ; Illustration de la relation entre le NDVI et le KC pour la saison 2017/2018

3.1.2. La régression linéaire entre le Kc et le NDVI

Le modèle					
Date	NDVI : x	Kc : y	Kc Modèle	Résidus	Résidu au carré
18/12/2017	0,217	0,1	0,041	-0,059	0,004
03/01/2018	0,272	0,2	0,105	-0,095	0,009
19/01/2018	0,535	0,3	0,414	0,114	0,013
04/02/2018	0,653	0,513	0,553	0,040	0,002
20/02/2018	0,934	0,725	0,883	0,158	0,025
08/03/2018	0,966	0,938	0,920	-0,018	0,000
24/03/2018	1,00	1,15	0,960	-0,190	0,036
09/04/2018	1,00	1,15	0,960	-0,190	0,036
25/04/2018	0,876	0,775	0,814	0,039	0,002
11/05/2018	0,732	0,4	0,645	0,245	0,060
27/05/2018	0,234	0,1	0,061	-0,039	0,002
				Moy des carrés des résidus	0,017

Tableau N°13 ; Les résultats de la régression linéaire pour la saison 2017/2018

Root Mean Square Error	
RMSE (Erreur Quadratique) =	0,131
Le modèle estime bien le Kc	

Tableau N°14 ; Résultats du Test RMSE (02)

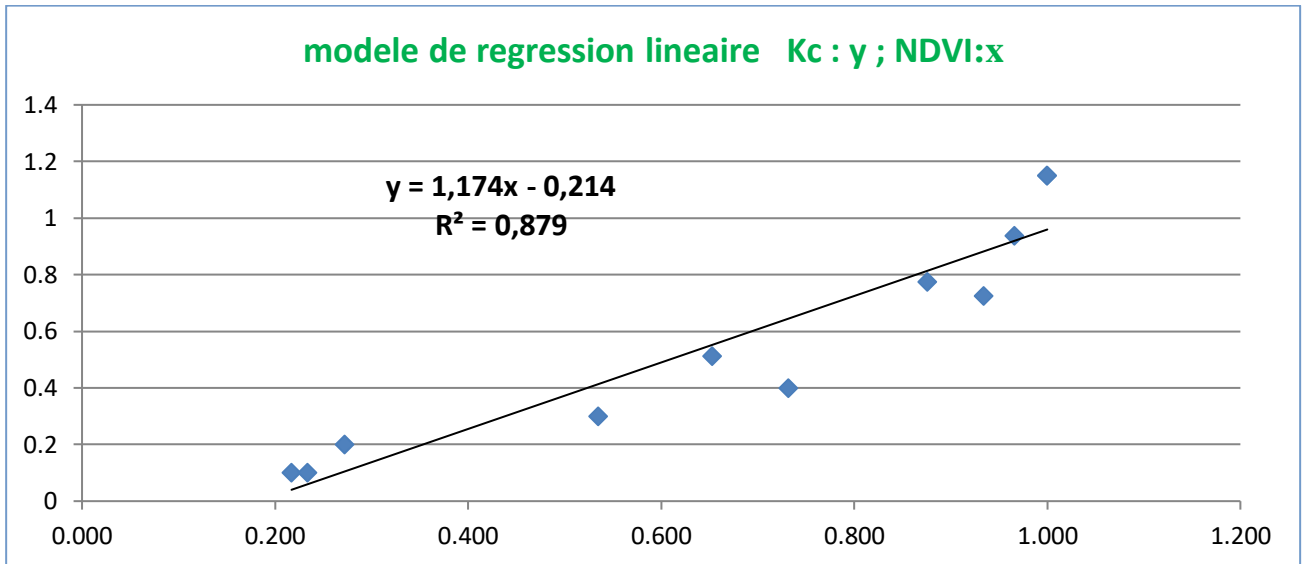


Figure N° 18; Modèle de régression linéaire pour la saison 2017/2018

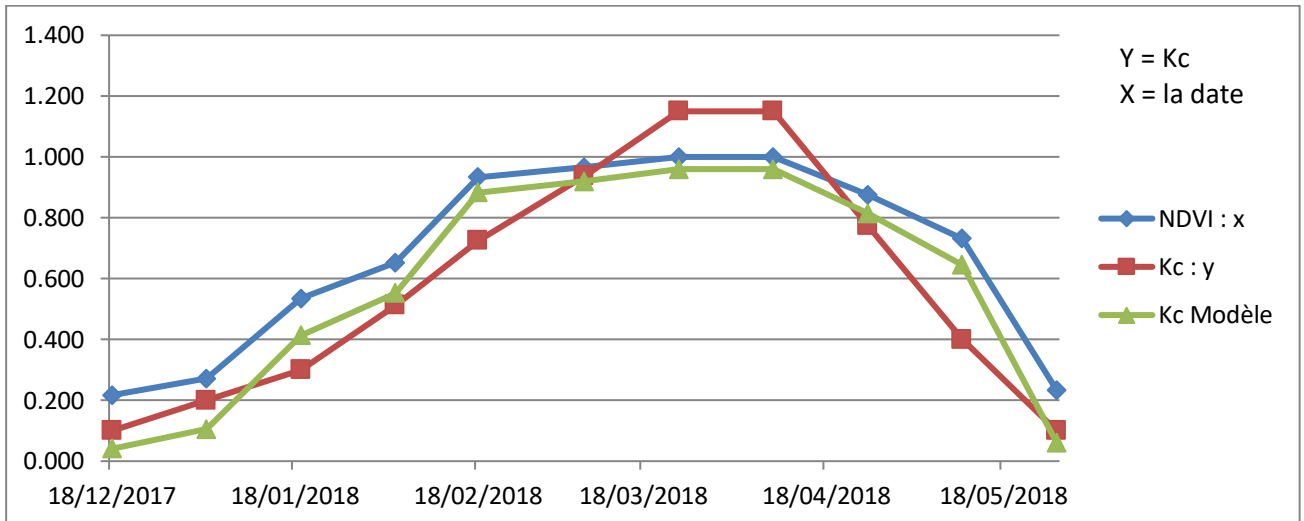


Figure N°19 ; Illustration de la relation entre le NDVI et le KC par régression linéaire pour la saison 2017/2018

3.2. Les résultats de la deuxième année d’expérimentation 2018/2019

Les tableaux cités ci-dessous montrent la relation entre le Kc empirique et le NDVI dans notre cas d’étude pour la deuxième année 2018/2019

3.2.1. La régression polynomiale entre le Kc et le NDVI

Le modèle					
Date	NDVI : x	Kc : y	Kc Modèle	Résidus	Résidu au carré
21/12/2018	0,2	0,1	0,142	0,042	0,002
06/01/2018	0,29	0,2	0,138	-0,062	0,004
22/01/2019	0,44	0,3	0,192	-0,108	0,012
07/02/2019	0,74	0,513	0,525	0,012	0,000
23/02/2019	0,94	0,725	0,916	0,191	0,036
11/03/2019	1	0,938	1,059	0,121	0,015
27/13/2019	1	1,15	1,059	-0,091	0,008
12/04/2019	1	1,15	1,059	-0,091	0,008
28/04/2019	0,92	0,775	0,871	0,096	0,009
14/05/2019	0,74	0,4	0,525	0,125	0,016
30/05/2019	0,28	0,1	0,137	0,037	0,001
				Moy des carrés des résidus	0,010

Tableau N° 15 ; Résultats du modèle par régression polynomiale pour la saison 2018/2019

Root Mean Square Error		
RMSE (Erreur Quadratique) =		0,101
Le modèle estime très bien le Kc		

Tableau N°16 ; Les résultats du test RMSE (03)

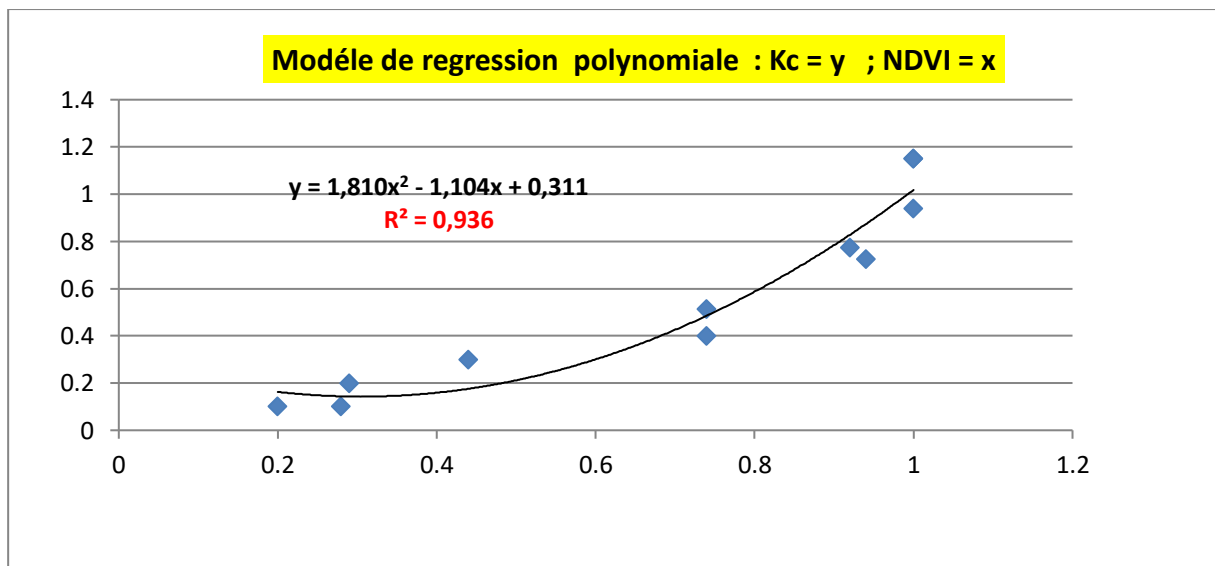


Figure N°20 ; Modèle de régression polynomiale pour la saison 2018/2019

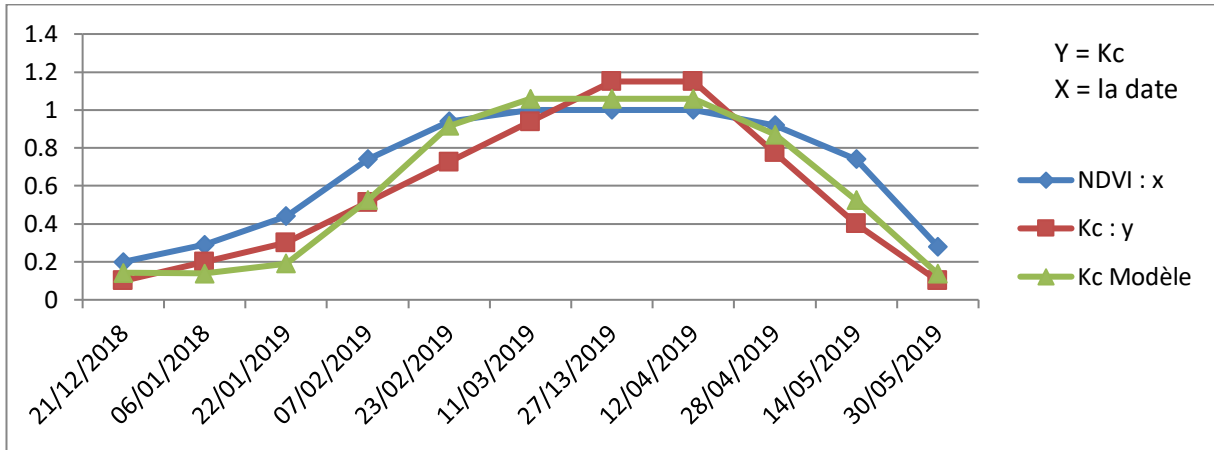


Figure N° 21 ; Illustration de la relation entre le NDVI et le Kc pour la saison 2018/2019

3.2.2. La régression linéaire

Le modèle					
Date	NDVI : x	Kc : y	Kc Modèle	Résidus	Résidu au carré
21/12/2018	0,2	0,1	0,021	-0,079	0,006
06/01/2018	0,29	0,2	0,126	-0,074	0,005
22/01/2019	0,44	0,3	0,303	0,003	0,000
07/02/2019	0,74	0,513	0,655	0,142	0,020
23/02/2019	0,94	0,725	0,890	0,165	0,027
11/03/2019	1	0,938	0,960	0,022	0,000
27/13/2019	1	1,15	0,960	-0,190	0,036
12/04/2019	1	1,15	0,960	-0,190	0,036
28/04/2019	0,92	0,775	0,866	0,091	0,008
14/05/2019	0,74	0,4	0,655	0,255	0,065
30/05/2019	0,28	0,1	0,115	0,015	0,000
				Moy des carrés des résidus	0,019

Tableau N°17 ; Les résultats de la régression linéaire pour la saison 2018/2019

Root Mean Square Error	
RMSE (Erreur Quadratique) =	0,137
Le modèle estime bien le Kc	

Tableau N°18; Résultats du Test RMSE (04)

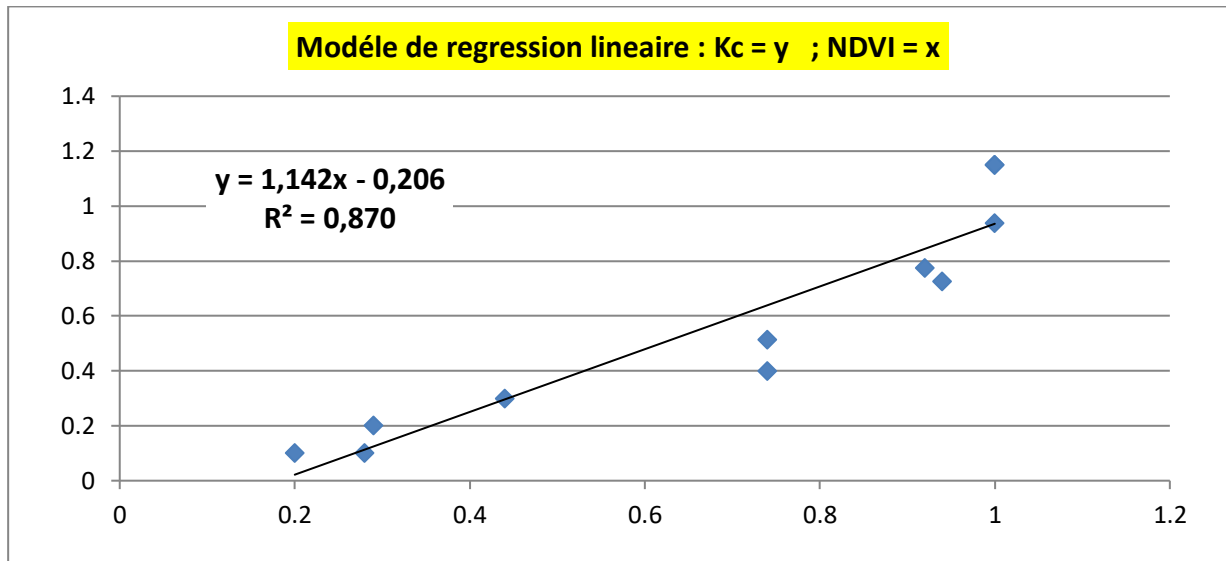


Figure N° 22; Modèle de régression linéaire pour la saison 2018/2019

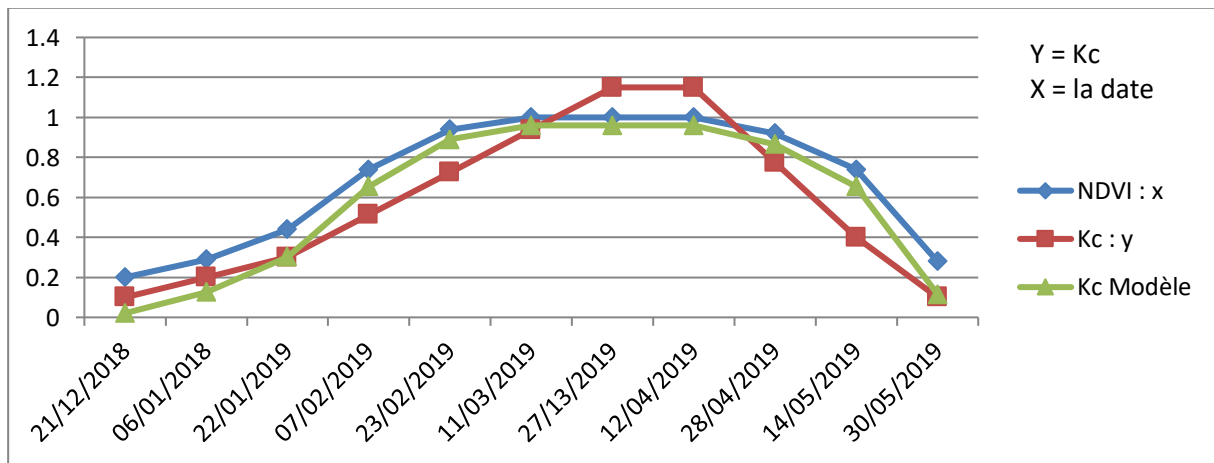


Figure N°23 ; Illustration de la relation entre le NDVI et le Kc par régression linéaire pour la saison 2018/2019

Après les deux années d'expérimentation, nous avons tirés plusieurs résultats de la modélisation qui seront utilisées pour l'estimation du Kc à partir des images satellitaires disponibles gratuitement.

On vise à trouver la meilleure relation entre les valeurs du NDVI et le développement de la culture Kc au niveau du site expérimental de l'orge.

L'interprétation de cette corrélation a été faite par les modèles de régression polynomiale et de la régression linéaire durant deux années d'expérimentation pour trouver la meilleure corrélation et le meilleur model d'estimation du Kc réel à partir des images satellitaire (NDVI)

Après ces deux travaux de corrélation nous avons tiré conclusion que le meilleur modèle qui interprète le développement végétatif Kc par le NDVI est le **premier modèle de la régression polynomiale**. Et ces résultats ont été confirmés par le test statistique **Root Mean Square Error RMSE** .

4. Conclusion des résultats de la modélisation

D’après les deux modèles tirés ci-dessus pour les deux années d’expérimentations 2017/2018 et 2018/2019

Nous pouvons écrire les formules du Kc comme suit ;

4.1. La première année 2017/2018 ;

✚ Kc = 1,174 (NDVI) – 0,214 conformément au modèle de la régression linéaire, représenté par un coefficient de régression R² = 0,879 et selon le test RMSE (Racine Moyenne des Erreurs Carré) qui égal à 0,131

✚ Kc = 1,677 (NDVI)² – 0,866 (NDVI) + 0,248 conformément au modèle de la régression polynomial, représenté par un coefficient de régression R² = 0,948 et selon le test RMSE (Racine Moyenne des Erreurs Carré) qui égal 0,087

Le modèle qui représente mieux le Kc de la culture d’orge est le Modèle de la régression polynomial. Sur ce, la formule des besoins en eau des cultures ;

$$ETc = Kc \times ETP$$

Devienne

$$ETc = (1,677 (NDVI)^2 - 0,866 (NDVI) + 0,248) \times ETP$$

Et on peut la déduire directement a partir du graphe du Kc qu’on a obtenu après les travaux de modélisation de l’année 2017/2018 et qu’on le trouve dans la Figure N° 24 cité ci-dessous

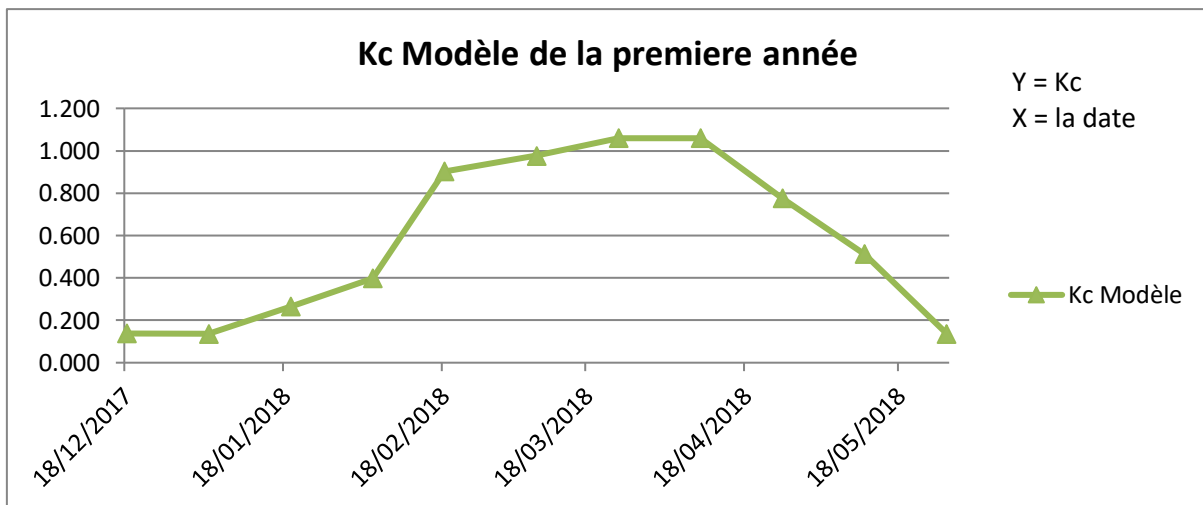


Figure N° 24 schémas du Kc modèle de la saison 2017/2018

4.2. La deuxième année 2018/2019 ;

✚ Kc = 1,142 (NDVI) – 0,206 conformément au modèle de la régression linéaire, représenté par un coefficient de régression R² = 0,870 et selon le test RMSE (Racine Moyenne des Erreurs Carré) qui égal à 0,137

✚ Kc = 1,81 (NDVI)² – 1,104 (NDVI) + 0,311 conformément au modèle de la régression polynomial, représenté par un coefficient de régression R² = 0,936 et selon le test RMSE (Racine Moyenne des Erreurs Carré) qui égal 0,131

Le modèle qui représente mieux le Kc de la culture d'orge est le Modèle de la régression polynomial. Sur ce, la formule des besoins en eau des cultures ;

$$ET_c = K_c \times ETP$$

Devienne

$$ET_c = (1,81 (NDVI)^2 - 1,104 (NDVI) + 0,311) \times ETP$$

Et on peut la déduire directement à partir du graphe du Kc qu'on a obtenu après les travaux de la modélisation de l'année 2018/2019 et qu'on le trouve dans la Figure N° 25 cité ci-dessous

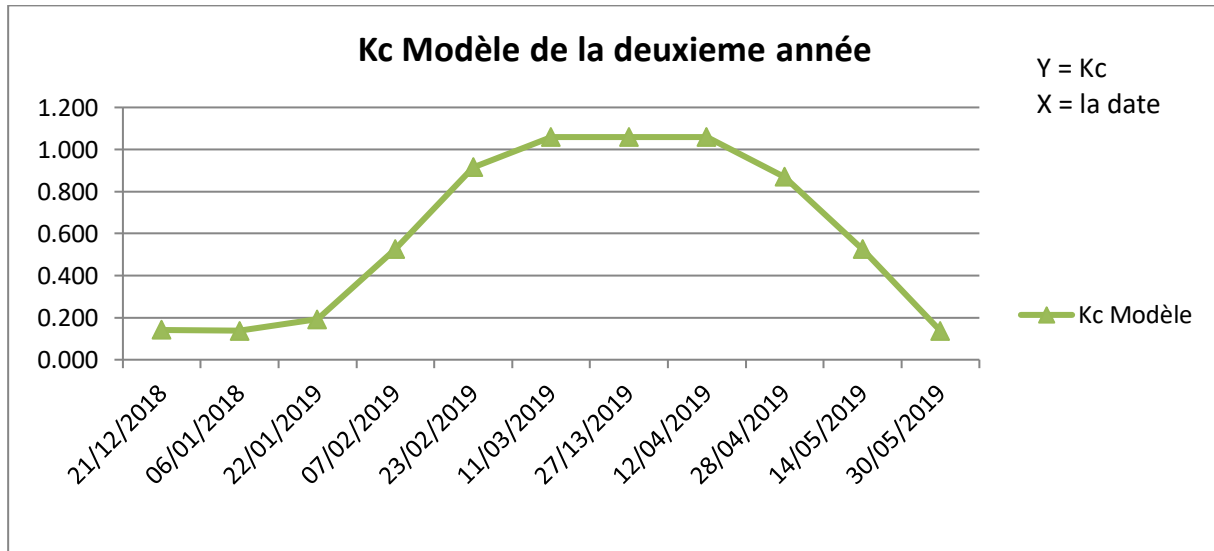


Figure N° 25 : schémas du Kc modèle de la saison 2018/2019

Les deux modèles des deux saisons sont presque identiques avec une légère différence et ils représentent le développement réel de la culture de l'orge dans notre zone d'étude et cette conclusion est confirmée par la forme de la courbe si nous le compare avec la courbe généralisée du Kc établis par l'FAO.

