



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة الحراش الجزائر
Ecole Nationale Supérieure Agronomique Alger

THESE

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT en Sciences Agronomiques**

**Production du maïs en zones arides (Adrar) : utilisation des indices
de végétation (NDVI et EVI)**

Présentée par : **Hamrelaine Messaoud**

Soutenue le 08/ 07 /2021

Devant le jury composé de :

Président	M. CHABAKA Med Nacer	Professeur	ENSA
Directeur de thèse	M. MEKLCHE Arezki	Professeur	ENSA
Co-Directeur	M. LAABOUDI Abdelkader	Maitre de recherche	INRA Algérie
Examineur	M. HARTANI Tarek	Professeur	CU Tipaza
Examineur	M. HAFSI Miloud	Professeur	UFA, Sétif 1
Examineur	M. FEDDAL Mohamed Amine	MCA	ENSA

Année universitaire 2020/2021

Remerciement

Au terme de cette thèse, je remercie, avant tout, Dieu le Tout Puissant, de m'avoir donné la foi et le courage et de m'avoir guidé pour l'accomplir.

Cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans la confiance, la patience et la générosité de mon directeur de thèse, Monsieur **Mekliche Arezki**, Professeur à l'ENSA (ex I. N. A.), que je veux particulièrement remercier d'avoir accepté de diriger ce travail. Je voudrais aussi le remercier pour le temps et la disponibilité qu'il m'a accordés tout au long de ces années, d'avoir cru en mes capacités et de m'avoir constamment encouragé pour aller de l'avant et mener les différentes phases de thèse. Grâce à ses précieux conseils, j'ai pu, non seulement, surmonter les difficultés de terrain, mais également, tirer un énorme profit.

Il avait fallu, aussi, le concours de **M. Laaboudi Abdelkader**, maître de recherche à l'INRA, station d'Adrar, et en sa qualité de Co-directeur de thèse, pour que je puisse avancer avec beaucoup d'efficacité dans mon travail. Je suis content de l'avoir constamment à mes côtés et le remercie énormément pour la qualité de sa contribution et pour son appui considérable.

Je tiens à remercier **M. Chabaka Mohamed Nacer**, professeur à l'ENSA El Harrach, pour l'intérêt qu'il a à l'égard de ce travail et de m'avoir fait l'honneur de présider le jury. Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du Jury : **Mrs. Tarik Hartani** professeur au C.U de Tipaza, **Hafsi Miloud** professeur à l'Université Ferhat Abbas Sétif 1, **Feddal Mohamed Amine** Maître de conférences à l'ENSA., pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour avoir été intéressés par la problématique de ma recherche.

Cette thèse m'a donné l'occasion de rencontrer et de travailler avec des personnes absolument admirables. Il est difficile de leur dire ici à quel point j'ai été touché par tout ce qu'ils ont fait pour moi. Ces personnes étaient tellement intéressées par ce travail qu'elles n'avaient pas hésité à m'aider, m'orienter et m'encourager. Parmi ces personnes, je citerai, en particulier, les enseignants **Belghemmaz S.**, **Boulgheb M.**, **Bousoukaia T.**, **Djellal F.** et **Louadj Y.**

Au-delà du contexte universitaire et académique, j'ai croisé des gens qui, par leur expérience, m'ont aidé à m'imprégner dans le vécu des agriculteurs de la région d'Adrar. J'ai bien apprécié leur aide et les remercie vivement. Car, c'est grâce à eux que j'ai pu connaître et même découvrir les subtilités de l'agriculture saharienne et accéder aux différents périmètres irrigués depuis M'guiden jusqu'à Aoulef. C'est particulièrement, à **M. Teberbi Belkacem**, ingénieur agronome et chef d'exploitation à la CCLS d'Adrar que je veux m'adresser et le remercier pour tous ses efforts.

Hamrelaine Messaoud ben Mohamed Rachid

Dédicace

Je dédie ce modeste travail,

A ma précieuse famille

A la mémoire de mon père, j'aurais tant aimé que tu sois présent. Que

Dieu ait ton âme dans sa sainte miséricorde.

A ma très chère maman Puisse le tout puissant te donner santé,

bonheur et longue vie

A mes frères et sœurs

A ma très chère épouse, Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon

respect et mon fierté de toi.

A mes très chères enfants source de ma joie et lumière de ma vie.