5. Calcul du Kc lysimétrique

5.1. Contexte

Dans le but de vérifier la validité de notre étude de modélisation pour l'obtention d'un Kc spécifique à notre région d'étude, nous avons choisis l'approche de calculer le Kc expérimentalement par l'installation d'un lysimètre au niveau de la parcelle expérimental de l'orge.

5.2. Définition d'un lysimètre

Un **lysimètre** est un dispositif permettant d'étudier et de mesurer l'évolution de l'eau dans un sol naturel, agricole, forestier. Le mot *lysimètre* décrit différents appareils, qui ont cependant en commun d'analyser les interactions Eau-Sol-vivant, la part du vivant pouvant être limitée aux végétaux, ou incluant la microfaune et flore du sol, selon les cas. Lorsqu'il s'agit de mesurer uniquement l'évaporation des sols avec couverture végétale, on doit utiliser le

terme **évapotranspiromètre**. Dans ce cas, le bac est muni d'un appareil de mesure des quantités d'eau ajoutées et perdues par évapotranspiration.(Glossaire de la météorologie).

Malgré ses limitations, le lysimètre a permis de mieux comprendre le fonctionnement des sols, bien plus complexe qu'il n'y paraît au premier abord. Il permet notamment de caler certains modèles de transferts d'eau, de nutriments, de polluants (eutrophisants, pesticides, etc.), en milieu agricole, naturel ou dans des sols très loin de l'état naturel tels que ceux des terrains de golf.

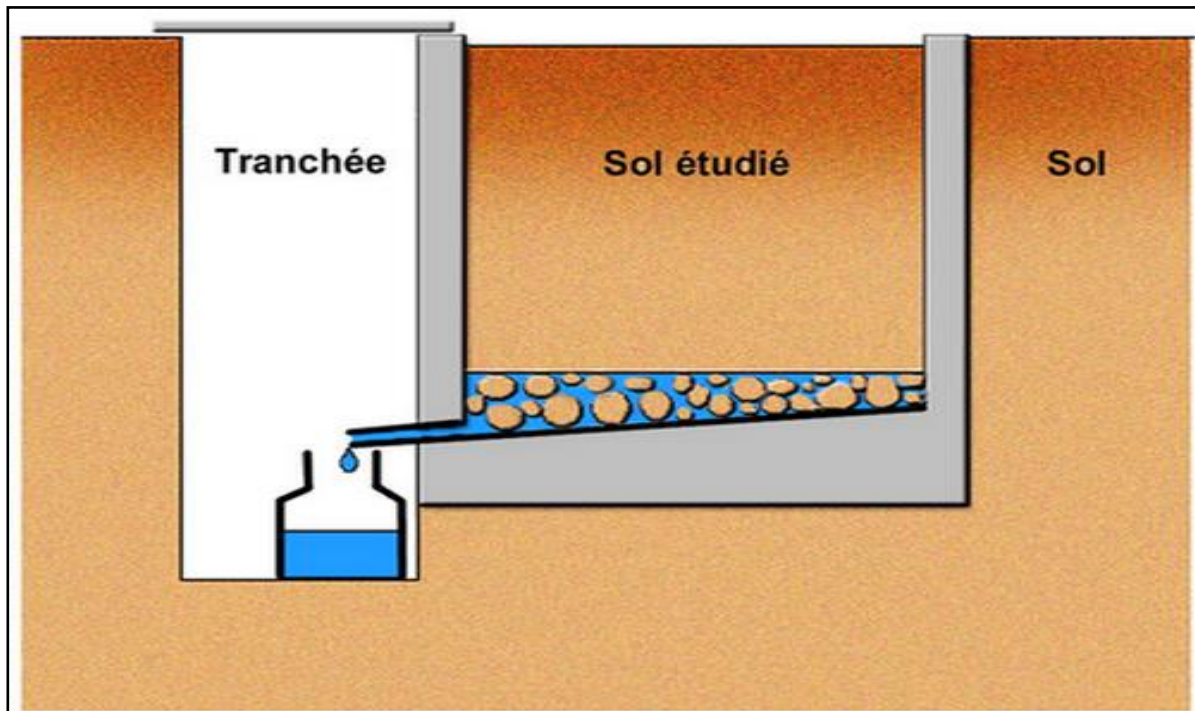


Figure N° 26 : lysimetre simple ([Lamiot on fr.wikipedia](#))

La figure N° 26 représente un lysimètre simple qui se présente comme un cylindre (ou un bac) en métal, béton ou plastique ouvert en surface et rempli par le sol à tester. Ses côtés descendent de 1 à 2 m, ou plus, sous la surface profondeur et sont étanches, alors que le fond laisse percoler l'eau afin qu'on puisse la récolter. La végétation et les conditions à chaque niveau, surtout la teneur en eau, sont maintenues sensiblement identiques à celles du terrain en place. La mesure du débit d'eau et de différents autres composants à la base permet de connaître les caractéristiques du sol étudié (Musy. 2012). Il peut être placé in situ (sur le terrain à étudier) ou ex situ (en laboratoire).

La cuve du lysimètre est remplie du même type de sol que celui du terrain avoisinant, ou mieux il est rempli d'une carotte prise dans le sol « le moins perturbé possible » à proximité.

Un lysimètre ayant une surface d'évaporation d'un mètre carré permet de faciliter les calculs et conversions (1 litre d'eau = 1 mm/m²).

Le lysimètre est le plus souvent associé avec une station agro-météorologique pour noter les conditions des vents, de température, l'insolation et l'humidité relative pour nous permettre de calculer l'évapotranspiration potentiel (ETP ou ET₀) au niveau de la zone d'étude.

5.3. L'objectif

L'objectif principal de cette étude expérimental (lysimetrique) est de faire ressortir le coefficient cultural lysimetrique K_c de la culture d'orge à partir de la formule $K_c = ETR/ETP$ ou l'ETR = l'évapotranspiration réel de la culture d'orge ou les besoins réel de la culture durant le cycle végétatif c'est-à-dire la différence entre la quantité apporté et la quantité drainé par le lysimetre.

ETP = l'évapotranspiration potentiel calculé par de la formule Penman montheite utilisé par le logiciel CROPWAT 8.0.1.1 fondé par l'FAO, et en utilisant les données climatiques de l'ONM et du TUTIEMPO (tutiempo.fr)

Le lysimetre à été mis en place au niveau de notre parcelle expérimental d'orge durant les deux années 2017/2018 et 2018/2019 comme montre les figures N° 27,28 et 29 cité ci-dessous :



Figure N° 27 : un lysimetre cylindrique mis en place au niveau du site expérimental de l'Outaya



Figure N° 28 : vue de face du lysimetre au niveau de la parcelle expérimental



Figure N° 29 : vue de face du lysimetre au stade épiaison

5.4. La méthode adoptée pour la mesure de l'ETR et du Kc

- ✓ Le lysimetre à été installé le mois de novembre juste avant le semi
- ✓ Le sol à été rempli par le même sol pour assurer l'homogénéité des conditions pédo-édaphique (analyse chimique ci après Tableau N° 19 et 20)

<i>N° Echantillon</i>	<i>CE (ds/m) Rapport 1/5</i>	<i>pH Rapport 1/2.5</i>	<i>P₂₀₅ Assimilable ppm</i>	<i>Matière Organique %</i>	<i>K₂O Assimilable ppm</i>	<i>Calcaire total (%)</i>	<i>Calcaire Actif (%)</i>
01	3.81	8.18	115	0.83	2290	39.38	16

Tableau N° 19; Bilan de fertilité du sol du lysimetre (ITDAS 2018)

<i>Cations méq/l</i>				<i>Anions méq/l</i>			
<i>Na⁺</i>	<i>Ca⁺⁺</i>	<i>Mg⁺⁺</i>	<i>K⁺</i>	<i>CO₃⁻</i>	<i>HCO₃⁻</i>	<i>Cl⁻</i>	<i>SO₄⁻</i>
20.63	7.2	0.4	0.14	/	1.2	16.92	18.88

Tableau N° 20; Le Bilan ionique su sol (ITDAS 2018)

- ✓ Après le premier remplissage et la collecte des eaux de drainage du lysimetre après 48 heures, on a trouvé que le RU est environ 180 mm
- ✓ Le premier remplissage par l'eau à été fait le 26/11/2018 comme pré irrigation
- ✓ On apport l'eau d'irrigation à chaque fois qu'en constate que le sol commence à se dessécher c'est-à-dire on irrigue juste dans l'intervalle du RFU.

- ✓ La fréquence d’irrigation se change selon l’état hydrique du sol et selon les conditions climatiques c'est-à-dire les irrigations sont éloignées en hiver et rapprochée en printemps et en été.
- ✓ Les résultats du lysimetre obtenus durant le cycle végétatif figurent dans le tableau N°21 cité ci après

Irrigation	les dates	ETR (mm)	ETP (mm)	Kc lysimetrique = ETR/ ETP
1	26/11/2018	Le premier remplissage du lysimetre RU = 178 mm		
2	14/12/2018	12,74	40,3	0,32
3	10/01/2019	36,26	59,89	0,61
4	07/02/2019	77,22	87,97	0,88
5	21/02/2019	37,24	41,15	0,90
6	07/03/2019	44,3	55,15	0,80
7	14/03/2019	30,38	35,46	0,86
8	01/04/2019	64,68	69,18	0,93
9	14/04/2019	55,86	61,02	0,92
10	24/04/2019	64,68	65,59	0,99
11	29/04/2019	46,06	40,21	1,15
12	05/05/2019	37,24	42,58	0,87
13	11/05/2019	31,36	44,83	0,70

Le tableau 21; Le nombre et les fréquences des irrigations apportées durant le cycle végétatif.

- ✓ La qualité chimique des eaux de drainage (CE, pH) figure dans le tableau N°22

N° d'échantillon	CE (ds/m)	pH
01	12.74	9.88
02	8.24	7.43
03	8.59	8.35
04	7.26	8.42
05	8.42	8.59
06	7.76	8.54
07	7.66	8.13
08	8.03	8.23
09	8.47	8.32
10	8.29	8.20
11	8.75	8.29
12	8.82	8.56
13	8.25	8.62

Tableau N° 22 : la qualité chimique des eaux de drainage du lysimetre (laboratoire de l'ITDAS 2019)

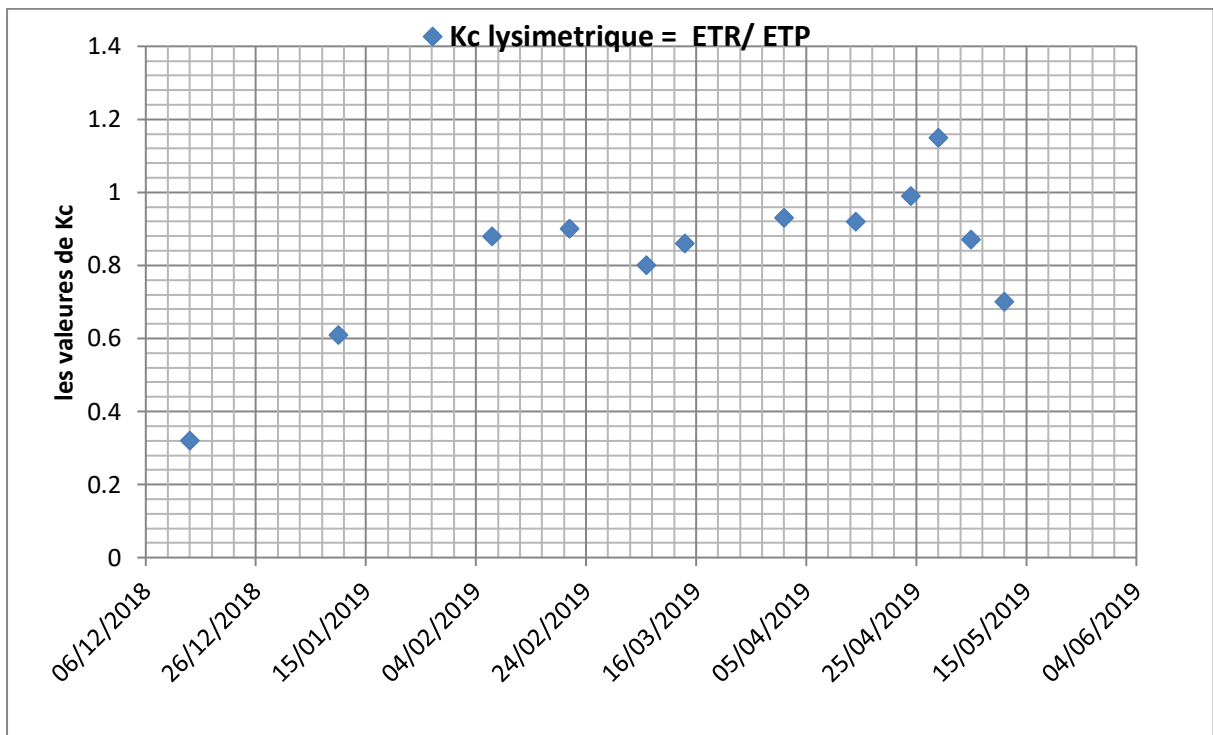
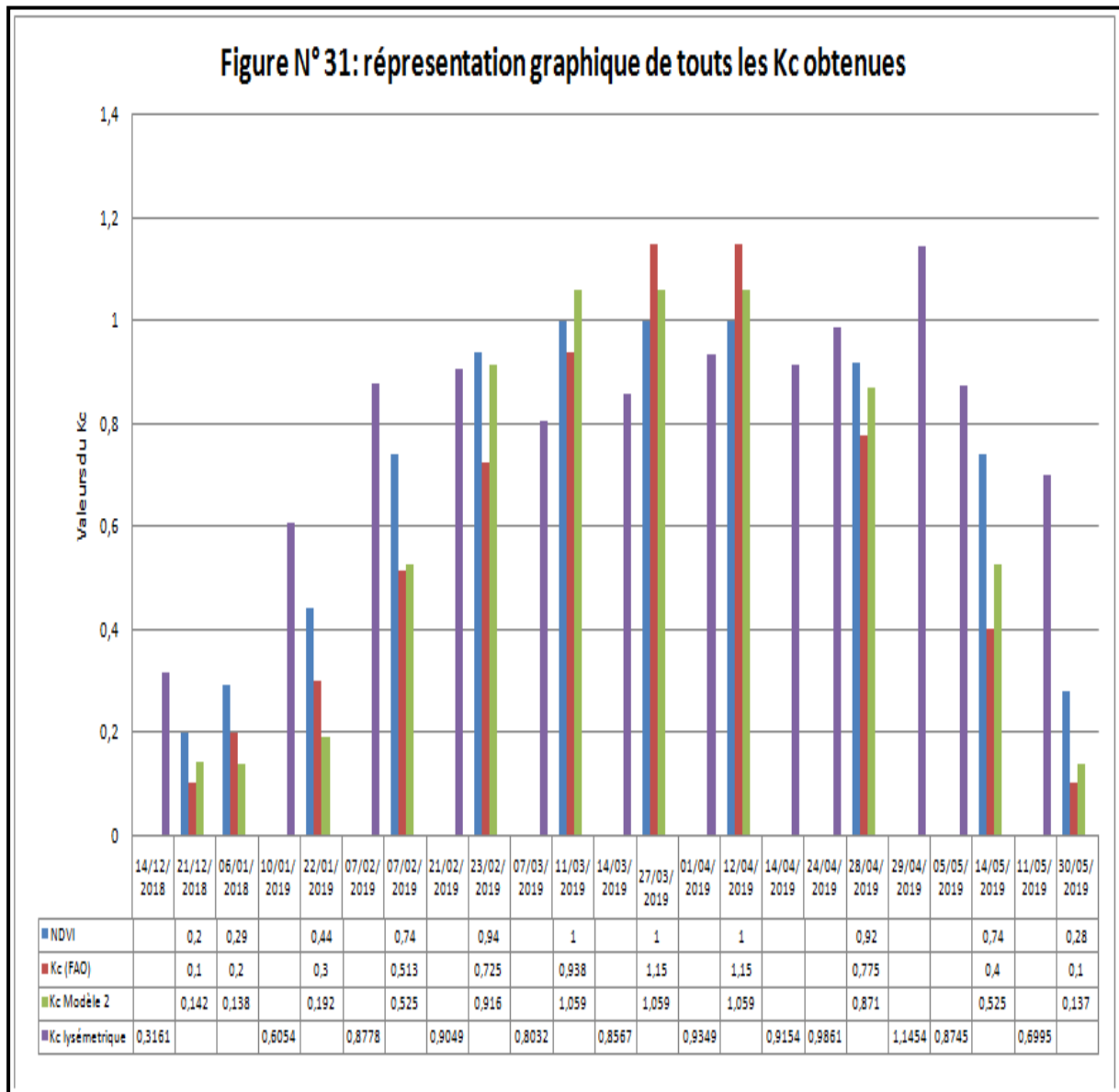


Figure 30 : Le graphe representant le Kc lysémetrique obtenue pour l'année 2018/2019



5.5. Interprétation des résultats lysimétrique

La figure N°31 porte tous les coefficients culturaux obtenus durant cette étude de modélisation ainsi que le Kc lysimétrique de la deuxième année, on remarque d’après le graphe, le Kc lysimétrique confirme notre hypothèse qui dise que les données bibliographique disponibles ne peuvent pas être appliquées dans toutes les régions, en raison de la grande différence des conditions climatiques d'une région à l'autre et notamment les zones sahariennes.

6. CONCLUSION

Cette étude de modélisation a montrés la force et les avantages de l'utilisation des images satellitaires disponibles gratuitement et périodiquement sur les portails « open source » telle que l'USGS durant toute l'année ce qui nous a donné l'opportunité de tirée le maximum des résultats après les traitements de ces images.

Dans les zones arides de l'Algérie et notamment le Sahara algérienne qui couvre plus de 2 million de Km² , la ou les données indispensables à la bonne gestion de l'irrigation à l'échelle parcellaire et régional sont toujours manquantes et même si disponibles, on trouve que ces données bibliographique sont généralisé pour des grandes échelles et ils ne reflètent pas la réalité, ce qui va donner automatiquement des résultats qui ne représentent pas réellement la région d'étude choisies, cela nous à poussé a chercher d'autre alternative telle que le domaine de la télédétection qui offre des donnée actuels et réel de notre parcelle ou de notre région d'étude.

Ces données des différents satellites de la plateforme USGS et qui se défèrent d'un satellite a un autre selon leurs caractéristiques techniques à savoir la résolution spectral, spatial et temporelle offre l'opportunité d'utiliser les différents indices fondé par les spécialiste dans le contexte du suivi de la végétation et notamment les parcelles destinée à l'agriculture.

Parmi ces indices, nous avons utilisé l'indice le plus connue (NDVI) comme est le plus utilisé par les chercheurs de ce domaine pour l'objectif du suivi de l'évolution des stades végétatifs de la culture de l'orge pendant le cycle de ce dernier et le corrélér avec le Kc de la Bibliographie dans le but de calibrer ce dernier par un model mathématique, ce qu'il nous a donné un Kc model basé sur le NDVI et qu'il sera utilisé comme référence pour la région.

Durant les deux saisons d'expérimentation 2017/2018 et 2018/2019, plusieurs modelés on été testé telle que le model de la corrélation linéaire et polynomiale.

Sur ce, nous pouvons conclure que le model adopté pour l'estimation des besoins en eau de la culture d'orge dans la région de Biskra et le suivant ;

$$ET_c = (1,81 (NDVI)^2 - 1,104 (NDVI) + 0,311) \times ETP$$

Kc précis \Longrightarrow **ETR très proche de la réalité** \Longrightarrow **une meilleure estimation de la productivité de l'eau.**

L'estimation et l'amélioration de la productivité de l'eau par les approches basées sur la télédétection sera développée dans le chapitre N° 05.

CHAPITRE 05 ; LA CARTOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE PAR TELEDETECTION ET L'ESTIMATION DE LA PRODUCTIVITE DE L'EAU

1. LA CARTOGRAPHIE DE LA ZONE D'ETUDE

1.1 Contexte de l'étude

Dans le cadre d'un projet de coopération entre le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural de l'Algérie MADR « représenté par l'ITDAS » et l'Organisation Mondiale de l'Agriculture et de l'alimentation **FAO**, le projet GCP/RNE/009/SWE « de la mise en œuvre de l'agenda 2030 pour l'efficacité, la productivité et la durabilité de l'eau dans les pays de la région du proche orient et de l'Afrique du nord » et le projet TCP/RAB/3602 « de la Productivité de l'eau » initiées par l'FAO en 2017 dans la région MENA, un travail a été réalisé dans le but de la réalisation des cartes des cultures existantes au niveau des plusieurs sites appartenant au projet. Ces cartes vont nous aidé à bien déterminer la productivité de l'eau, l'estimation des superficies réellement emblavé ainsi que tous les classes d'occupation du sol qui existent au niveau de la zone d'étude (la zone choisie pour cette étude est la plaine de l'outaya).

1.2. L'objectif de l'étude

L'objectif de cette étude est l'utilisation des images satellitaires pour la réalisation d'une carte des cultures existantes au niveau de notre zone d'étude (la plaine de l'Outaya) afin d'améliorer les approches de gestion de l'irrigation à l'échelle régionale.

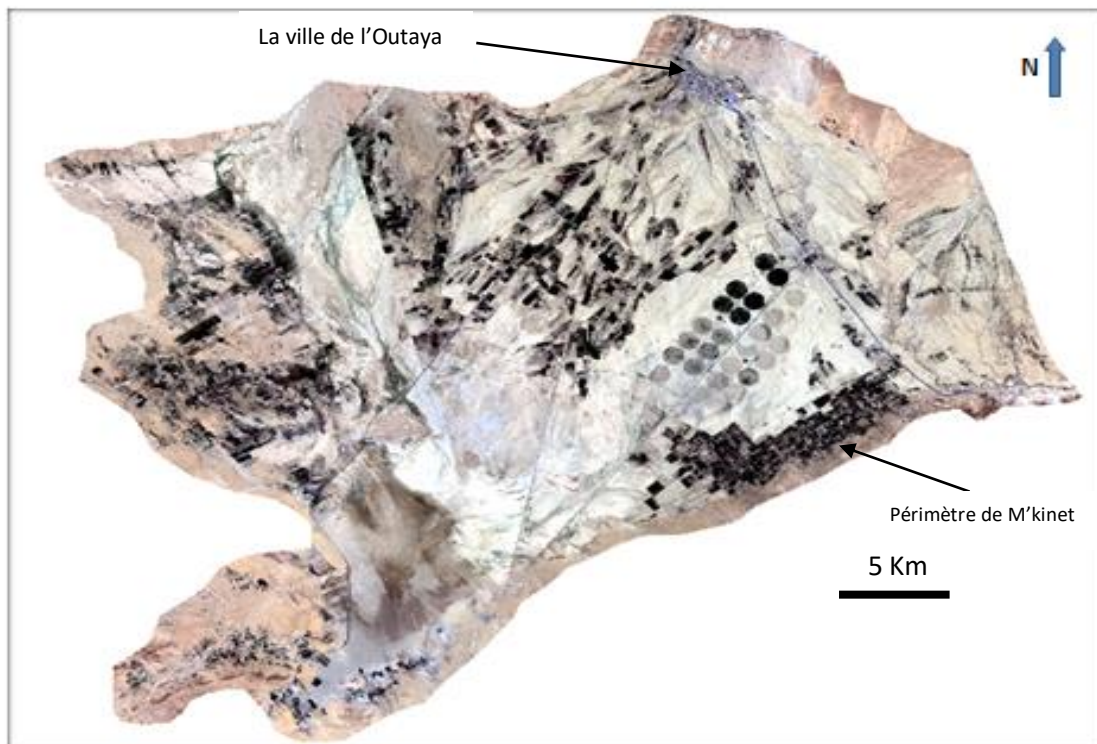


Figure N° 32: La délimitation de la zone d'étude au niveau de la plaine de l'Outaya

(image sentinel 2 découpée par QGIS)

1.3. La Méthodologie

Lorsqu'on effectue une analyse visuelle d'images satellitaires, on peut distinguer les différentes formes de couverture terrestre telles que les zones urbaines, les routes, les terres agricoles, les prairies et les sols nus. Avant l'apparition des ordinateurs, les cartes de couverture terrestre étaient créées manuellement et à partir des photos aériennes en délimitant les limites entre les différents types de couverture terrestre. Elles étaient identifiées au moyen d'une interprétation visuelle. L'interprétation visuelle utilisait couramment des informations issues de l'association de divers éléments visibles sur la photo aérienne pour identifier les différentes classes de couverture terrestre : la combinaison de l'emplacement, de la taille, de la forme, de l'ombre, du ton et de la couleur, de la texture, du motif, de la hauteur ou de la profondeur et de la situation ou association. Depuis l'utilisation des ordinateurs pour traiter les données satellitaires, le processus de création d'une carte de la couverture terrestre a été adapté à la façon dont un algorithme informatique peut interpréter les différences dans les types de couverture terrestre (Viergever, Pauline, 2019).

Plusieurs méthodes de détection de changement par télédétection sont disponibles (l'analyse visuelle, les méthodes algébriques, post classification, méthodes SIG...etc). Parmi les méthodes les plus utilisées, l'usage de la classification comme une catégorie de détection des changements et qui englobe l'ensemble des méthodes de comparaison post classification, dirigée et non dirigée. Ces méthodes sont basées sur les résultats des images classées, dans lesquelles la qualité et la quantité des données des échantillons d'entraînement sont cruciales pour produire de bons résultats de classification (Lu et al., 2003 cité par Khader, 2019)



Figure N° 33: Image satellitaire brute (Google earth)

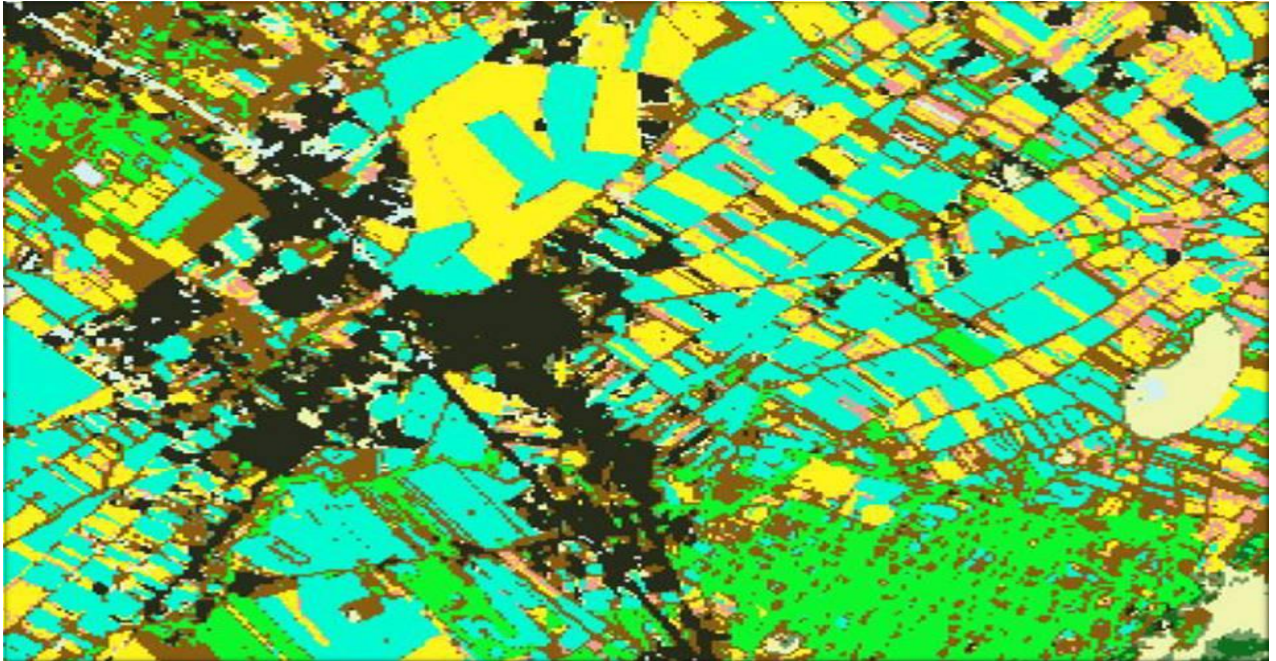


Figure N° 34 : La carte d'occupation du sol de la même zone

La méthodologie proposée (figure 35) est conforme à l'approche utilisée par l'FAO pour produire les cartes d'utilisation / occupation du sol de la base de données WaPOR publiée dans le cadre du projet WaPOR (<http://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity>).

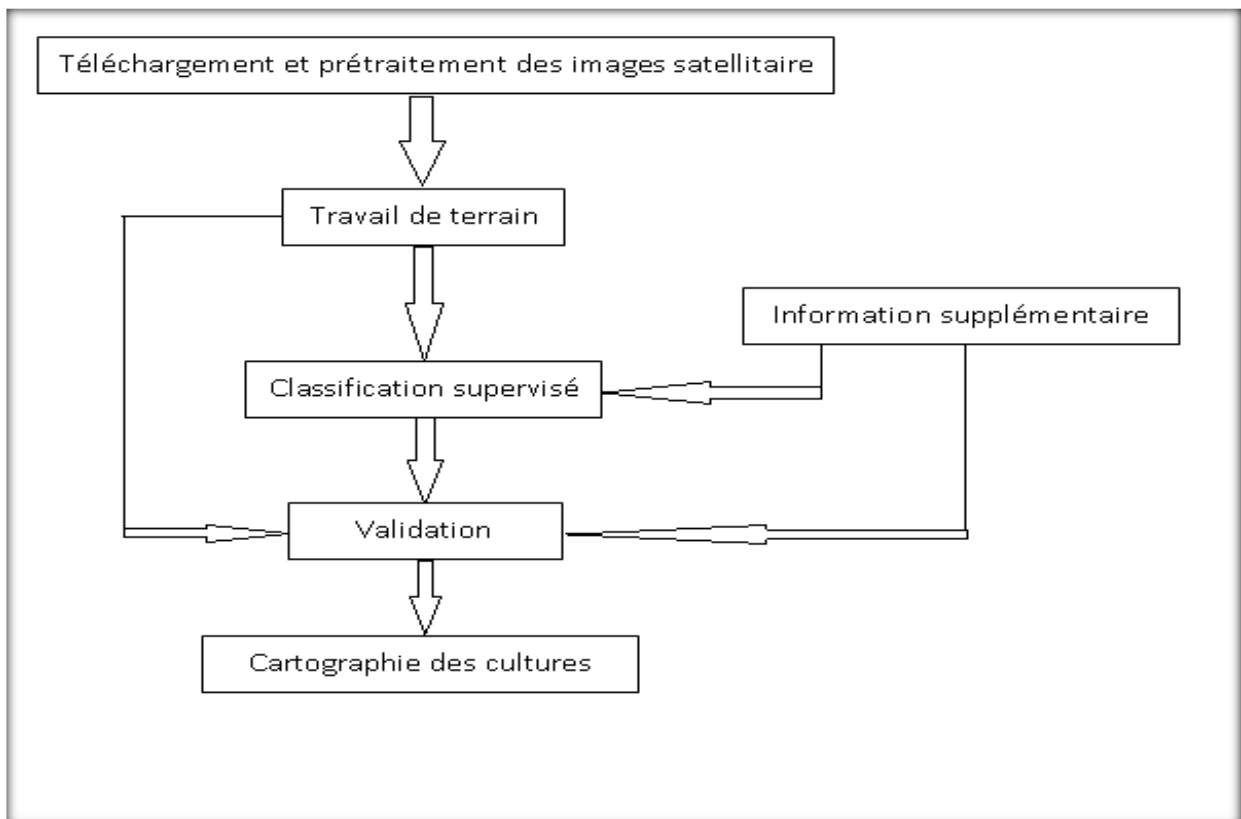


Figure N° 35 : La méthodologie adoptée par la FAO pour la classification supervisée

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

1.3.1. L'Acquisition de l'image

L'image utilisée pour cette étude est celle de Sentinel 02 prise le 12/04/2019 et téléchargé gratuitement auprès (earthexplorer.usgs.gov). Les caractéristiques techniques des images Sentinel 02 sont comme suit ;

- ✓ La résolution spatiale ; 10 m
- ✓ La résolution temporelle ; 8 jours
- ✓ La résolution spectral ; 12 bands

Avant l'utilisation de chaque image satellitaire brute obtenue du portail USGS Earth explorer ou un autre portail, il est indispensable de commencer par la géo-référencement de l'image (Kwast. Menke, 2019) . Dans notre cas d'étude on a choisit le WGS 84/UTM Zone 31N EPSG 32631.

Sentinel-2 Bands	Central Wavelength (μm)	Resolution (m)
Band 1 - Coastal aerosol	0.443	60
Band 2 - Blue	0.490	10
Band 3 - Green	0.560	10
Band 4 - Red	0.665	10
Band 5 - Vegetation Red Edge	0.705	20
Band 6 - Vegetation Red Edge	0.740	20
Band 7 - Vegetation Red Edge	0.783	20
Band 8 - NIR	0.842	10
Band 8A - Vegetation Red Edge	0.865	20
Band 9 - Water vapour	0.945	60
Band 10 - SWIR - Cirrus	1.375	60
Band 11 - SWIR	1.610	20
Band 12 - SWIR	2.190	20

Tableau N° 23 : Caractéristique technique des satellites sentinel 02 (ESA)

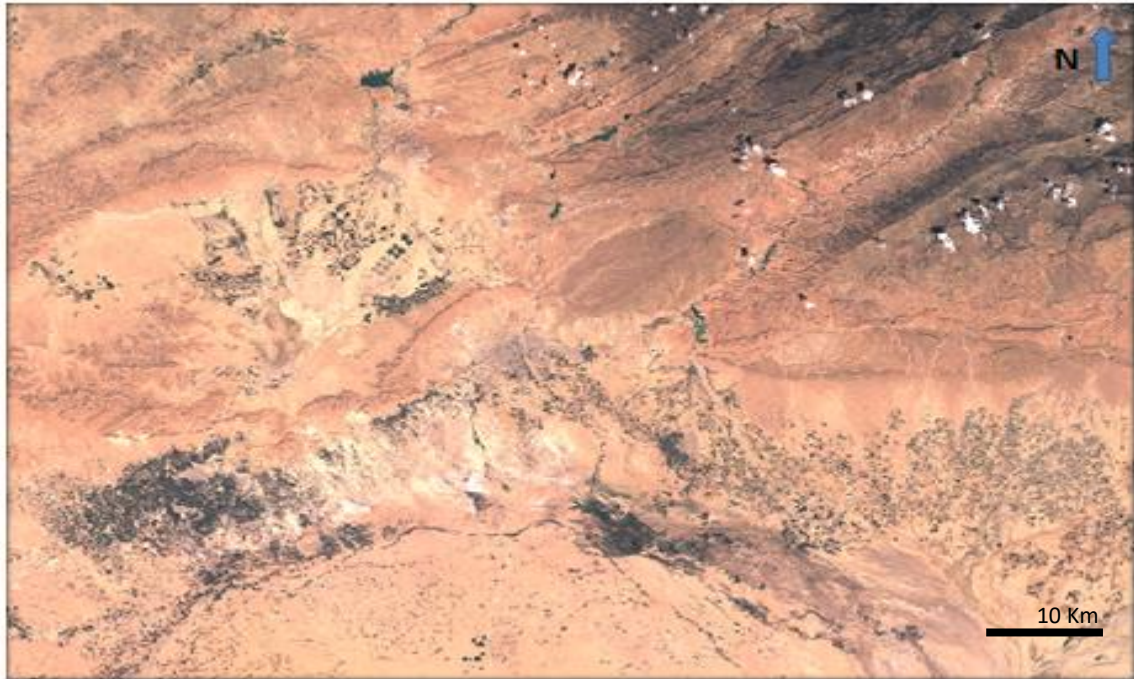


Figure N° 36 ; L'image brute de sentinel 02 de la zone de Biskra (USGS earthexplorer)

1.3.2. La Collecte des données de terrain

Pour collecter le maximum de données de terrain, il faut assurer la préparation de tous les fichiers et les cartes soit numérique ou sur papier pour assurer la réussite de l'opération d'échantillonnage et de la collecte des données de terrain, dans notre étude nous avons utilisé l'application ODK collecte installée sur nos smart phones.

La qualité et la quantité des données de référence sont très importantes pour la création et la validation d'une cartographie des cultures (Kwast. Menke, 2019). En particulier les aspects suivants sont particulièrement importants:

1.3.2.1. Taille des unités d'échantillonnage:

La taille minimale des unités d'échantillonnage à collecter lors du travail sur le terrain est déterminée par la résolution spatiale (taille des pixels), des données satellitaires à utiliser pendant la cartographie des cultures, avec une taille d'échantillon minimale d'au moins 9 pixels (Kwast . Menke, 2019). Dans notre cas on a utilisé une image sentinel 02 de 10 m de résolution spatiale, C'est-à-dire il faut compter 30 x 30 m comme minimum pour une parcelle a échantillonnée.

1.3.2.2. Homogénéité des unités d'échantillonnage :

Les parcelles choisies comme des unités d'échantillonnage doivent être homogène, c'est-à-dire que chaque pixel doit être un échantillon « pur » du type de culture ou de la classe d'occupation du sol qu'il représente dans l'unité d'échantillonnage. Les pixels mixtes qui ont tendance à apparaître en bordure de champ ne doivent pas être inclus dans les unités d'échantillonnage. Egalement on a évité les pixels susceptibles de contenir l'influence d'autres types de couverture terrestre ou schémas dans le champ, tels que les routes ou les cours d'eau traversant les champs, ou encore les nuages ou les ombres des nuages présents dans l'image satellitaire à classer. Les unités

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

d'échantillonnage les plus grands sont plus susceptibles d'incorporer accidentellement des pixels qui ne représentent pas le type de classe d'occupation du sol correctement durant la classification.

1.3.2.3 La taille de l'échantillon (nombre d'unités d'échantillonnage) :

L'échantillon doit être suffisamment grand pour obtenir des estimations fiables des différents types de couverture terrestre dans la zone d'étude. Dans notre cas, nous avons choisis la plaine de l'Outaya qui englobe le maximum des classes existant au niveau de la région.

Le nombre minimale déterminé à collecté pour chaque classe est 25 unité pour assurer l'opération de classification et de validation (FAO, 2019).

1.3.2.4. La répartition des unités d'échantillonnage :

Les unités d'échantillonnage ou les parcelles qui représentent les différentes classes d'occupation du sol doivent être recueillies au hasard et réparties sur l'ensemble de la zone d'étude. En d'autres termes, les unités d'échantillonnage pour chaque classe d'occupation du sol doivent couvrir un large emplacement au sein de la zone d'étude telle que le blé dur et la luzerne ainsi que le palmier dattier dans notre zone d'étude.

Pour résumer, la collecte de données de référence doit minimiser la confusion pour l'étape de la classification. La meilleure façon d'éviter toute confusion dans nos données de référence est de s'assurer que chaque unité d'échantillonnage représente une parcelle homogène d'une classe d'occupation du sol. C'est à dire il est préférable de collecter un plus grand nombre de polygones plus petits dans la zone d'étude que de recueillir des très grandes unités d'échantillonnage.

Pour réussir ce travail d'une façon efficace, nous avons utilisé l'application ODK collect installé sur nos Smartphones pour faciliter l'opération de la collecte notamment que cette application dispose de plusieurs fonctionnalités telles que la géo-localisation et la prise des photos des parcelles échantillonnées ainsi que la collecte de tous les données utile de la parcelle (www.appsapk.com/odk-collect)

1.4. Résultats de l'opération de la collecte des données :

Après 8 jours d'échantillonnage, nous avons collecté le nombre de points suffisant pour dessiner 340 polygone et qui représentent toutes les classes d'occupation du sol qui existent au niveau du périmètre de l'Outaya ;

Ci-après dans le tableau N°24 toutes les classes qui existent au niveau de la plaine avec le nombre de points collecté par classe :

Numéro de la classe	La classe	Nombre de points collectés
1	Sol nue	27
2	Jachère	42
3	Blé dur	36
4	Orge	25
5	Luzerne	29
6	Olivier	32
7	Palmier dattier	26
8	Abricotier	26

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

9	Maraichage sous serre	27
10	Zones urbaine ou artificiel	25
11	Arbuste (steppe)	28
total	11 classes	323

Tableau N° 24 : les principales classes d'occupation du sol dans la plaine de l'Outaya

Plus de ces points collectées, nous avons identifié, d'autres sous classes qui existent au niveau du périmètre malgré que leurs pourcentages d'occupation du sol sont négligeables, mais on les a identifié comme suit dans le tableau N°25;

N° de classe	La classe	Nbre des points collectés
12	Grand bassin de stockage de l'eau de 1ha	02
13	Des arbres de tamarix dans les lits d'oued	12
14	Sebkha d'eau chargée en sel	02
15	L'avoine	01
Total	04 classes	17

Tableau N°25 : les sous classe d'occupation du sol dans la plaine de L'Outaya

- La somme des points collecté pour toutes les classes est 340 points (323+17)

Les photos ci-après illustrent l'opération de la collecte des données par ODK;



Figure N° 37: parcelle de luzerne



Figure N° 38: parcelle de Blé dur



Figure N° 39 : parcelle des serres tunnel



Figure N° 40 : sol nu

Durant notre mission de collecte des données, les observations remarquées sont comme suit :

- ✚ nous avons remarquées que la vocation de la région de l'Outaya est la céréaliculture, notamment le blé dur et l'orge ainsi que les cultures fourragères (la luzerne) et aussi l'oléiculture pour leurs intérêts économiques.
- ✚ Toutes les cultures sont irriguées vu que les précipitations ne dépassent pas les 150mm /an en moyenne (ONM, 1989-2018) et notamment leurs irrégularité dans le temps et dans l'espace.
- ✚ L'irrigation est assurée par les eaux souterraines plus les eaux de barrage de la fontaine des gazelles qui assure l'irrigation d'un grand périmètre irrigué de M'KINET de plus de 1200 ha (DRE, 2017).
- ✚ Durant les visites effectuées au niveau de la zone d'étude et nos concertation avec quelques agriculteurs nous avons constaté ce qui suit ;
 - ✓ Le sol de la plaine de l'Outaya est généralement un sol argileux limoneux ce qui engendre le risque de la salinisation et surtout lorsqu' on irrigue avec des eaux salée comme c'est le cas dans plusieurs parcelles visitée.
 - ✓ Le non disponibilité des réseaux de drainage agricole dans la plaine.
 - ✓ La qualité chimique des eaux utilisés pour l'irrigation se différent d'une parcelle a l'autre selon la nappe d'eau exploitée.
 - ✓ La fertilisation se fait aléatoirement, c'est à dire les agriculteurs ne maitrisent pas la fertilisation raisonnée et généralement ils utilisent le NPK ou le TSP comme engrais de fond et l'urée 46% comme engrais de couverture.
 - ✓ Pour le palmier dattier, les agriculteurs pratiquent la fertilisation organique et chimique
 - ✓ Pour les cultures sous serre, les agriculteurs pratiquent la fertilisation organique et chimique et notamment l'utilisation des Oligo éléments et les hormones de croissance ainsi que quelque agriculteurs qui utilisent le paillage en plastique

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

pour réduire l'évaporation de l'eau d'irrigation et pour empêcher le développement des mauvaises herbes.

- ✓ La plupart des agriculteurs commencent à pratiquer les systèmes économiseurs d'eau telle que l'aspersion et l'irrigation localisée mais ils ne contrôlent pas la quantité d'eau appliquée.
- ✓ La répartition des points prise dans la plaine de l'Outaya a été faite selon la taille des parcelles et la diversification d'occupation des sols par exemple au niveau du GPI (Grand Périmètre Irrigué de M'KINET on trouve plusieurs classes d'occupation des sols telle que ; le blé, l'orge, la luzerne, l'olivier, le palmier dattier, l'abricotier, la jachère, le sol nueect.

1.4.1. L'export des données sur QGIS

Les résultats de l'opération de la collecte de données sont prêts à exporter et les projeter sur QGIS par un fichier CSV (Excel) à partir de l'application installée sur nos smart phones utilisés durant l'opération de la collecte des données.

La figure N°41 citée ci-dessous illustre la projection des points collectés sur la carte de notre zone d'étude à l'Outaya ;

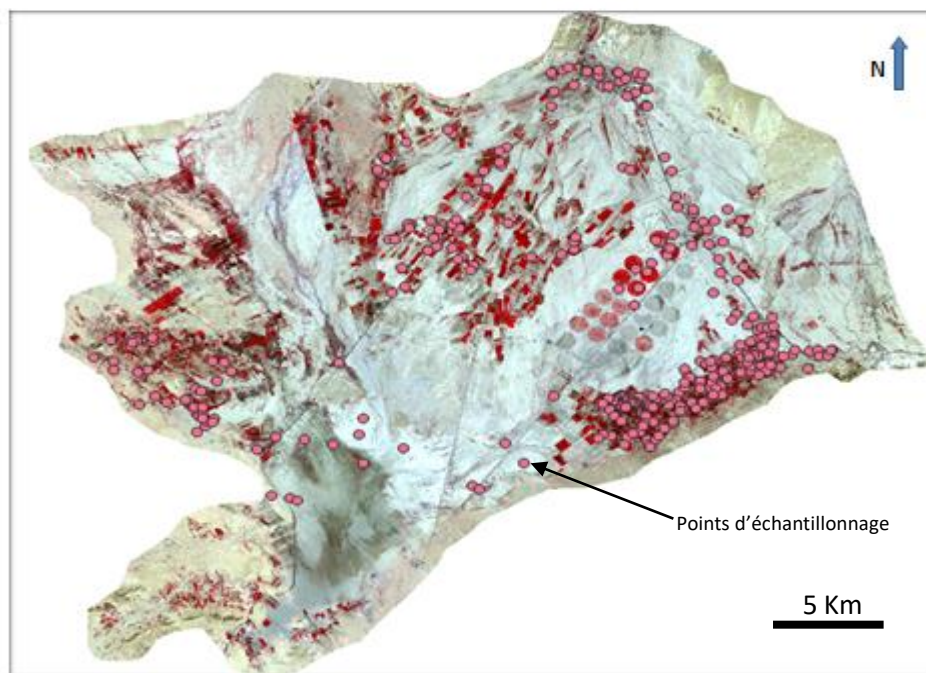


Figure N° 41 : La projection des données collectées de la zone d'étude sur QGIS
(Image traitée en fausses couleurs)

1.4.2. La digitalisation des polygones

La digitalisation des polygones consiste à choisir les pixels homogènes pour chaque parcelle et qui présentent une classe bien définie, la digitalisation des polygones se différencie d'une parcelle à une autre selon la disponibilité des pixels homogènes au niveau des parcelles pour faciliter l'extraction des signatures spectrales de chaque classe d'occupation des sols.

La figure N° 42 citée ci-après illustre la digitalisation des polygones de quelques classes ;

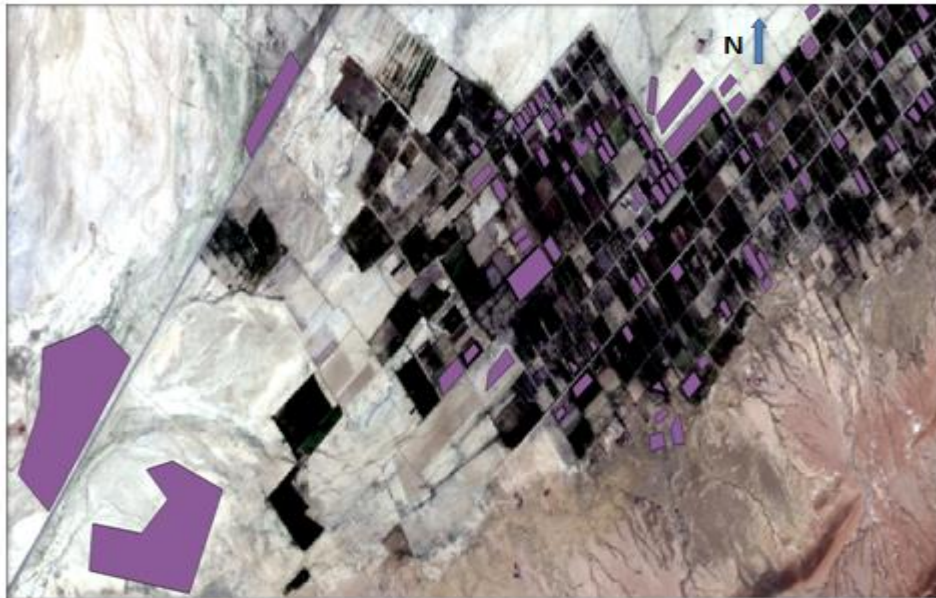


Figure N° 42 : la digitalisation des polygones pour quelques Classes d'occupation des sols (QGIS)

1.5. La cartographie des cultures

1.5.1. Le prétraitement des images

La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Comme son nom l'indique, elle suppose l'acquisition d'information à distance, sans contact direct avec l'objet détecté (Bonn, 1994)

Le prétraitement des images comprenait des corrections atmosphériques, géométriques et radiométriques. (Tanré et al., 1986 ; Royer et al., 1988 ; Lambert, 1992 in Bonn 1994).

Pendant le processus d'acquisition de l'image, des erreurs se produisent et l'image est déformée. Les facteurs influençant l'acquisition d'images en télédétection comprennent les caractéristiques des capteurs, l'atmosphère et les conditions météorologiques, la surface de la Terre (géométrie) et la méthode d'acquisition (satellite ou aérienne) (Kwast, Menke, 2019). C'est pourquoi nous prétraitons une image avant de faire des analyses.

Nous distinguons trois étapes de base du prétraitement :

1.5.1.1. Le traitement géométrique ;

Pendant le balayage, le trajet du capteur est sujet à de petites variations. Les distorsions géométriques qui se produisent dépendent fortement de la plateforme et du capteur. De leur côté, les photographies aériennes sont soumises à plus d'erreurs géométriques que les images obtenues par satellite. Les corrections géométriques ont permis de rendre les images conformes à la projection cartographique UTM (Bonn, 1994).

Cette étape est généralement effectuée directement à bord de la plateforme ou plus tard, par l'agence fournissant l'image. Ainsi, nous n'avons pas à nous soucier des corrections géométriques

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

lors du téléchargement d'images satellites provenant de plateformes couramment utilisées (USGS earthexplorer), telles que Sentinel-2 ou Landsat.

1.5.1.2. Le traitement radiométrique ;

Il tient compte de la réponse inégale du capteur. Ces différences de réponse sont causées par des variations dans l'éclairage de la scène. En d'autres termes, le rayonnement n'est pas aussi intense au cours de la journée et de l'année (changements saisonniers). Pendant l'étalonnage radiométrique, les numéros numériques sans unité (DN) sont convertis en valeurs de réflectance (Deschamps et al., 1981 in Bonn 1994). L'étalonnage radiométrique est effectué en appliquant une équation mathématique, qui est également fournie par l'agence fournissant les données. Cependant, de nombreux logiciels disposent d'outils pour effectuer un étalonnage radiométrique. C'est également le cas de QGIS utilisé dans notre étude.

1.5.1.3. Le traitement atmosphérique ;

Le résultat d'un étalonnage radiométrique est la réflectance TOA. Cependant, l'objet visé par la télédétection est la surface terrestre (et donc le rayonnement qui la quitte). Sur sa trajectoire du sol au capteur, le rayonnement interagit avec des particules présentes dans l'atmosphère. Par conséquent, le rayonnement au niveau du capteur est toujours déformé, même après correction géométrique et étalonnage radiométrique des données. Pour obtenir une image plus réaliste du rayonnement au sol, nous pouvons donc faire une correction atmosphérique. Au cours de ce processus, nous convertissons la réflectance au sommet de l'atmosphère (TOA) en réflectance à la surface de l'atmosphère (BOA). (Kwast et Menke, 2019)

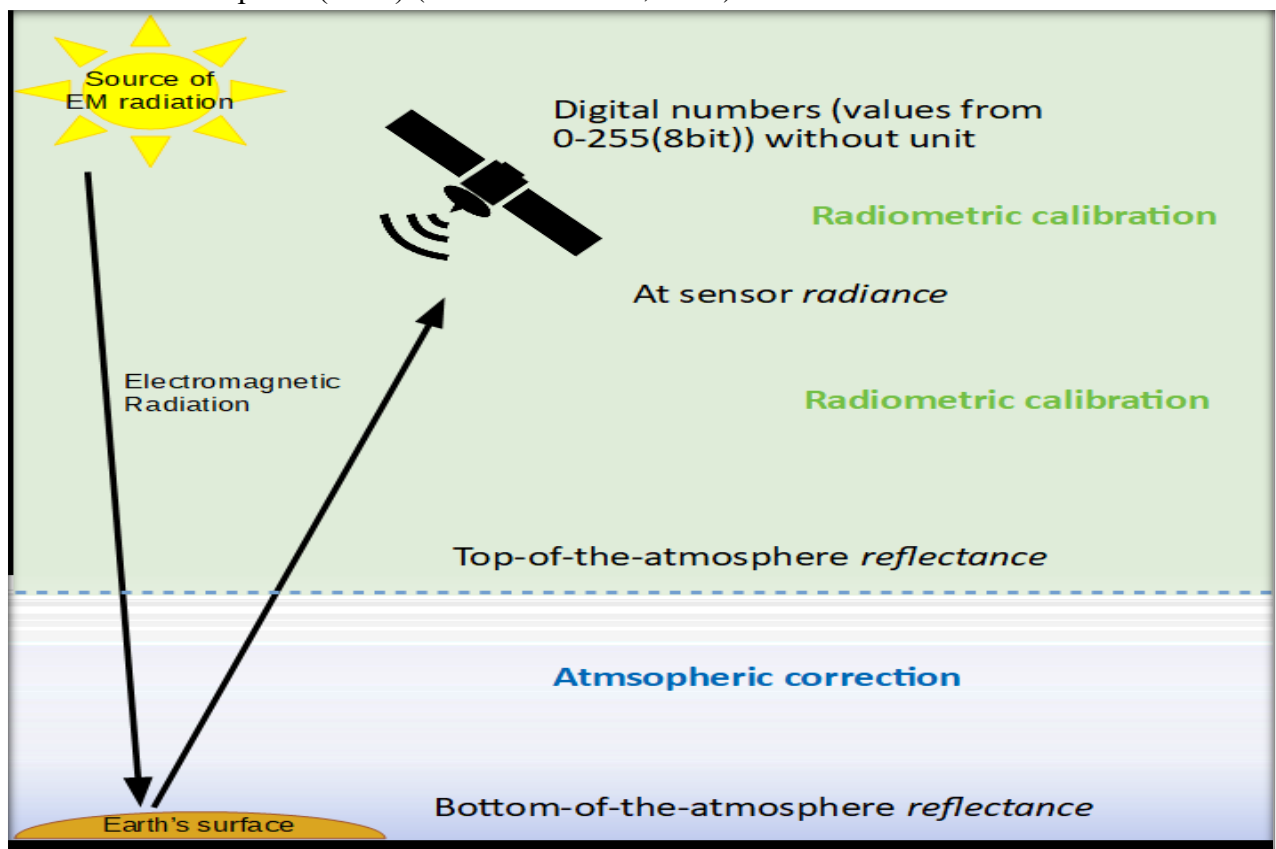


Figure N° 43: Les étapes de base du prétraitement (FAO, 2018)

1.5.2. La classification supervisée

1.5.2.1 Définition:

Les différents matériaux à la surface de la Terre possèdent des signatures spectrales distinctes. Ceci est dû au fait que chaque matériau de surface (ou type de couverture terrestre) reflète et absorbe le rayonnement solaire entrant d'une manière unique. Par exemple, La végétation présente une signature spectrale mettant en évidence un contraste fort de réflectance entre le visible et le proche infrarouge (Figure 44). Cette caractéristique provient de l'activité chlorophyllienne et de la présence d'eau dans les feuilles. Ainsi, la signature spectrale évolue au cours de la saison: au maximum de la période végétative, l'écart entre le rouge et l'infrarouge est maximal ; alors qu'en cas de stress hydrique ou à la sénescence, la réflectance dans le rouge tend à diminuer, et le passage du visible vers l'infrarouge se fait de manière plus continue (Carter et Miller, 1994 in Diarra, 2017). Cette signature spectrale unique permet de distinguer assez facilement la végétation des autres types de couverture terrestre dans une image satellitaire qui présente des longueurs d'ondes visibles et proches de l'infrarouge. L'eau transparente absorbe la quasi-totalité du rayonnement et présente ainsi une très faible réflectance dans la plupart des bandes, à l'exception des longueurs d'ondes bleues. En général, la réflectance du sol nu augmente avec la longueur d'onde et la réflectance spécifique dans les différentes bandes dépend de la composition du sol (par exemple, matière organique, rugosité, texture) et de sa teneur en humidité. La figure ci-dessous représente des signatures spectrales typiques pour l'eau, la végétation et le sol.

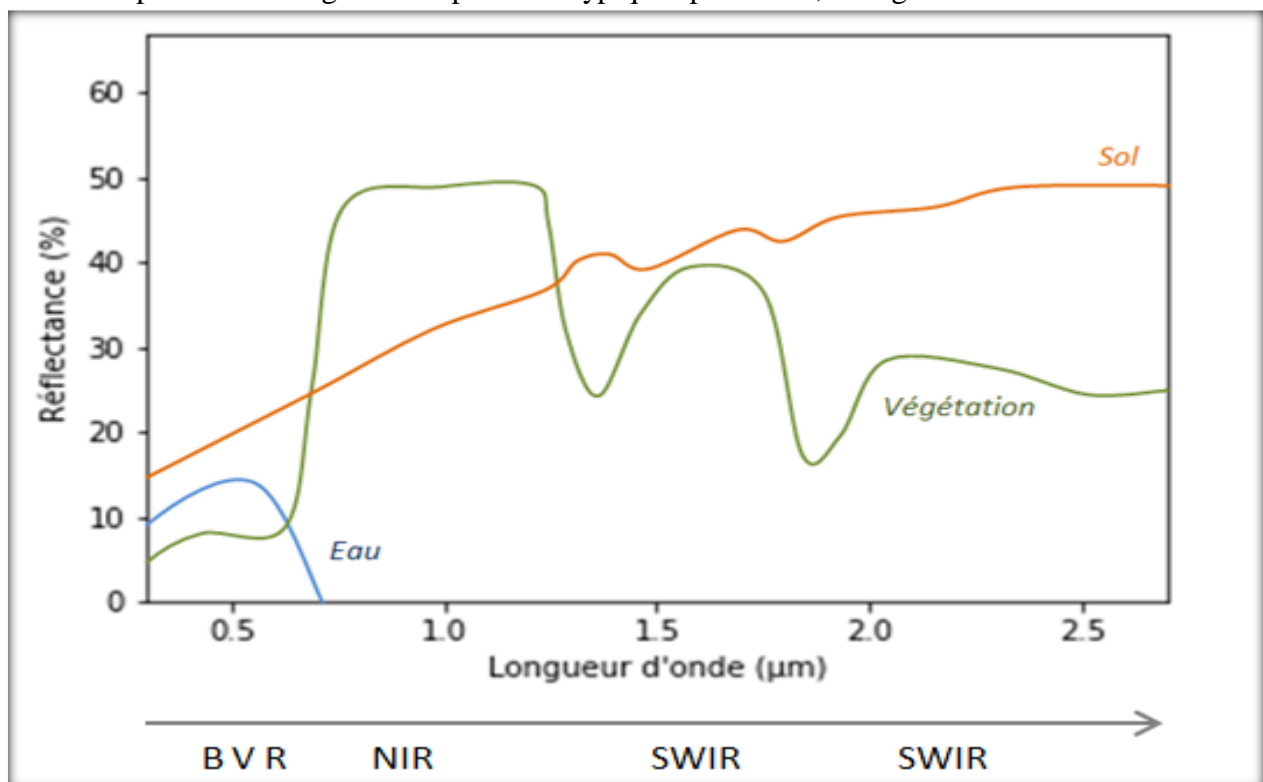


Figure N° 44 : Les signatures spectrales typiques de la végétation, de l'eau et du sol (FAO, 2018)

La méthode de classification supervisée emploie des données de référence collectées sur terrain et qui sont utilisées pour « former » l'algorithme de classification afin de pouvoir reconnaître à quoi ressemblent les pixels des différentes classes d'occupation du sol.

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

Divers logiciels pouvant être utilisés pour la classification d'images satellitaires. Les logiciels de propriété commerciale peuvent être très coûteux, mais au cours des dernières années, diverses options open source sont devenues disponibles. Dans cette étude nous avons choisis une classification supervisée (Maximum de vraisemblance) à l'aide du plug-in Semi-Automatic Classification (SCP) qui peut être téléchargé dans QGIS.

1.5.2.2. Division des données de référence

Avant de commencer la classification des images, il est important de diviser les données de référence collectées en deux parties. La plus grande partie sera utilisée pour effectuer la classification supervisée. Nous retiendrons une partie plus petite que nous utiliserons plus tard pour estimer l'exactitude de la carte des cultures. En général il est judicieux de conserver 20 à 30 % des données de référence collectées sur le terrain pour validation. Cette démarche s'appelle la méthode « holdout » (Kohavi, 1995)

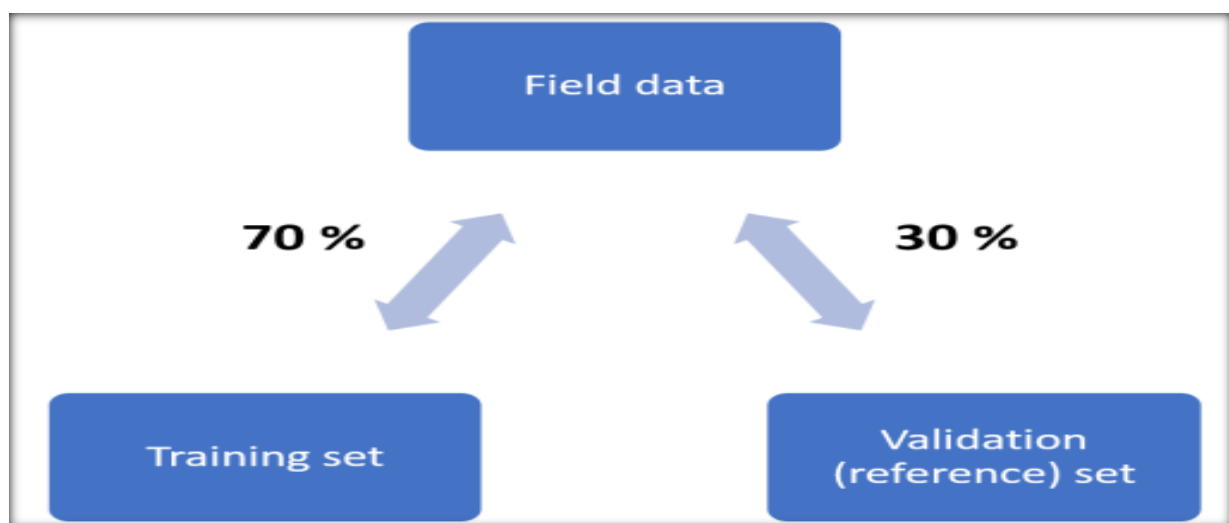


Figure N° 45: la méthode d'échantillonnage holdout (Ron Kohavi, 1995)

La division des données de référence collectées en deux parties et leur utilisation indépendante aux fins de classification et de validation garantissent que l'ensemble des données de validation peut être utilisé de manière impartiale pour évaluer la performance de la classification. Un problème potentiel avec cette technique est que l'échantillon de validation peut ne pas être représentatif de toutes les classes si l'échantillon est sélectionné de manière aléatoire. Par exemple, une ou plusieurs classes peuvent ne pas être représentées dans l'échantillon de validation. Ce risque est plus élevé pour les classes d'occupation du sol où un faible nombre d'unités d'échantillonnage ont été collectées sur le terrain. Par conséquent, pour cette raison nous avons respecté les normes de collecte des données de terrain. Lorsque nous savons combien d'unités d'échantillonnage à retenir pour chaque classe aux fins de validation, nous pouvons simplement effectuer un échantillonnage aléatoire dans chaque classe. Cette technique s'appelle l'échantillonnage stratifié (<http://uis.unesco.org/fr/glossary-term/echantillonnage-stratifie>).

Dans notre cas d'étude nous avons divisé l'échantillon de 340 points collectés en deux parties ; 70% (236 points) comme données de classification et 30% (104 points) comme des données de validation selon la stratification par classe. Cette division est faite automatiquement par plugin SCP.

1.5.3. Les résultats de l'opération de classification des cultures

En utilisant toujours le QGIS pour effectuer cette classification et notamment l'utilisation de l'extension SCP (classification semi automatique) qui sert à faciliter l'opération de classification et l'importation de toutes les signatures spectrales de toutes les classes à partir des pixels inclus dans chaque polygone déjà digitalisé.

Chaque polygone nous a données une signature spectrale spécifique à la parcelle digitalisé comme la figure N° 46 cité ci-dessous le montre

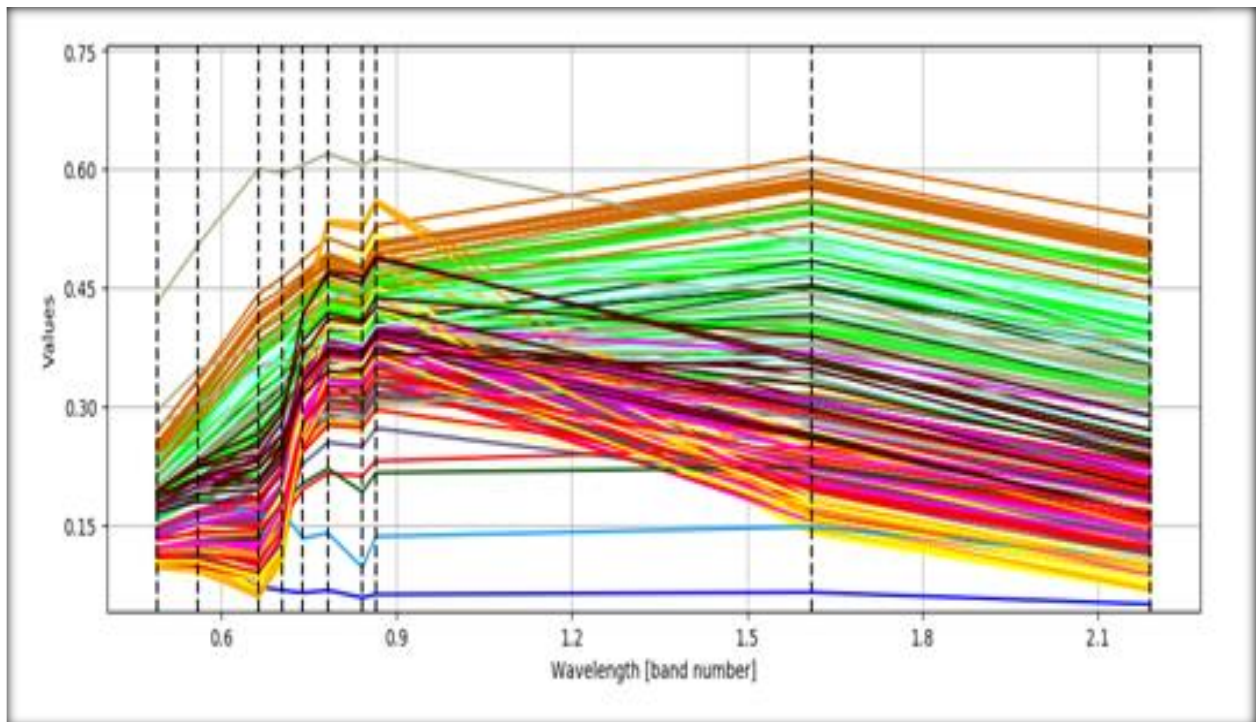


Figure N° 46 : Visualisation et importation des signatures à l'aide du plugin SCP

Dans le but d'homogénéiser les signatures spectrales de chaque classe d'occupation du sol, on a fusionné les signatures spectrales de chaque classe dans une seule signature qui représente toute les parcelles de la même classe d'occupation du sol est qui sera la base de la classification supervisé et ce dans le but de différencier toutes les classes existantes au niveau de notre zone d'étude, la figure N°47 cité ci après montre l'opération de l'extraction d'une seule signature qui représente la même classe.

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

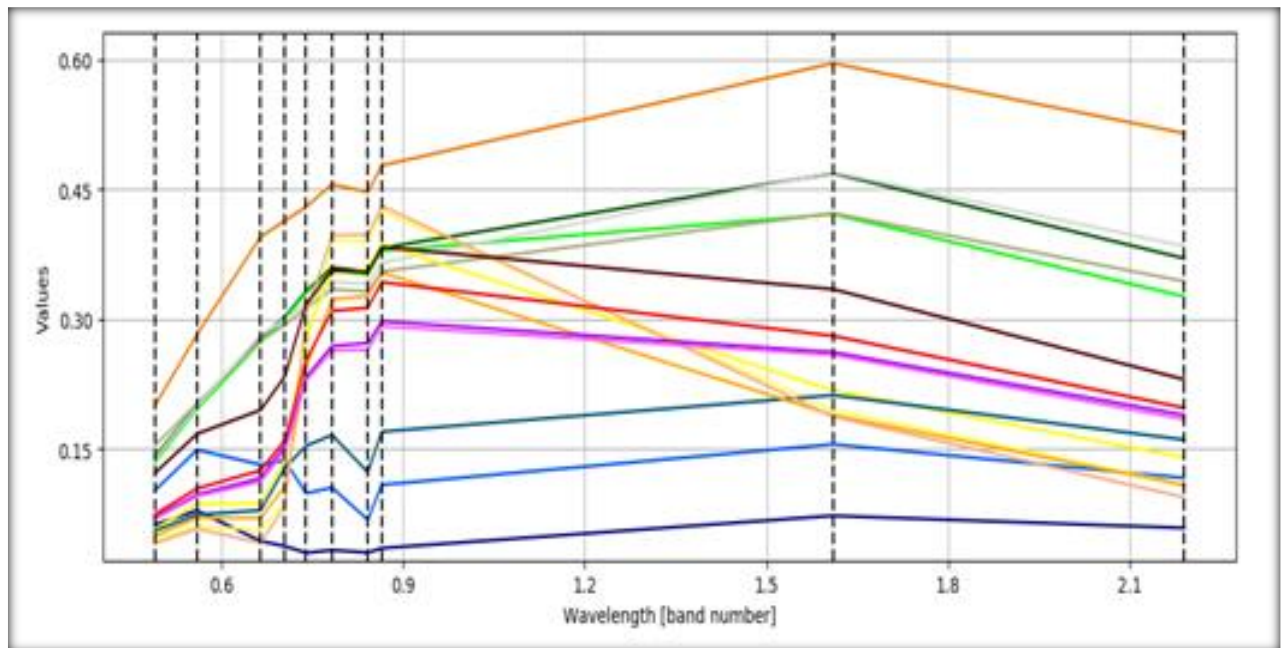


Figure N° 47 : La fusion des signatures spectrales de chaque classe

L'étape suivante est de lancer la classification supervisée pour avoir la carte des cultures de notre zone d'étude. Généralement les résultats de la première classification ne donnent pas des résultats satisfaisantes ce qui nécessite de revoir à chaque fois les signatures spectrales en éliminant si nécessaire les points qui causent la confusion entre les classes et laisser que les polygones qui porte le maximum des pixels homogènes et purs. Sur ce, et pour aboutir à la meilleure carte des cultures il est indispensable de revérifier à chaque fois les signatures de la même classe. Et même on peut déplacer des points d'une classe à une autre classe ou créer d'autres sous classes en se basant sur les détails collectés sur le terrain.

Durant l'opération de classification, nous avons fait quelques rectifications en éliminant environ 12 points et reclasser d'autres points.

La Classe	N° de La classe	Nbre de points	70%	30%
Arbre naturel (tamarix)	01	08	06	02
Arbuste (steppe)	02	28	20	08
Urbain	04	25	17	08
Sol nue	05	26	18	08
Sol labouré	06	31	22	09
grands bassins d'eau	07	02	01	01
Eau des Sebkha	08	02	01	01
Eau usée	09	03	02	01
orge	10	25	17	08
Blé dur	11	36	25	11
luzerne	12	29	20	09
L'olivier	13	31	22	09
Le palmier dattier	14	26	18	08
abricotier	15	26	18	08

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

Maraichage sous serre	16	28	20	08
L'avoine	17	02	01	01
Total	16 classes	328	228	100

Tableau N°26 : le détail final des classes après travaux de classification supervisé

Après le lancement de la dernière carte des cultures, on obtient un fichier raster qui sera transformé en carte par l'option (print layout de QGIS) comme le montre la figure N°48 ainsi que un fichier CSV qui porte toutes les statistiques relatifs a la somme des pixels par classe, le pourcentage de l'occupation de sol pour chaque classe et les superficies de chaque classe en m² comme l'indique le tableau N° 27 cité ci-après

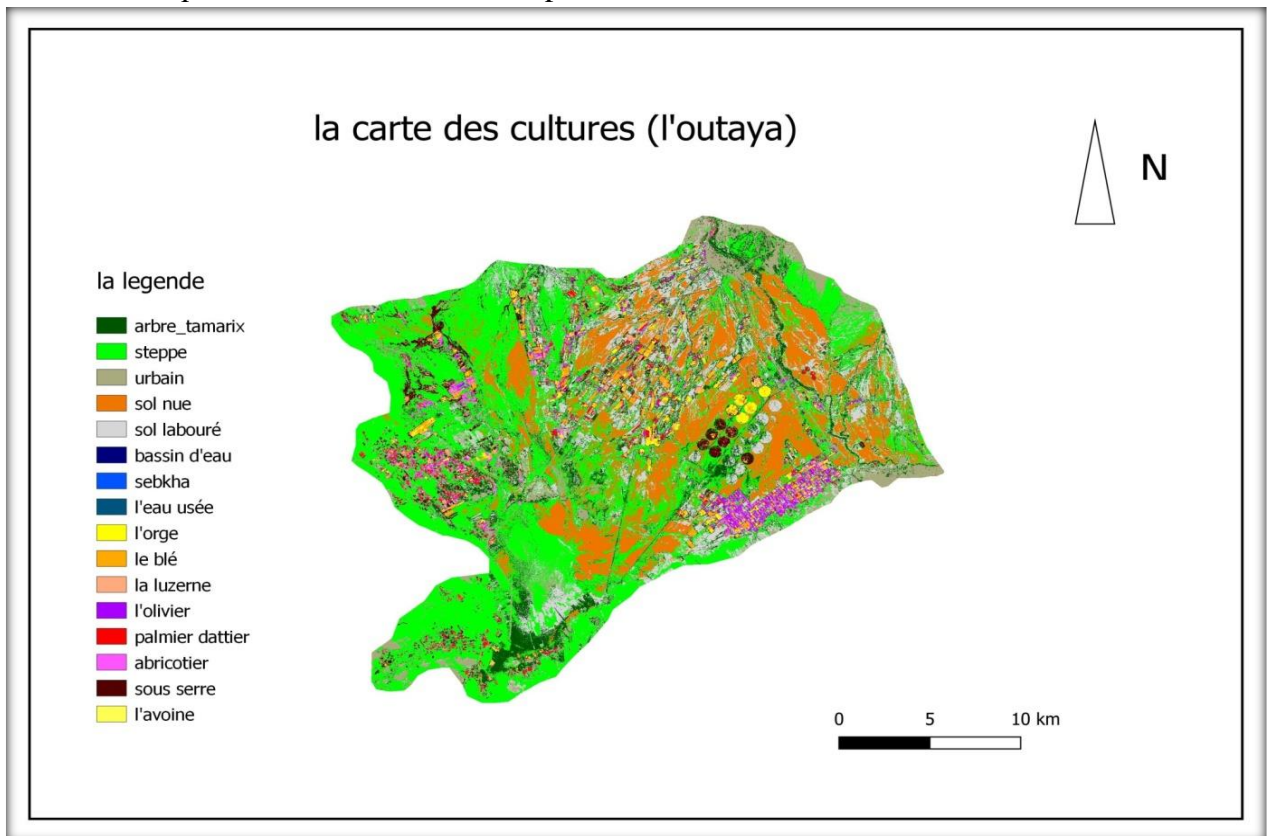


Figure N° 48 : la carte des cultures de la zone de l'outaya

la Classe	la somme des pixels	Pourcentage %	superficie (metre ²)
1	543557	9,894870516	54355700
2	2041410	37,16167324	204141000
4	565397	10,29244422	56539700
5	950437	17,30168326	95043700
6	751070	13,67242147	75107000
7	191	0,00347695	19100
8	52	0,000946604	5200
9	805	0,014654159	80500
10	116222	2,115696498	11622200
11	64916	1,181725954	6491600
12	29840	0,543205103	2984000

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

13	83319	1,516732774	8331900
14	94151	1,713917683	9415100
15	76611	1,39462085	7661100
16	175221	3,189709831	17522100
17	122	0,002220879	12200
total	5493321	100	549332100

Tableau N° 27 : les résultats statistiques obtenus après classification supervisé

1.5.4. Analyse de l'exactitude (la validation)

Une fois qu'on a créé notre carte des cultures, nous devons en mesurer l'exactitude, c'est ce que l'on appelle la validation. Connaître l'exactitude et la qualité de la classification est essentiel afin d'évaluer le degré d'utilité de la carte et d'identifier les futures améliorations nécessaires.

Après l'opération de validation, nous avons obtenue le tableau de la confusion des matrices (tableau N°28 et les pourcentages d'exactitude pour chaque classe ainsi que le taux d'exactitude globale comme ils figurent dans le tableau N° 29

Classification	1.0	2.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	Total
1.0	913	885	279	21	158	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4	0	2263
2.0	18	10946	90	550	308	0	0	0	0	3	0	5	0	5	13	0	11938
4.0	59	296	4476	38	44	0	0	0	0	2	3	12	15	5	43	0	4993
5.0	0	113	6	26501	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26656
6.0	82	651	95	142	3823	0	0	0	0	0	0	9	0	28	6	0	4836
7.0	0	0	0	0	0	51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	51
8.0	0	0	0	0	0	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
9.0	0	0	5	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0	0	50
10.0	0	58	1	0	2	0	0	0	1378	272	347	16	25	23	8	0	2130
11.0	0	2	0	0	0	0	0	0	370	2982	227	23	138	11	0	0	3753
12.0	0	1	0	0	0	0	0	0	131	78	2567	45	3	64	0	0	2889
13.0	0	36	45	0	46	0	0	0	75	19	10	1381	72	176	5	0	1865
14.0	4	4	22	0	11	0	0	0	34	37	5	39	942	61	2	0	1161
15.0	0	70	22	0	8	0	0	0	103	36	37	499	69	824	1	0	1669
16.0	9	148	40	0	8	0	0	0	5	2	7	9	0	0	1326	0	1554
17.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21	21
Total	1085	13210	5081	27252	4444	51	18	45	2096	3431	3203	2038	1265	1199	1408	21	65847

Tableau N°28 : La table des matrices de confusion

Overall accuracy [%]	= 88,378		
Class 1	producer accuracy [%] = 84,147	user accuracy [%] = 40,345	Kappa hat = 0,3935
Class 2	producer accuracy [%] = 82,861	user accuracy [%] = 91,690	Kappa hat = 0,8960
Class 4	producer accuracy [%] = 88,093	user accuracy [%] = 89,646	Kappa hat = 0,8878
Class 5	producer accuracy [%] = 97,244	user accuracy [%] = 99,419	Kappa hat = 0,9901
Class 6	producer accuracy [%] = 86,026	user accuracy [%] = 79,053	Kappa hat = 0,7754
Class 7	producer accuracy [%] = 100,000	user accuracy [%] = 100,000	Kappa hat = 1,0000
Class 8	producer accuracy [%] = 100,000	user accuracy [%] = 100,000	Kappa hat = 1,0000
Class 9	producer accuracy [%] = 100,000	user accuracy [%] = 90,000	Kappa hat = 0,8999

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

Class	10	producer accuracy [%] = 65,744	user accuracy [%] = 64,695	Kappa hat = 0,6353
Class	11	producer accuracy [%] = 86,913	user accuracy [%] = 79,456	Kappa hat = 0,7833
Class	12	producer accuracy [%] = 80,144	user accuracy [%] = 88,854	Kappa hat = 0,8828
Class	13	producer accuracy [%] = 67,763	user accuracy [%] = 74,048	Kappa hat = 0,7322
Class	14	producer accuracy [%] = 74,466	user accuracy [%] = 81,137	Kappa hat = 0,8077
Class	15	producer accuracy [%] = 68,724	user accuracy [%] = 49,371	Kappa hat = 0,4843
Class	16	producer accuracy [%] = 94,176	user accuracy [%] = 85,328	Kappa hat = 0,8501
Class	17	producer accuracy [%] = 100	user accuracy [%] = 100	Kappa hat = 1,0000
Kappa hat classification		= 0,850		

Tableau N° 29 : Les résultats détaillés de la validation par CSP

- ✓ La validation a été faite toujours par l'extension SCP/accuracy en utilisant les 30% des données réservés pour la validation.
- ✓ La table des matrices de confusion nous a donné un taux global d'exactitude de : 88.37%
- ✓ L'intervalle d'exactitude des différentes classes montre que ce dernier varie entre 40.34% comme minimum pour la classe des arbres naturelle (tamarix) et 100 % pour les classes de l'eau et l'avoine
- ✓ L'intervalle d'exactitude minimale des deux classes à savoir les arbres naturelle (tamarix) qui se trouve au niveau des lits d'Oued et les parcelles d'abricotier est causé par l'hétérogénéité et la mixité entre le sol et les arbres ce qui résulte des pixels moyennement homogènes.
- ✓ L'intervalle d'exactitude maximale 100 % représenté dans les classes 7 , 8 et 17 est dû principalement à l'homogénéité des pixels des polygones digitalisés ainsi que le nombre limité des parcelles échantillonnées par classe.
- ✓ L'intervalle d'exactitude des autres classes est très acceptable et très significatif à cause du travail d'échantillonnage réalisé conformément aux normes de la collecte des données.
- ✓ nous pouvons conclure que notre carte des cultures est validée et les différentes classes représentent la réalité du terrain.
- ✓ Cette carte sera utile pour l'utiliser comme outil d'aide à la décision pour les stratégies agricoles dans la région ainsi que pour l'estimation de la productivité de l'eau à l'échelle régionale.

2. LA PRODUCTIVITE DE L'EAU PAR TELEDETECTION

2.1. Le portail WaPOR

Assurer la sécurité alimentaire à l'avenir tout en utilisant les ressources en eau de manière durable est un défi majeur pour nous et les générations futures car l'agriculture est un utilisateur clé de l'eau. Un suivi attentif de la productivité de l'eau en agriculture et l'exploration des possibilités pour l'augmenter sont nécessaires. Mais comment pouvons-nous surveiller la performance de l'utilisation de l'eau en agriculture? La FAO a mis au point une base de données accessible en temps quasi réel et accessible au public, utilisant des données satellitaires permettant de suivre la productivité de l'eau en agriculture (FAO 2019 .WaPOR remote sensing for water productivity) (<http://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity>)

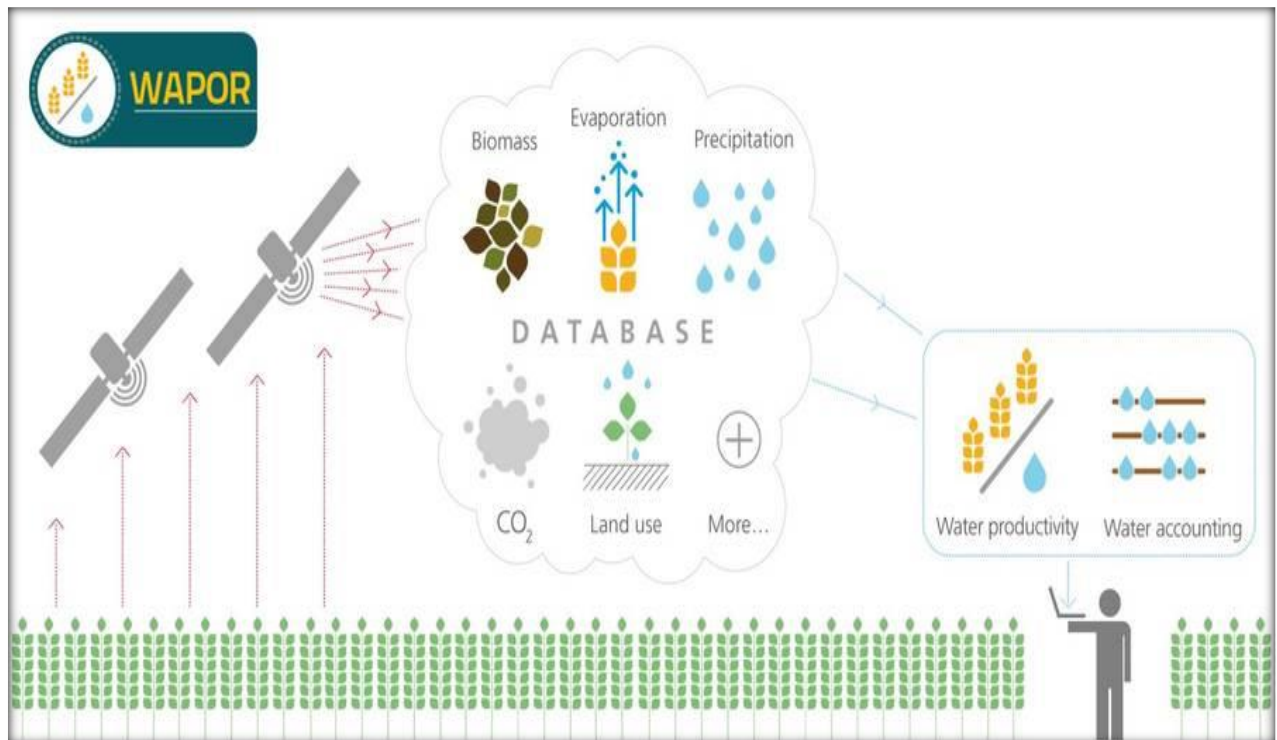


Figure N°49 : la méthodologie utilisée par l'FAO pour l'estimation de la productivité de l'eau par l'approche WaPOR (www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity et wapor.apps.fao.org)

2.2. Le projet WaPOR

Pourquoi la surveillance de la productivité de l'eau est-elle importante?

Atteindre la sécurité alimentaire tout en utilisant les ressources en eaux d'une manière durable est un défi majeur pour le présent et l'avenir des générations, en particulier face à des pressions accrues telles que la croissance économique et démographique et le changement climatique (FAO, 2018).

L'agriculture est responsable de 70% de tous les prélèvements d'eau douce dans le monde (khokhar, 2017). C'est pourquoi une surveillance attentive de l'eau et sa productivité dans l'agriculture nous permet de savoir dans quelle mesure nous utilisons notre eau pour les cultures et comment pouvons-nous mieux l'utiliser, en particulier dans les zones où l'eau est rare. L'amélioration de la productivité de l'eau représente souvent la voie la plus importante pour gérer la demande en eau dans l'agriculture.

Sur ce, Un suivi systématique permet d'évaluer les écarts de productivité de l'eau et d'identifier les solutions appropriées pour combler ces écarts.

La productivité de l'eau est définie comme la quantité de la production par rapport à la quantité d'eau effectivement consommée (FAO, 2018). La productivité de l'eau dans l'agriculture est exprimée en quantité de produit par unité d'eau bénéfique consommé par la culture.

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

2.2.1. La base de données WaPOR

WaPOR est le portail de la FAO pour surveiller la productivité de l'eau via Open accès aux données dérivées télédétectées. Il surveille la productivité de l'eau agricole en Afrique et au Proche-Orient et fournit accès ouvert à la base de données sur la productivité de l'eau et à ses milliers de couches ainsi que des cartes sous-jacentes, des séries chronologiques des analyses statistiques relatif aux zones concerné par le projet plus le téléchargement des données des variables clés associées à l'évaluation de la productivité de l'eau.

La télédétection peut aider à surveiller la productivité de l'eau d'une manière objective et rentable. Depuis avril 2017, la plateforme WaPOR propose des données opérationnelles et librement accessibles et une méthodologie techniquement solide.

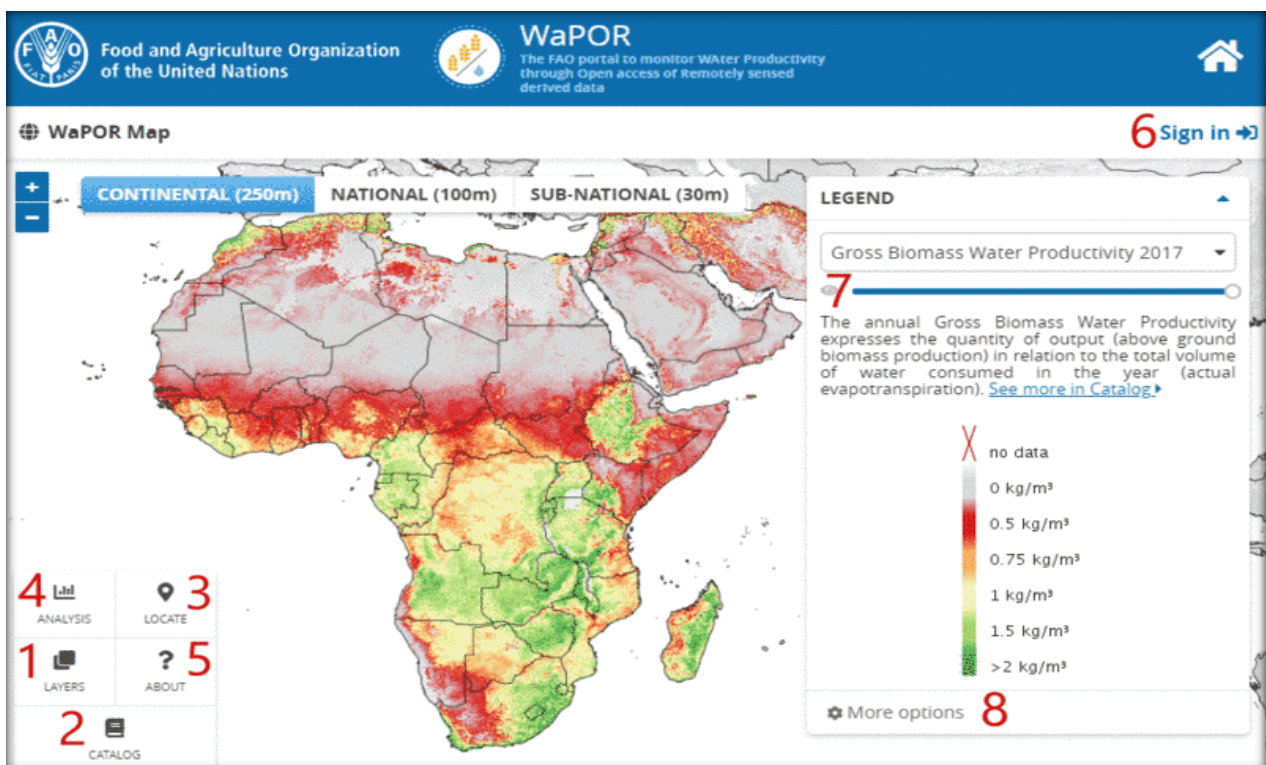


Figure N° 50 : L'Interface du portail WaPOR (*wapor.apps.fao.org*.)

2.2.2. Structure de la base des données du portail WaPOR.

Le portail dispose trois différentes résolutions spatiales comme suit :

Niveau 1: continental (résolution au sol de 250 m); (le cas de l'Algérie)

Niveau 2: 21 pays et cinq bassins fluviaux (100 m);

Niveau 3: 8 zones au Liban, en Égypte, en Éthiopie, au Mali, au Kenya, au Mozambique, au Soudan (30 m).

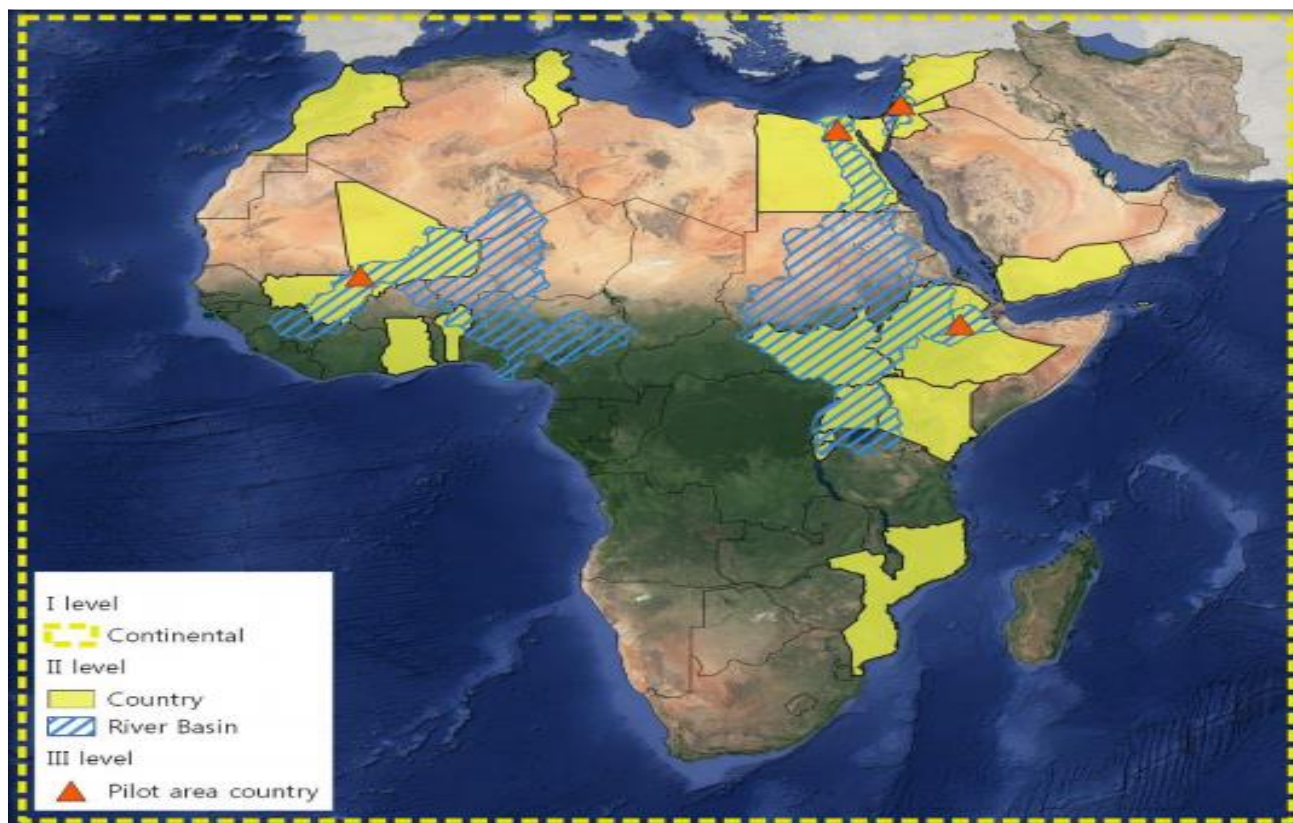


Figure N° 51 ; les couvertures des zones selon les niveaux des résolutions spatial
(wapor.apps.fao.org)

La base de données WaPOR assure une surveillance continue depuis d'avril 2009 à ce jour, à un intervalle de 10 jours ou quotidiennement (pour les précipitations et ET0) (www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity et wapor.apps.fao.org)

2.2.3. Variables ou paramètres disponibles sur le portail WaPOR:

Les paramètres disponibles dans la base de données WaPOR sont ;

- La productivité de l'eau
- L'évapotranspiration réelle et de référence
- la couverture terrestre (l'occupation des sols)
- La biomasse,
- Les précipitations,
- Le carbone
- L'absorption de dioxyde de carbone,
- Les rendements,
- l'indice de récolte et calendrier des cultures (niveaux 2 et 3 uniquement).

2.3. Comment estimer la productivité de l'eau dans notre région d'étude par télédétection.

2.3.1. Contexte de l'étude

L'amélioration de la productivité de l'eau représente souvent la voie la plus importante pour faire face à l'augmentation de la demande en eau dans l'agriculture. Un suivi systématique de la productivité de l'eau grâce à l'utilisation des techniques de télédétection peut aider à identifier les écarts de productivité de l'eau et à envisager les solutions pour combler ces lacunes.

Le portail de la FAO vise à surveiller la productivité de l'eau grâce au libre accès aux données dérivées de télédétection (WaPOR) qui donnent accès à 10 années d'observations continues sur l'Afrique et le Proche-Orient. Le portail offre un accès ouvert à diverses couches de données spatiales liées à l'utilisation des terres et de la production agricole et permet des requêtes directes de données, des analyses des séries chronologiques, des téléchargements des données de variables clés pour estimer les écarts de productivité de l'eau et des terres dans les périmètres irrigués et de l'agriculture pluviales. (FAO 2018)

La version bêta de WaPOR a été lancée le 20 avril 2017 couvrant l'ensemble de l'Afrique et du Proche Région Est avec une résolution spatiale de 250 m et, éventuellement complétée par des données à 100 m de résolution pour certains pays et bassins fluviaux.

2.3.2. Le concept de la productivité de l'eau

Dans les zones arides et semi arides, la productivité est souvent limitée par l'approvisionnement en eau des cultures. Des précipitations rares et variables provoquent des déficits hydriques qui réduisent la productivité des cultures. L'irrigation supprime les restrictions d'eau mais bien que la demande d'eau pour les cultures soit importante par rapport aux autres utilisations, les quantités d'eau disponibles sont limitée et soumises à la concurrence croissante des autres secteurs de la société.

la notion de la productivité de l'eau dans le secteur de l'irrigation se fonde sur l'idée de « Produire plus de grains par goutte d'eau » (FAO, 2002 ; Giordano et al., 2006). Il s'agit d'une mesure de l'accroissement des productions par unité d'eau consommée et s'exprime par :

$$WP = \text{le rendement} / \text{Apport en eau}$$

L'approvisionnement en eau des cultures provient de trois sources : l'irrigation, les précipitations saisonnières et l'eau présente dans le sol à la plantation.

Dans les zones arides et semi arides, l'irrigation est la principale source d'eau mais il faut aussi prendre en considération les pluies qui tombent pendant la saison végétative. Comme l'indique la figure N°52 cité ci après ;

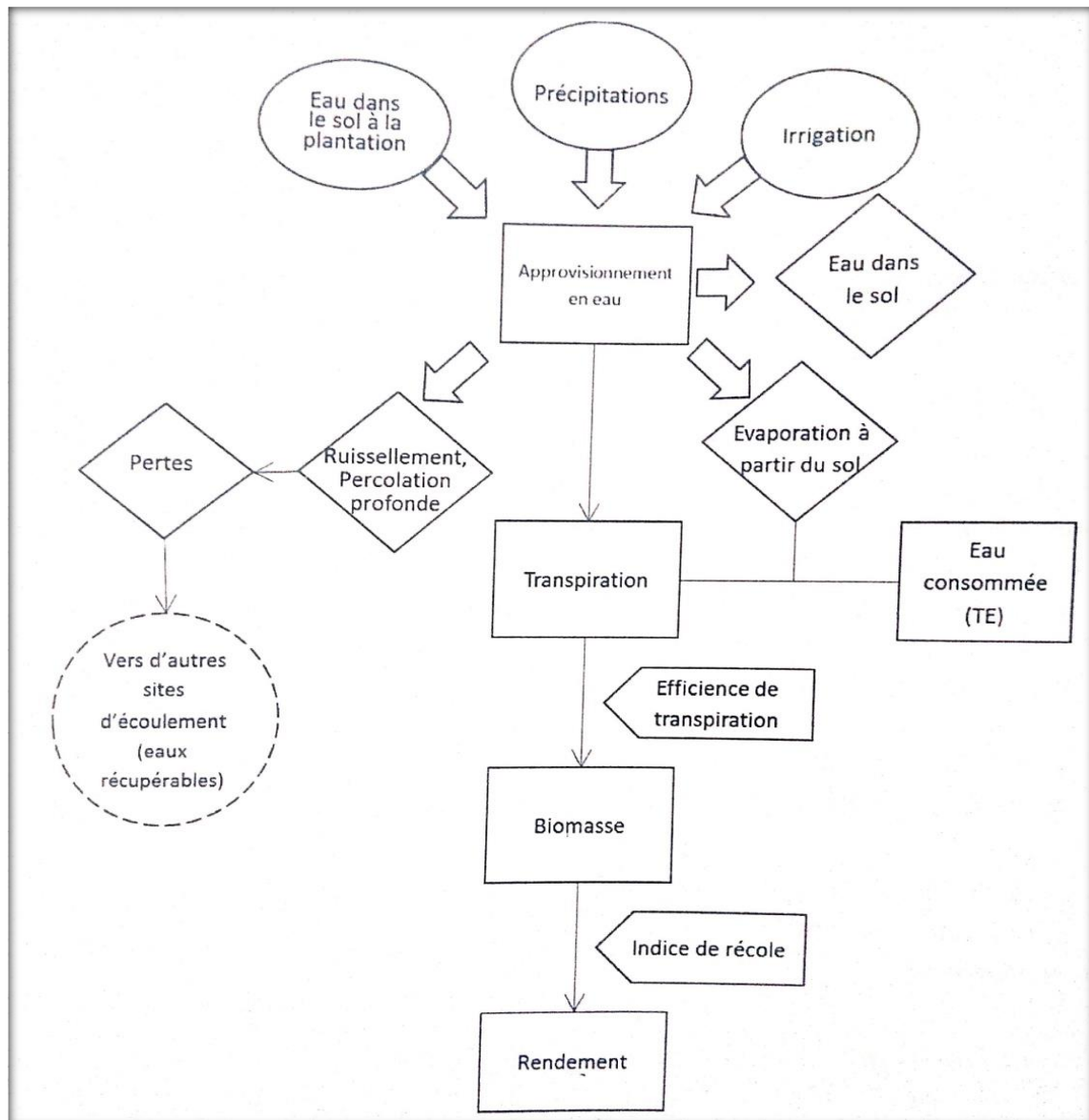


Figure N° 52; Les facteurs influençant la productivité de l'eau (FAO 2018)

D'après la figure N° 52 on peut conclure qu'une utilisation efficace de l'eau est atteinte en agriculture irriguée lorsque les pertes due au ruissèlement, à la percolation profonde et à l'évaporation sont minimisées et que l'utilisation d'eau pour la transpiration est optimisée.

2. 4. La méthodologie adoptée par WaPOR pour l'estimation de la productivité d'eau

Pour la réalisation de la carte de la productivité de l'eau, il existe deux méthodes, l'une par l'utilisation directe du portail et l'autre par l'utilisation des algorithmes et de la programmation informatique pour extraire cette carte.

2.4.1. La méthode directe

Les étapes à suivre pour la première méthode sont :

- ✓ la création d'un identifiant au niveau du portail pour s'identifier et pour faciliter l'accès à la base des données
- ✓ Choisissez les données sur la productivité de l'eau dans le catalogue.

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

- ✓ La localisation de la zone d'étude par leurs coordonnées géographiques par apport a la carte de la productivité d'eau d'Algérie
- ✓ Définir la durée du cycle (la date du début et la fin de plantation)
- ✓ Le lancement de l'opération et l'obtention des images TIFF des **TBP AETI WP**

2.4.2. La méthode indirecte

Cette méthode est basée sur l'utilisation des algorithmes et l'utilisation des programmes informatique telle qu'**Anaconda3 et jupyter** pour extraire les résultats auprès du portail WaPOR comme l'indique la figure N°53.

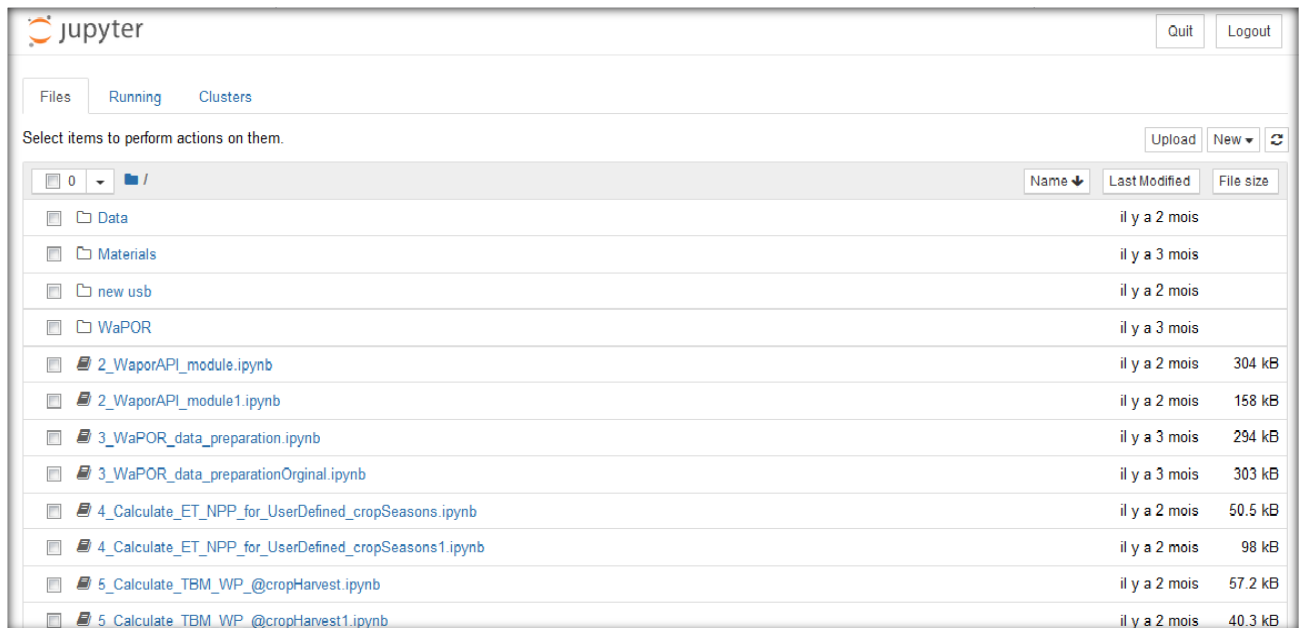


Figure N°53 ; l'interface du programme jupyter

Les étapes à suivre pour cette méthode sont :

- ✓ L'installation des programmes informatique **anaconda3, WaPORDocker et jupyter**.
- ✓ Login dans le portail pour s'identifier
- ✓ Avoir un mot de passe **API Token**
- ✓ Importer le shapefile de la zone d'étude
- ✓ Définir la période du semi jusque la récolte
- ✓ Lancer le programme anaconda et jupyter pour extraire les différents rasters.

2.5. Les paramètres nécessaires pour le calcul de la productivité de l'eau

2.5.1. Calcul de la production de la biomasse(Le rendement) par télédétection

Le rendement ou la biomasse est estimé par plusieurs paramètres tels que le NPP (net primary production) et GPP (gross primary production) qui vise à estimer la biomasse résultante durant le cycle du 20/11/2018 au 10/06/2019 .La production primaire nette NPP est d'abord convertie en production de matière sèche, puis en biomasse totale fraîche, enfin en rendement commercialisable.

le NPP est le GPP représente l'absorption du carbone due à la photosynthèse par la biomasse).

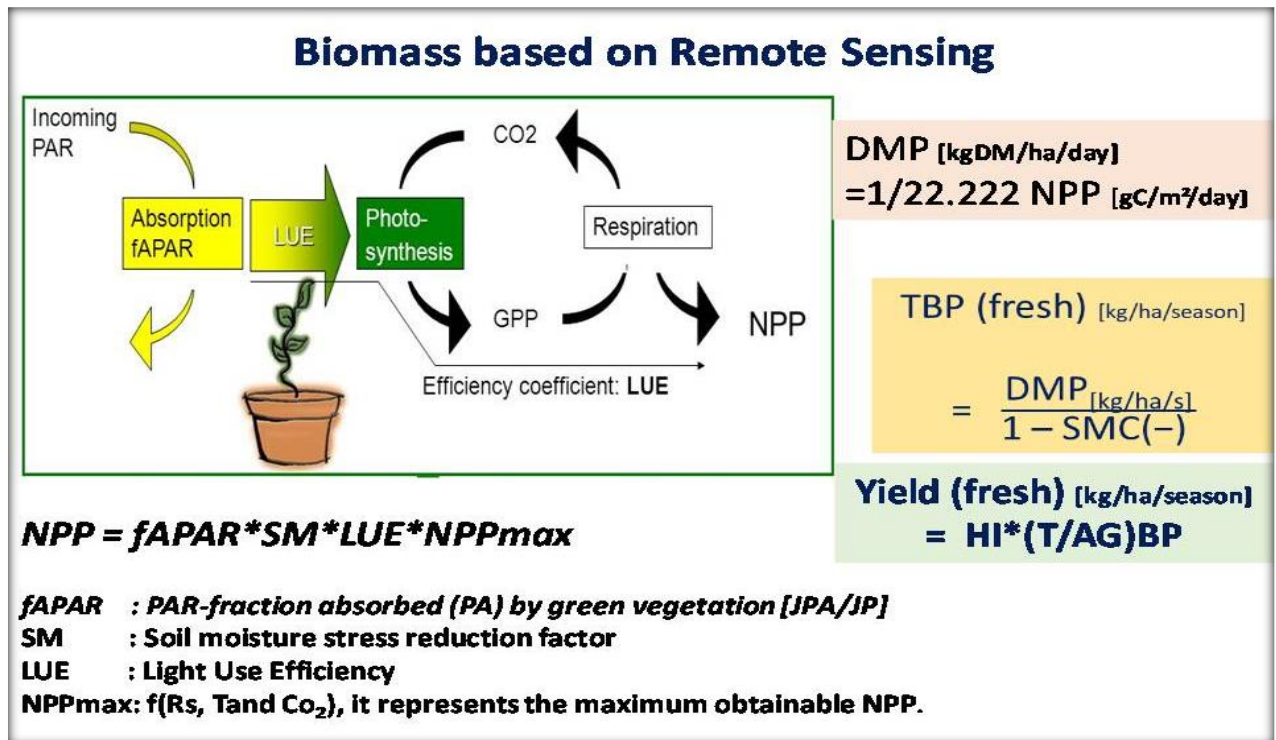


Figure N°54; la méthodologie adopté par WaPOR pour l'estimation de la Biomasse

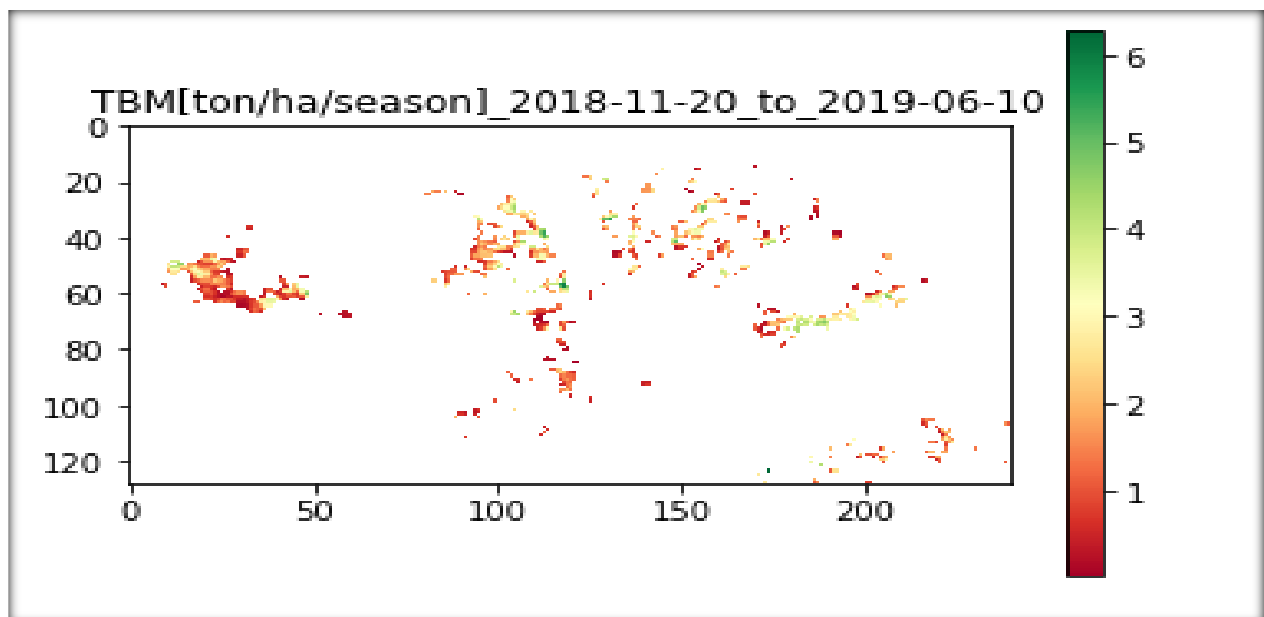


Figure N°55 : le raster TBM de la zone de Biskra

2.5.2. L'estimation de la consommation en eau ET par télédétection

La méthode utilisé (la plus fréquemment utilisée par télédétection pour calculer l'ET) est la modélisation du bilan énergétique.

L'énergie solaire est la source d'énergie. L'énergie qui arrive à la surface est soit:

- Reflétée dans l'atmosphère
- Utilisé pour les changements de température du sol: la température du sol devient plus chaude pendant la journée et se refroidit la nuit

CHAPITRE 05 : La cartographie par télédétection et la productivité de l'eau

- Utilisé pour les changements de température de l'air en faisant circuler le vent dans l'air.
- Utilisé pour l'évaporation des molécules d'eau et la transpiration (échange d'O₂ / CO₂ à travers les stomates des plantes)

Dans la modélisation du bilan énergétique, ET est généralement calculée comme résiduel comme la figure N° 56 le montre.

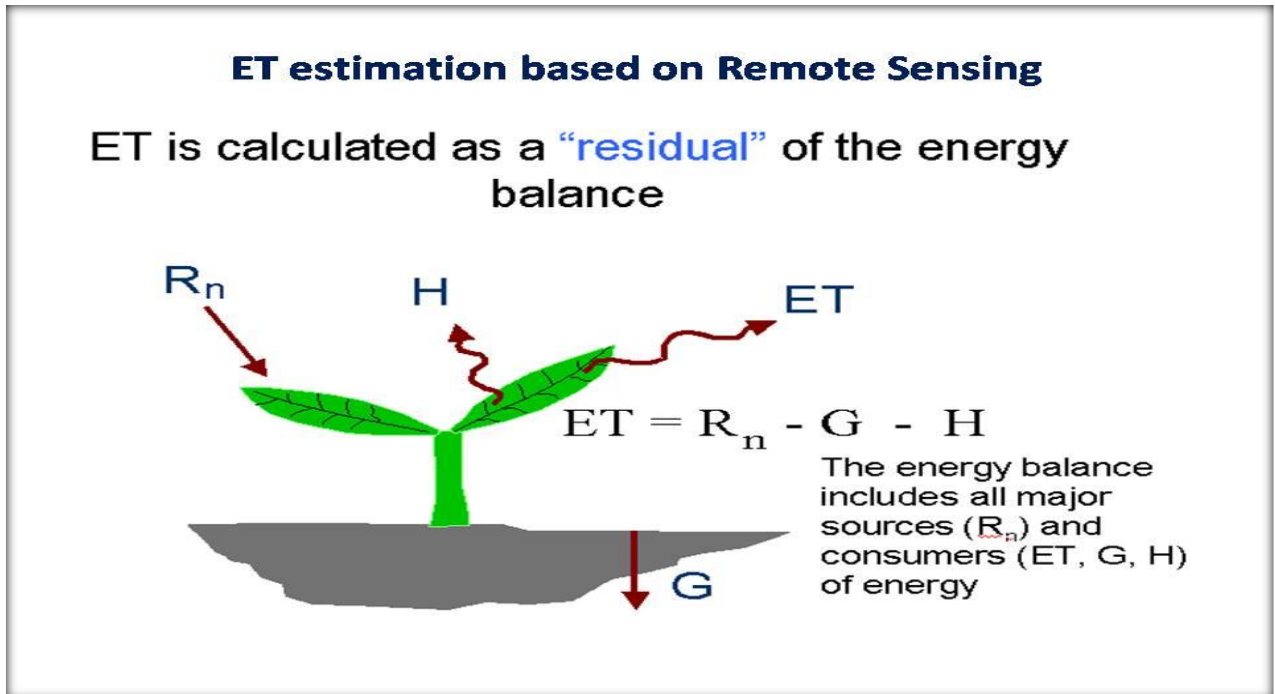


Figure N°56 : la méthodologie adopté par WaPOR pour l'estimation de l'ET

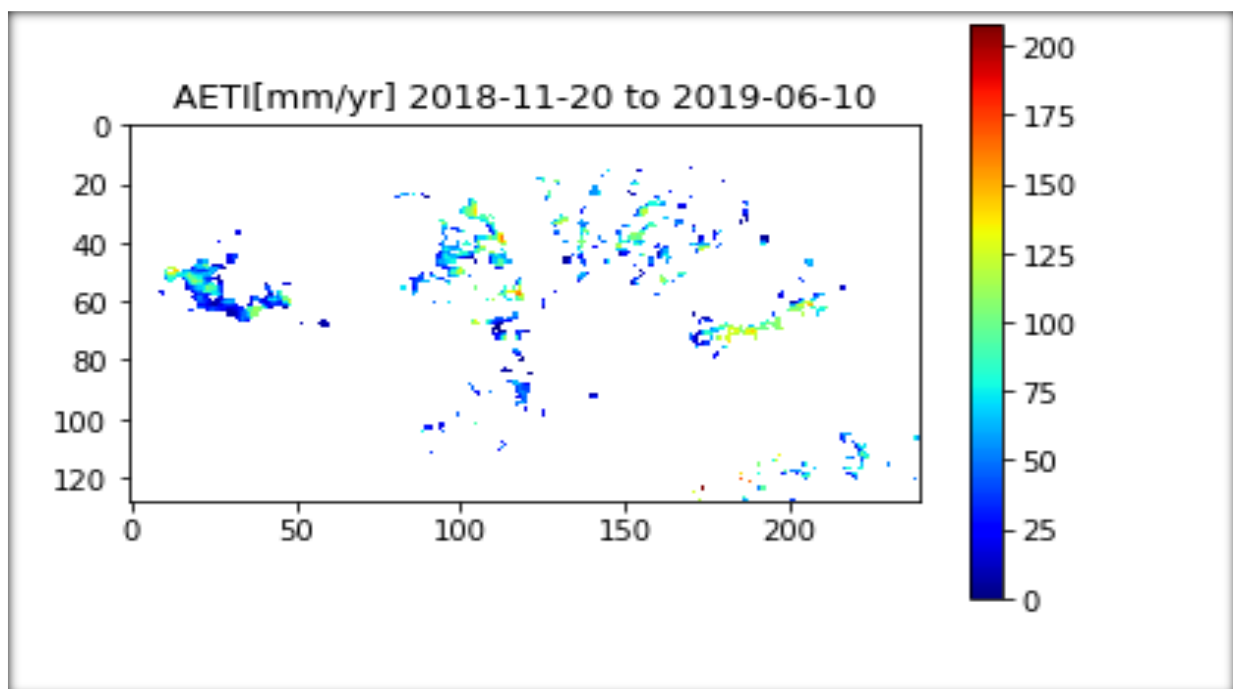


Figure N°57 : le résultat de l'estimation de l'évapotranspiration par télédétection dans la zone de Biskra (mm/ saison du 20/11/2018 au 10/06/2019)

2.5.3. La productivité de l'eau par télédétection

La productivité de l'eau est la résultante du rapport : rendement/apport en eau

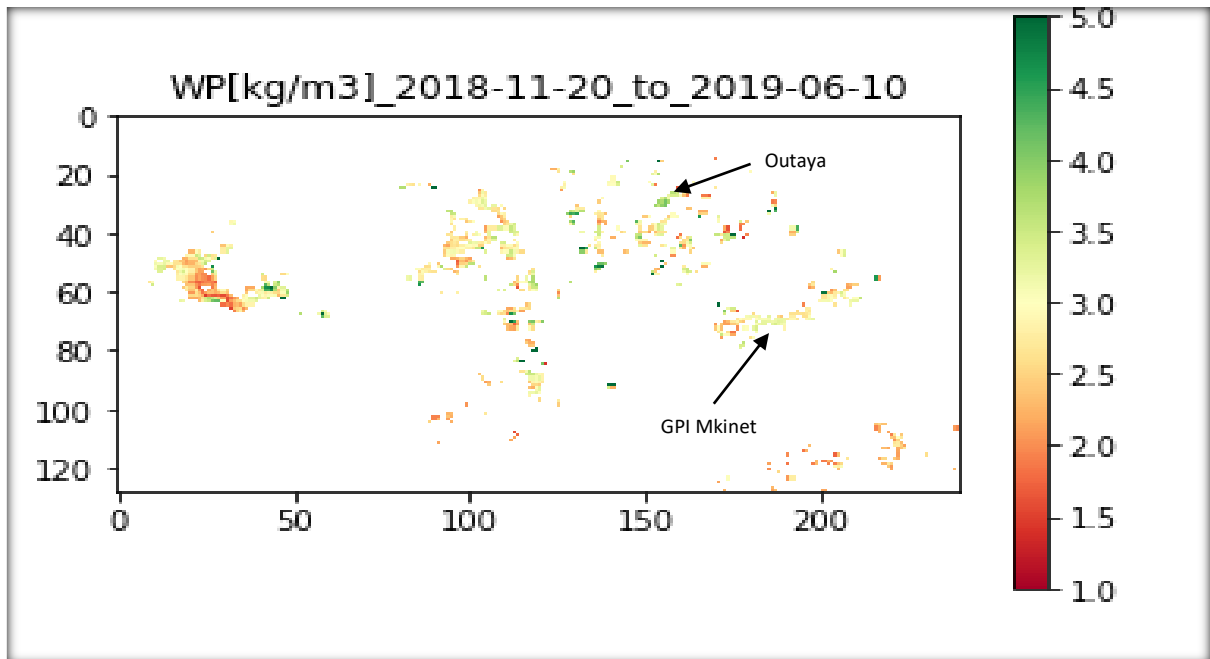


Figure N° 58 : la carte de la productivité de l'eau de la zone de Biskra

2.5.4. Interprétation des résultats

La carte de la productivité d'eau obtenue montre la différence dans les valeurs de la productivité d'eau entre les pixels ce qui est lié directement à la gestion d'irrigation dans cette zone et la diversification des cultures au niveau de la plaine de l'outaya.

Les valeurs des pixels sont exprimées en kg/m³ pour la période du 20/11/2018 jusqu'au 10/06/2019 ce qui correspond au cycle végétatif du blé dur et du blé tendre ainsi que de l'orge.

D'après ces résultats des pixels au niveau de GPI de Mkinet irrigué à partir du barrage des fontaines des gazelles, nous avons remarqué que les valeurs de la productivité au niveau de ce périmètre sont moyennes par rapport à d'autres parcelles au niveau de la plaine de l'Outaya irriguées par des eaux souterraines, et cela est dû à des perturbations durant la distribution de l'eau au niveau du GPI causées par la défaillance du réseau d'amenée ainsi que la distribution non conforme aux besoins exactes des cultures au période critique ce qui a engendré une gestion d'irrigation non rationnelle ainsi que l'obtention de rendements moyennes.

Cela nous oblige à proposer des diagnostics sur la situation et en proposant des solutions adéquates aux responsables pour l'amélioration de la productivité de l'eau au niveau de la plaine de l'outaya.

2.6. CONCLUSION GENERALE

Dans les régions aride et semi aride, La télédétection est devenu la voix la plus prometteuse et la plus efficaces pour le suivi spatio-temporelle des terres et notamment les terres destinées à l'agriculture. Sur ce, un bon traitement des ces images peut nous offrir des outils d'aide à la décision qui vont participer a bien analyser la situation actuelle relatif à la gestion de l'irrigation soit a l'échelle parcellaire ou à l'échelle régionale.

La disponibilité des images satellitaires et d'autre données de la télédétection gratuites de plusieurs années avec des différentes résolutions temporelles, spectrales et spatiales au niveau des différente portails open access nous donnera l'opportunité de les exploiter pour découvrir la réalité du terrain et de définir les modalités d'intervention rapide pour résoudre les problèmes liés à la gestion de l'irrigation ainsi que d'autre problématique lié au développement d'une agriculture durable.

D'après les enquêtes réalisées sur terrain pour la collecte des données, nous avons observé qu'une grande partie des parcelles exploitées pour l'agriculture sont des parcelles a petit surface (de 1 ha à 05 ha ce qui nécessite une résolution spatiale (la taille des pixels) au minimum de 30 m des images fournis par le portail WaPOR pour ressortir les détaille de la productivité de l'eau de toutes les cultures, mais malheureusement la taille des pixelles utilisée par le portail WaPOR pour l'algérie est de 250 m ce qui rend la différenciation des cultures de ces petit parcelles difficile et on peut juste différencier clairement les grandes parcelles telle que les grandes exploitations de plus de 06.5 ha.

Notre carte des cultures est utile par la superposition sur la carte de la productivité de l'eau dans l'objectif d'avoir un aperçu détaillé sur l'état de la productivité de l'eau notre zone d'étude.

Les travaux de cartographie de la productivité de l'eau par le projet WaPOR pour l'Algérie sont en cours de développement pour aboutir à des pixels plus petit comme c'est le cas de plusieurs pays du nord Afrique et le moyen orient.

Les résultats obtenus après le traitement des données de la télédétection nécessitent souvent des validations sur le terrain par la mise en place des sites d'expérimentation ou/et par des enquêtes pour mesurer le degré de fiabilité de ces données et de les calibrer dans les zones d'étude choisis.

L'indisponibilité des réseaux des stations agro-météorologique pour le suivi permanent de l'état du couver végétal dans les zones aride et semi aride nous à obliger d'aller ver de la télédétection pour contrôler et gérer les zones éloignés et cela dans le but de trouver des solutions adéquates à ces zones.

L'utilisation de la télédétection pour la création des cartes thématique dans le domaine de l'agriculture nous à donné les opportunités suivantes ;

- La vérification des terres réellement emblavé
- Le suivi de l'évolution de l'occupation des sols
- Développer la gestion de l'irrigation a grand échelle par des modèles numériques en utilisant les indices de végétation fondé par les chercheurs telle que le NDVI.
- L'amélioration de la productivité de l'eau

Après la réalisation de la carte des cultures dans notre zone d'étude et la comparer avec la carte de la productivité de l'eau obtenus, nous pouvons analyser et viser les zones qui nécessitent une intervention efficaces et proposer aux responsables des solutions adéquates qui vise à l'amélioration de la productivité de l'eau ainsi que la préservation des ressources naturelles.

Les références bibliographiques

Abderrahmane H, Laounia N, Khaldi A .Habib Azzaz., 2014. Contribution à la spatialisation de l'évapotranspiration d'un agro-système semi-aride en Algérie par utilisation de la télédétection et du modèle METRIC ; *Physio-Géo*, Volume 8. 19 P

Bah M D., 2016. Mise en place d'un outil de suivi de la végétation à partir de données de télédétection à basse résolution spatiale. 70 p.

Barnston A., 1992. Correspondance entre la corrélation d'erreur moyenne racine et les mesures de vérification de Heidke; Raffinement du score de Heidke. Notes et correspondance, Centre d'analyse climatique.

Bernard-Michel C., Régression linéaire. Rapport de Recherche et Développement, étude n° 70/00, LNE, 130 p.

Billy T., 2012. Augmenter la productivité de l'eau : un objectif de développement agricole. Fondation pour l'agriculture et la ruralité dans le monde paris-France. 6 p

Boucetta D., 2018. Effets des changements climatiques sur les cultures pratiquées et les ressources en eau dans la région de Biskra. Thèse Magister université de Biskra 186 p.

Boudjelel A., 2006. Détermination des besoins en eau des cultures à l'aide de logiciel cropwat 4.3 dans la wilaya de Tipaza. Mémoire, Institut National Agronomique El Harrach – Alger. P 112

C.T.G.R.E.F., 1979. Evaluation des quantités d'eau nécessaires aux irrigations. Ministère de l'agriculture de France, Division irrigation. P 188.

Cehma A., 2011. Le Sahara en Algérie, situation et défis MEP tassili N° 09 MDU 754, Université KASDI MERBAH- Ouargla, 8 p.

Cheverry C., 1995. Extension et diversité des phénomènes mettant en jeu les sels solubles. Comptes rendus. Académie d'agriculture de France, 81, 2. 42 –46.

Chuvieco E., 1998. Le facteur temporel de la télédétection: évolution phénoménologique et analyse du changement, *Journal of Remote Sensing*, 10. 1-9.

Dajoz R., 1970. Précis d'écologie. Ed. Dunod, Paris, 357 p

Diarra A., 2017. Suivi de l'évapotranspiration des cultures irriguées du Sud de la Méditerranée par télédétection multi-capteurs et modélisation globale. Sciences de la Terre. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. 212 p

DRE., 2016. Monographie de la Wilaya de Biskra, direction de la programmation de la Wilaya de Biskra, 206 p.

FAO., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper N° 56 Rome : FAO,300 p.

FAO., 2018. Méthodes de détermination de la productivité de l'eau. Département d'agronomie, Université de Cordoue : 22 p

FAO., 2018. Using remot sensing in support of solutions to reduce agriculturales water productivity gaps. Rome 74 p.

FAO., 2019 .WaPOR, remote sensing for water productivity. <http://www.fao.org/in-action/remote-sensing-for-water-productivity>.

FAO., 2019. WaPOR quality assessment Technical report on the data quality of the WaPOR FAO database version 1.0 Rome 134 p.

Ferdinand B., 1994. Télédétection de l'environnement dans l'espace francophone. presses de l'université de Qubec, 592 p.

Gao, B. C., 1996. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment 58: 257-266

Halitim, A., 2011. L'aridoculture et le développement durable. Algerian journal of arid environment, 2011, 4 p.

Hamdy A, Makhlouf A., 2002. Advances in soil salinity and drainage management to save water and protect the environment. Ed, Ministry of Agriculture-Algeria, 508 p.

Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E.P, Gao X. and Ferreira L.G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote sensing of environment, 83(1-2), pp.195-213.

Khachai S., 2001. Contribution à l'étude du comportement hydro physiques des soles des périmètres d'I.T.D.A.S, plaine de l'Outaya. Thèse Magister. Université de Batna. 223 p.

Khader M., 2019. Apport de la géomatique a l'analyse spatio-temporelle des parcours steppique : cas de la région de djelfa – algérie. Thèse de doctorat. Université de Biskra. 157 p.

Khadraoui A., 2007. Eau et impact environnemental dans le Sahara Algérien. ISBN 978-9961.Ouargla, 300p.

khadraoui A., 2005, Sols et Hydraulique Agricole dans les Oasis Algériennes, ED Ouargla, 310 p.

Kohavi R., 1995. A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy estimation and Model Selection. IJCAI. 5 P.

Kortli M., 2013. Travaux pratique de télédétection. Université de Manouba Tunis 125p.

Kwast H, Menke, K.,2019. QGIS for hydrological application, recipes for catchement hydrology and water management. Locale press LCC. 164 p.

Laib K., 2014. Evaluation des performances des systèmes irrigués dans les ziban, cas de la plasticulture dans la commune d'Elghrous (W. Biskra). Thèse magister. Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach – Algérie. 139 p.

Masmoudi A., 2011. Effet de la salinité des eaux et la fréquence d'irrigation sur le sol et le végétal ; Courrier du Savoir – N°11, Février 2011, p.61-69

Masmoudi A., 2012. Problèmes de la salinité liés à l'irrigation dans la région saharienne : cas des Oasis des Ziban. Thèse de doctorat en sciences. Université de Biskra, 137 p.

Musy A., 2005 .Chapitre 7 : La mesure hydrologique ; Cours d'hydrologie générale sur Laboratoire d'écohydrologie ECHO.

Office National de la Météorologie ., 1989-2018. les bulletins Décadaires d'informations climatiques et agro météorologiques de l'Algérie.

Organisation météorologique mondiale, *Évapotranspiromètre* , Glossaire de la météorologie, sur Eumetcal.

Ould rebai A., 2005. Diagnostic et caractérisation des pivots artisanaux dans la vallée d'El Oued. Thèse magister. Université de Khemis Miliana. 127 p.

Ozenda P., 1991. Flora and végétation of the Sahara. CNRS.

Razagui A, Bachari N.E.I., 2014. Analyse spatio-temporelle de l'indice de végétation NDVI calculé à partir des images satellites NOAA et MSG.Revue des énergies renouvelables vol.17N°3 497-506.

Simonneaux V, Lepage M, Helson D, Metra J, Thomas S, Duchemin B., Cherkaoui M, Kharrou H, Berjami B, Chehbouni A.,2009. Estimation spatialisée de l'évapotranspiration des cultures irriguées par télédétection : application à la gestion de l'irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc) Sécheresse ; 20 (1) : 123-130

Tarik khokhar blogs.worldbank.org.

Thomas J J, Chen D, Cosh M, Fuqin L, Anderson M, Walthall Ch, Doriaswamy P, Ray Hunt E., 2004. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans.Remote sensing of environment, ELSEVIER 92, 475–482.

USDA., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. Agriculture Handbook 60.

Van Hoorn, J.W., 1991, July. Saline irrigation problems and perspectives. In European Mediterranean conference on the use of saline water in irrigation. MAI/Bari.

Viergever k, C.N.Pauline, 2019. Méthodes de télédétection pour la cartographie des cultures. Eleaf. FAO : 87 p

L'apport de la télédétection pour l'estimation du coefficient cultural Kc de la culture d'orge (*Hordeum vulgare*) en région aride (Biskra Algérie)

S. Merdaci^{1, 2,*}, A. Masmoudi²

¹ Institut Technique de développement de l'Agronomie Saharienne (ITDAS)

² Département des sciences agronomiques, Université de Biskra (Laboratoire; Diversité des Ecosystèmes et Dynamique des Systèmes de Production en Zones arides **DEDSPAZA**)

*Corresponding author: s_merdaci29@yahoo.fr; Tel.: +213 665 9367 68; Fax: +213 33 62 48 87

ARTICLE INFO	ABSTRACT/RESUME
Article History : Received :dd/mm/yyyy Accepted :dd/mm/yyyy	Résumé : La gestion rationnelle de l'eau d'irrigation à l'échelle parcellaire ou à l'échelle régionale revêt une importance primordiale pour satisfaire les besoins en eau de tous les agriculteurs d'une manière durable. L'indisponibilité de l'information ou des données indispensables à la bonne gestion de ces eaux à l'échelle spatiale et temporelle nous oblige à trouver d'autres alternatives plus performantes et plus fiables, et cela pour améliorer les approches actuelles qui se basent généralement soit sur les formules empiriques ou sur des estimations standards (les calendriers d'irrigation). Sur ce, la télédétection spatiale apparaît comme la voie la plus prometteuse en proposant une vision objective, exhaustive et répétitive sur de grandes surfaces. La télédétection qui se base sur l'interaction rayonnement électromagnétique-cible, permet d'accéder à certaines variables clés pilotant le processus d'évapotranspiration. La télédétection spatiale offre maintenant une information spatialisée et actualisée concernant la végétation ainsi que les séries temporelles d'images qui renseignent de plus sur le développement réel de la végétation (et non son développement supposé) notamment par le biais d'indices de végétation comme le (NDVI). Cette information est bien corrélée à l'activité photosynthétique des végétaux, elle-même déterminante de l'évapotranspiration.
Mots clés : Modélisation ; Télédétection ; NDVI ; Evapotranspiration de la culture ETc; Coefficient cultural Kc.	Abstract: The rational management of irrigation water on a plot or regional scale is very important to find the water requirements of all farmers in a sustainable manner. The unavailability of information or data essential for the good management of these waters at the spatial and temporal scale forces us to find other more efficient and reliable alternatives to improve current approaches that are usually based on either empirical formulas or standard estimates (irrigation schedules). Spatial remote sensing is emerging as the most promising solution, offering an objective, exhaustive and repetitive view of large areas. Remote sensing, based on the electromagnetic-target interaction, provides access to key variables driving the evapotranspiration process. Spatial remote sensing offer now spatialized and actual information on vegetation as well as time series of images that provide further information on the actual development of vegetation (not its assumed development), particularly through vegetation indices such as the (NDVI). This information is well correlated with the
Key words: Modeling, RemoteSensing, NDVI, Crop Evapotranspiration ETc, Cultural Coefficient Kc.	Notre travail vise à trouver la relation entre le Kc et le NDVI en élaborant un modèle de régression polynomiale ou linéaire $Kc=f(NDVI)$ pouvant aboutir à la formule $ETc = f(NDVI) \times ETP$ déterminante des besoins en eaux de la culture d'orge.

photosynthetic activity of plants, which is itself a determinant of evapotranspiration. Our work aims is to find the relation between K_c and NDVI by finding a polynomial or linear regression model $K_c = f(NDVI)$ and which serves for its part to find the formula $ET_c = f(NDVI) \times ET_0$ determining the water requirement of barley.

I. Introduction

En Algérie, le Sahara occupe plus de 80 % de la surface totale du pays. Son climat est caractérisé notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, de fortes températures, une luminosité intense, et une forte évaporation [1]. Au Sahara, l'agriculture constitue l'activité principale et un facteur de stabilisation des populations. C'est à ce titre que l'état a retenue dans le cadre de la mise en valeur dans le sud l'option « agriculture saharienne ». Elle vise un développement harmonieux des régions concernées, favorisant une gestion rationnelle des ressources en eau et en sol, ainsi que la réhabilitation et l'extension de la phoeniciculture (agriculture d'oasis) de même, que la poursuite de la mise en valeur et la promotion des cultures stratégiques au moyen de systèmes de productions valorisant les particularités climatiques du grand sud et notamment la gestion durable de la ressource en eau précieuse. [2]

Sur ce, la gestion rationnelle de cette eau est une des priorités des politiques environnementales en Algérie à cause de la très faible disponibilité en quantité et en qualité. L'agriculture irriguée concentrée dans la région de Biskra est de loin le plus gros consommateur d'eau de la région, puisqu'elle utilise environ 85% [3] des ressources totales mobilisées. La gestion rationnelle de l'eau d'irrigation à l'échelle parcellaire ou à l'échelle régionale revêt donc une importance primordiale pour satisfaire les besoins en eau de tous les agriculteurs, d'une manière durable. L'indisponibilité de l'information ou des données indispensables à la bonne gestion de ces eaux à l'échelle spatiale et temporelle nous oblige à trouver d'autres alternatives plus performantes et plus fiables.

La télédétection spatiale offre maintenant une information spatialisée et actualisée concernant la végétation ainsi que les séries temporelles d'images qui renseignent de plus sur le développement réel de la végétation (et non son développement supposé) notamment par le biais d'indices de végétation comme le NDVI (Normalized

Différence Vegetation Index). Cette information est bien corrélée à l'activité Photosynthétique des végétaux, elle-même déterminante de l'évapotranspiration [4]

II. Matériel et méthodes

II.1. Matériel

II.1.1. Description de la zone d'étude

Le site expérimental se situe dans la plaine de l'Outaya (wilaya de Biskra) dans le Sud Est Algérien au niveau de l'annexe de la ferme de démonstration et de production de semence (FDPS) de l'Institut Technique de Développement de l'Agriculture Saharienne (ITDAS) avec les coordonnées géographiques (34° 55' N) et (5° 39' E) et une altitude de 180 m.

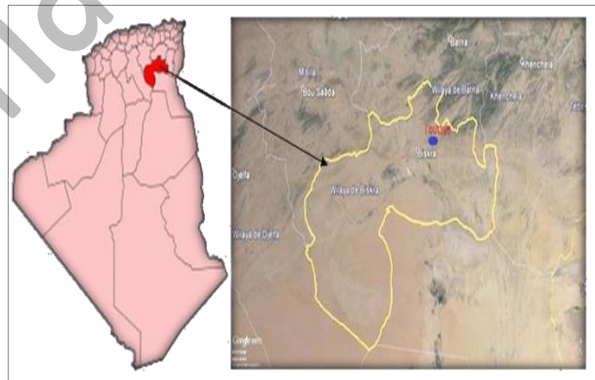


Figure 1 . Situation géographique du site de l'Outaya (la carte via Google).

II.1.2. Les caractéristiques pédoclimatiques de la zone d'étude

II.1.2.1 Le sol

Le sol a une texture argilo-limoneuse ayant les caractéristiques suivantes (CE=12 dS/m de l'extrait saturé, pH de 8.17 et calcaire total de 39%). La réserve utile (RU) est de 180 mm/m et le taux de matière organique (MO) est de 2%.

Les analyses du sol et la granulométrie ont été faites au niveau du laboratoire de l'ITDAS.

Tableau 1. La granulométrie du sol du site expérimental

Granulométrie				
Argile (%)	Limon (%)		Sable (%)	
	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier
34.62	26.23	18.52	20.13	0.50
	44.75		20.63	

II.1.3L'eau d'irrigation

Selon la classification des eaux [5], celles du site expérimental sont classées comme des eaux très salées CE >4 ds/m. Ces eaux sont pompées à partir d'un forage qui débite 13L/set proviennent de la

nappe méo-pliocène à une profondeur de 60m. Les analyses physicochimiques de l'eau ont été faites au niveau du laboratoire de l'ITDAS, et récapitulées dans le tableau N°02

II.1.4. La pluviométrie

Figure 2. La parcelle d'étude d'orge (photo prise

Echantillon	CE (ds/m)	pH	Cations (méq/l)				Anions (méq/l)			
			Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ⁻
Eau de forage	4.8	7.5	25.35	6.4	7.4	0.06	0.8	5.2	26.46	21.46

Tableau 2 . Les caractéristiques chimiques de l'eau utilisée pour l'irrigation

Le total des précipitations annuelles dans la région de Biskra durant la période (1989-2017) est très faible (153,4 mm/an) et caractérisé par une irrégularité remarquable avec un maximum de sécheresse qui a été enregistré durant le mois de juillet avec une pluviométrie de 2.2 mm par contre durant le mois le plus arrosé (octobre), elle est de 19.7 mm[6]

II.1.5. La température

La température est le second facteur après la précipitation qui conditionne le climat d'une région. La région de Biskra est caractérisée par de fortes températures pouvant atteindre une moyenne annuelle de 23 °C. Les mois les plus chauds durant la période (1989-2017) sont Juin, Juillet et Août présentant respectivement une moyenne mensuelle de 31,5°C, 34,7°C et 34.1°C. Les mois les plus froids sont ; Décembre avec 14,8°C, Janvier avec 12, 1°C et février avec 13,5°C.

II.2.Méthode de travail

La parcelle qui fait l'objet de notre étude est de 05 ha, occupée par la culture d'orge (*Hordeum vulgare*), destiné à l'alimentation du bétail et qui se situe au niveau de la FDPS de l'ITDAS. Cette parcelle est irriguée par le système d'aspersion (poste intégral fixe) qui couvre la totalité de la parcelle. La figure N° 02 montre notre parcelle d'étude austade montaison.



le 15/03/2018)

Le travail est basé sur le traitement des images satellitaires téléchargées chaque 16 jours auprès de LANDSAT 8 OLI/TIRS C1 level-1 (tableau 03) de la même zone (Biskra) ou se trouve notre parcelle d'étude durant la période du cycle de l'orge « décembre à mai »

La résolution spatiale des pixels est de 30 m, et on les a transformés à 15m en utilisant la méthode du spectral-sharpening (gram-schmidt) en utilisant le logiciel ENVI 4.7

Tableau 3. Description technique du satellite
landsat 8 OLI/TIRS

	Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Band 1 - Coastal aerosol	0.43 - 0.45	30
	Band 2 - Blue	0.45 - 0.51	30
	Band 3 - Green	0.53 - 0.59	30
	Band 4 - Red	0.64 - 0.67	30
	Band 5 - Near Infrared (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Band 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Band 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Band 8 - Panchromatic	0.50 - 0.68	15
	Band 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
Launched February 11, 2013	Band 10 - Thermal Infrared (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	Band 11 - Thermal Infrared (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

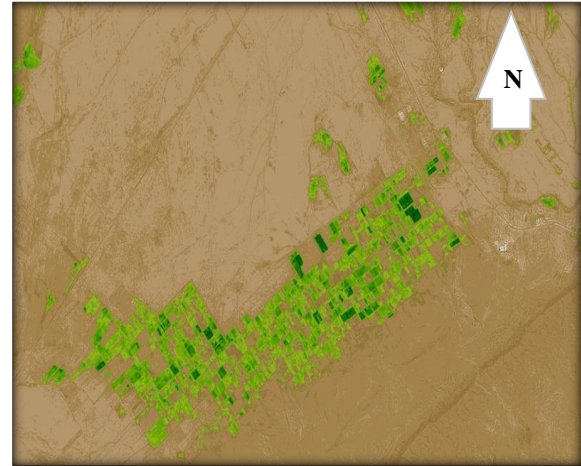


Figure 3. Image satellitaire après traitement par ENVI 4.7

II.2.1. Données utilisées

II .2.1.1. Etape 1

Les images ont été téléchargées auprès du site « earthexplorer.usgs.gov » gratuitement durant tout le cycle de l'orge de décembre, à la sénescence en mai.

II .2.1.2. Etape 2

Parmi plusieurs indices de végétation qui existent, l'indice le plus connu et le plus utilisé est l'indice de végétation par différence normalisée ou indice de tucker (NDVI en anglais)[7] son expression est la suivante ;

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \quad (1)[8]$$

L'indice de végétation est un indicateur de l'activité chlorophyllienne de la végétation, les valeurs de NDVI sont comprises en théorie entre le -1 et +1 ; les valeurs négatives correspondent aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau et les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances sont à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge.

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 entre (0,7 et 1) correspondent aux couverts végétaux les plus denses [9]

Pour le traitement des images satellitaires (format TIFF), chaque image a été traitée séparément par le logiciel ENVI 4,7 pour faire ressortir les valeurs de l'NDVI de chaque image qui correspondent à une période du cycle végétatif.

Les valeurs NDVI ont été calculées à partir des images à ciel clair élaborées sur une période de 16 jours (figure 03).

Le travail est réalisé dans le but de trouver une relation entre les valeurs du coefficient culturel Kc et les valeurs du NDVI sachant que le Kc est un paramètre déterminant des besoins en eau de la culture ou l'évapotranspiration de la culture ETc

$$ETc = Kc \times ETP \quad (2) [10]$$

Pour le calcul d'ETc, on a besoin d'estimer l'ETP à partir de la station agro météorologique de l'aéroport de la wilaya de Biskra. Le Kc empirique est estimé à partir du bulletin FAO (1998)[11]

Le Kc de la culture d'orge change durant le cycle de la culture entre 0,1 et 1,15 selon les stades végétatifs de la culture[11]

Le NDVI décrit l'activité photosynthétique du couvert végétal.

Sur ce, notre travail vise à trouver la relation entre le Kc et le NDVI sur la base du modèle $Kc=f(NDVI)$

$$ETc = f(NDVI) \times ETP \quad (3)$$

III. Résultats de la modélisation

Les tableaux cités ci-dessous montrent la relation entre le Kc empirique et le NDVI dans notre cas d'étude

III.1. La régression polynomiale

Tableau 4. Résultats du modèle par régression polynomiale

Le modèle					
Date	NDVI : x	Kc : y	Kc Modèle	Résidus	Résidu au carré
18/12/2017	0,217	0,1	0,139	0,039	0,002
03/01/2018	0,272	0,2	0,137	-0,063	0,004
19/01/2018	0,535	0,3	0,265	-0,035	0,001
04/02/2018	0,653	0,513	0,398	-0,115	0,013
20/02/2018	0,934	0,725	0,902	0,177	0,031
08/03/2018	0,966	0,938	0,976	0,038	0,001
24/03/2018	1,00	1,15	1,059	-0,091	0,008
09/04/2018	1,00	1,15	1,059	-0,091	0,008
25/04/2018	0,876	0,775	0,776	0,001	0,000
11/05/2018	0,732	0,4	0,513	0,113	0,013
27/05/2018	0,234	0,1	0,137	0,037	0,001
				Moy des carrés des résidus	0,008

Tableau 5. Les résultats du test RMSE

RootMean Square Error	
RMSE (Erreur Quadratique) =	0,087
Le modèle estime très bien le Kc	

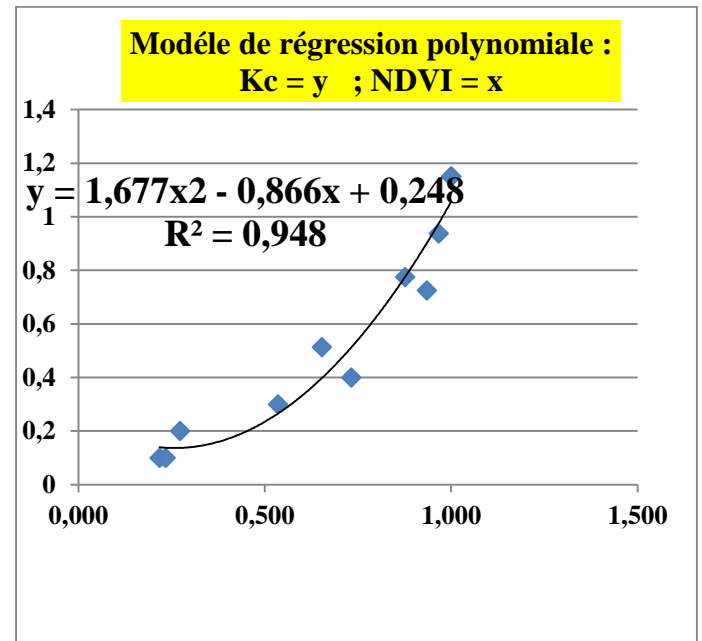


Figure 4. Modèle de régression polynomiale

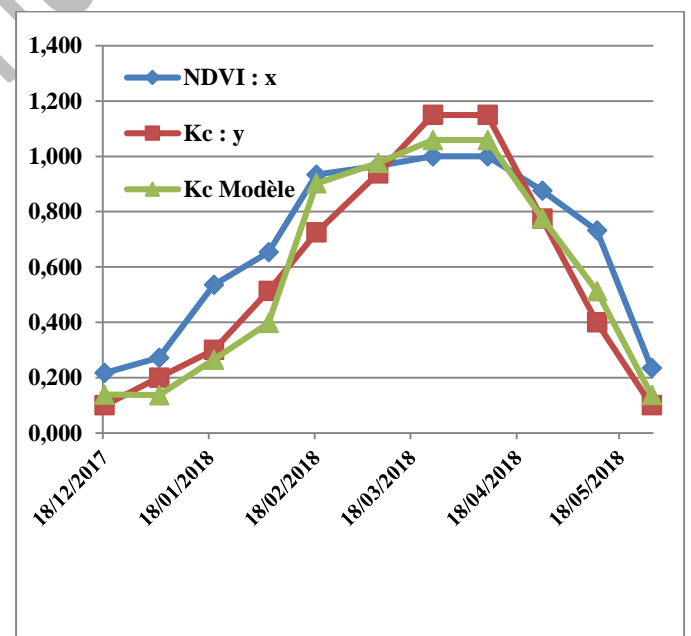


Figure 5. Illustration de la relation entre le NDVI et le Kc

III.2. La régression linéaire

Tableau 6. les résultats de la régression linéaire

Le modèle					
Date	NDVI : x	Kc : y	Kc Modèle	Résidus	Résidu au carré
18/12/2017	0,217	0,1	0,041	-0,059	0,004
03/01/2018	0,272	0,2	0,105	-0,095	0,009
19/01/2018	0,535	0,3	0,414	0,114	0,013
04/02/2018	0,653	0,513	0,553	0,040	0,002
20/02/2018	0,934	0,725	0,883	0,158	0,025
08/03/2018	0,966	0,938	0,920	-0,018	0,000
24/03/2018	1,00	1,15	0,960	-0,190	0,036
09/04/2018	1,00	1,15	0,960	-0,190	0,036
25/04/2018	0,876	0,775	0,814	0,039	0,002
11/05/2018	0,732	0,4	0,645	0,245	0,060
27/05/2018	0,234	0,1	0,061	-0,039	0,002
				Moy des carrés des résidus	0.017

Tableau 7 .Résultats du Test RMSE

RootMean Square Error	
RMSE (Erreur Quadratique) =	0,131
Le modèle estime bien le Kc	

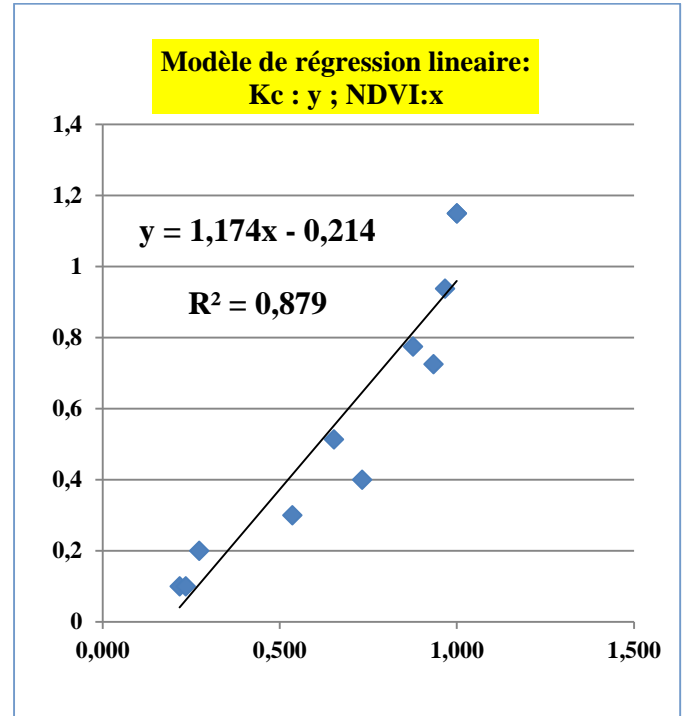


Figure 6. Modèle de régression linéaire

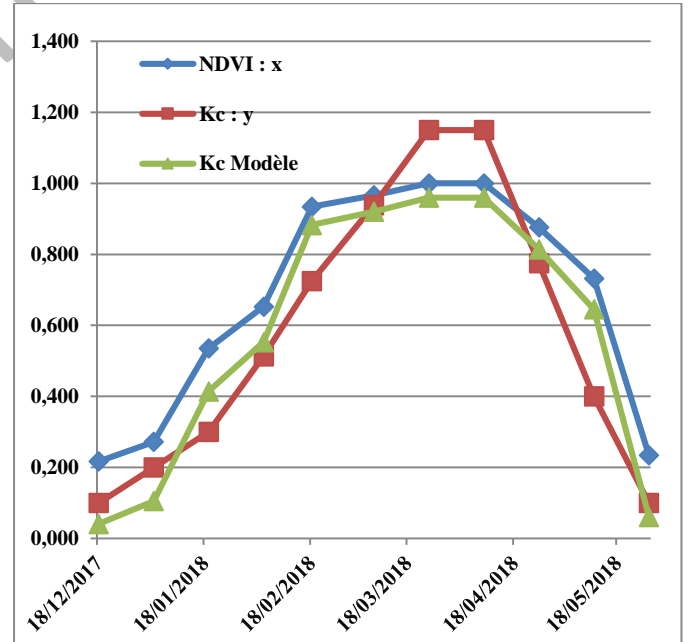


Figure 7. Illustration de la relation entre le NDVI et le KC par régression linéaire

On vise à trouver la meilleure relation entre les valeurs du NDVI et le développement de la culture Kc au niveau du site expérimental de l'orge.

L'interprétation de cette corrélation a été faite par une régression polynomiale et une régression linéaire pour trouver la meilleure corrélation et le meilleur modèle d'estimation du Kc réel à partir des images satellitaires (NDVI).

Après ces deux travaux de corrélation nous avons tiré comme conclusion que le meilleur modèle qui interprète le développement végétatif Kc par le NDVI est le **premier modèle de la régression polynomiale**. Ces résultats sont été confirmés par le test statistique **Root Mean Square Error RMSE** [12]

IV. Conclusion

D'après les deux modèles tirés ci-dessus nous pouvons écrire les formules du Kc comme suit ;

✚ $Kc = 1,174 (NDVI) - 0,214(4)$ conformément au modèle de la régression linéaire, représenté par un coefficient de régression $R^2 = 0,879$ et selon le test RMSE (Racine Moyenne des Erreurs Carré) qui égal à 0,131

✚ $Kc = 1,677 (NDVI)^2 - 0,866 (NDVI) + 0,248(5)$ conformément au modèle de la régression polynomial, représenté par un coefficient de régression $R^2 = 0,948$ et selon le test RMSE (Racine Moyenne des Erreurs Carré) qui égal 0,087 Le modèle qui représente mieux le Kc de la culture d'orge est le Modèle de la régression polynomiale. Sur ce, la formule des besoins en eau des cultures ;

$$ETc = Kc \times ETP \quad (2)$$

Devient

$$ETc = (1,677 (NDVI)^2 - 0,866 (NDVI) + 0,248) \times ETP \quad (6)$$

V. Références

1. Chehma, A. Le Sahara en Algérie. situation et défis MEP tassili (n° 09 MDU 754) Université KASDI MERBAH- Ouargla (2011) 8.
2. khadraoui, A. Sols et Hydraulique Agricole dans les Oasis Algériennes. ED Ouargla (2005) 310 p.
3. DRE 2016. Monographie de la Wilaya de Biskra, direction de la programmation de la Wilaya de Biskra, 206.
4. Simonneaux V.; Lepage, M.; Helson, D.; Metra, J.; Thomas, S.; Duchemin, B.; Cherkaoui, M.; Kharrou, H.; Berjami, B.; Chehbouni, A. Estimation spatialisée de l'évapotranspiration des cultures irriguées par télédétection. application à la gestion de l'irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc) Sécheresse 20 (1) (2009) 123-130.
5. USDA. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. Agriculture Handbook (1954) 60.
6. Office National de la Météorologie. Les bulletins Décadaires d'informations climatiques et agro météorologiques de l'Algérie 1989-2017.
7. Thomas, J.; Chen, D.; Cosh, M.; Fuqin, L.; Anderson, M.; Walthall, Ch.; Doriaswamy, P.; Ray Hunt, E. Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. Remote sensing of environment. ELSEVIER 92 (2004) 475-482.
8. Razagui, A.; Bachari, N.E.I. Analyse spatio-temporelle de l'indice de végétation NDVI calculé à partir des images satellites NOAA et MSG. Revue des énergies renouvelables vol.17N°3 (2014) 497-506.
9. Kortli, M. Travaux pratique de télédétection. Université de Manouba Tunis (2013) 125.
10. Hamdy, A.; Makhoulouf, A. Advances in soilsalinity and drainage management to save water and protect the environment. Ed Ministry of Agriculture-Algeria. (2002) 508.
11. FAO. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper N° 56 Rome. FAO(1998) 300 p.
12. Bernard-Michel, C. Régression linéaire. Rapport Recherche et Développement, étude n° 70/00 LNE. 130.

Please cite this Article as:

Merdaci S., Masmoudi A., L'apport de la télédétection pour l'estimation du coefficient cultural Kc de la culture d'orge (Hordeum vulgare) en région aride (Biskra Algérie), **Algerian J. Env. Sc. Technology**, X:X (YYYY) XX-XX