A toute la famille sans exception

A tous mes amis

de l'ENSA et à mes collègues du GR

Hamrelaine Messaoud ben Mohamed Rachid

Contenu

Introduction générale et problématique.....	4
Partie I: Synthèse bibliographique	
Chapitre I: La culture du maïs sous pivot dans la wilaya d'Adrar	5
I.1. Aspect agronomique du maïs.....	5
I.1.1. Le maïs (<i>Zea mays</i> L.).....	5
a. Origine et aire de répartition.....	5
b. Classification botanique	5
c. Croissance et développement	5
I.1.2. Variétés cultivées et semis	7
a. Les clés du choix variétal en zones arides et semi-arides	7
b. Hybrides de maïs adaptés aux régions chaudes.....	7
c. Le semis.....	7
I.1.3 Irrigation.....	7
I.1.3.1. Efficience d'utilisation de l'eau	7
I.1.3.2. Résistance à la sécheresse	8
I.1.3.3. Les eaux d'irrigation	8
I.1.3.4. Besoins en eau.....	8
I.1.4. Fertilisation	8
I.1.5. Le système de production et la mise en valeur.....	11
I.1.5.1. Petite mise valeur	12
I.1.5.2. La moyenne mise en valeur.....	12
I.1.5.3. La grande mise en valeur (GMV)	12
I.2. Conduite de l'irrigation par rampes pivotantes.....	14
I.2.1. Description d'une rampe pivotante	14
I.2.1.1. Structure du Pivot.....	15
I.2.1.2. Les organes d'arrosages	16
I.2.2. Principe et mode de fonctionnement	17
I.2.3. Busage et contrôle de l'uniformité d'arrosage de l'appareil	17
I.2.4. Problème de la formation d'ornières	19
I.2.5. L'expérience du pivot en Algérie.....	19
I.2.5.1. Etat des lieux de pivot dans les régions sahariennes	20
I.2.5.2. Évolution du marché des rampes d'irrigation mécanisées en Algérie.....	21
I.2.5.3. Constructeurs de Pivots en Algérie	22
I.2.5.4. Des freins multiformes.....	23
I.3. L'eau au Sahara - réserves et enjeux.....	24
I.3.1 Les nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT)	25
I.3.1.1 La nappe du Continental Intercalaire CI ou Albien	25
I.3.1.2. La nappe du Complexe Terminal CT.....	25
I.3.2. Le nombre de forages.....	26
Conclusion	26
Chapitre II: Géomatique, système d'information géographique et télédétection.....	28
II.1 Le système d'information géographique (SIG)	28
II.1.1. Définition.....	28
II.1.2. Modes d'organisation des données géographiques	29
II.1.3. Les données du Modèle Numérique d'Altitude (MNA)	29
II.2. Définition de la cartographie	29
II.2.1. Carte topographique.....	30
II.2.2. Carte thématique	30
II.2.3. Système de référence géographique et planimétrique en Algérie	30
II.2.4. Global Positioning System (GPS).....	31
II.3. La télédétection	31
II.3.1. Définition.....	31
II.3.2. Principe de la télédétection	31
II.3.3. Les domaines d'application de la Télédétection	32

II.3.4. Les capteurs utilisés	32
a- Capteurs à détection passive	32
b- Capteurs à détection active	33
II.3.5. Les grandes familles de satellites	33
a- Capteurs moyennes résolutions	33
b- Capteurs à très haute résolution (Hyperspectraux).....	33
II.3.6. Bases physiques de la télédétection	34
a- Le rayonnement électromagnétique	34
b- Les ondes électromagnétiques	34
c- Le spectre électromagnétique	35
II.3.7. Signatures spectrales de la végétation.....	35
II.3.8. La structure cellulaire des feuilles	36
II.3.9. Notion de l'image satellite	37
II.3.10. Techniques de classification de l'image	37
a. Classification non-supervisée	37
b. Classification supervisée	38
II.4. Indices de végétation (VIs).....	38
II.4.1. Définition de l'indice de végétation par différence normalisée NDVI	38
II.4.2. Les indices relatifs aux effets conjugués des sols et de l'atmosphère	39
II.4.3. Indices de végétation (IV) relatif à l'effet du sol sur la réflectance de la végétation.....	40
II.4.4. Relations entre les indices de végétation et les paramètres biophysiques	40
II.4.5. Relations entre indices de végétation et indices phénologiques.....	40
II.5. Méthodes de l'estimation du rendement.....	41
II.5.1. Méthodes classiques (directes)	41
II.5.2. Méthodes par télédétection spatiale : atouts et contraintes	42
II.5.3. Modèles de prévision de rendement.....	42
a. Modèles conventionnels - conditions et limites d'application.....	42
b. Approche basée sur les données météorologiques.....	43
c. Modèles empiriques.....	43
d. Modèles basés sur la télédétection - Caractéristiques et atouts en agriculture	43
II.6. La télédétection en Algérie.....	44
Partie II: Matériels et méthodes	
III.1. Le cadre géographique et administratif de la zone d'étude	45
III.2. Aspect géomorphologique et topographique.....	45
III.3. Morphologie et topographie	46
III.4. Population	46
III.5. Les périmètres agricoles de grande mise en Valeur (GMV)	47
III.6. Le contexte régional.....	48
III.6.1 Climat	48
III.6.2 Pluviométrie	48
III.6.3 Températures	49
III.6.4. Vent	49
III.6.5 Humidité relative	49
III.6.6. Rayonnement solaire - Insolation	49
III.6.7. Evapotranspiration potentielle.	50
III.7 Caractéristiques des Sols.....	50
III.8. Matériel végétal - Variétés cultivées	51
III.9. Matériel Informatique	51
III.9.1. Téléchargement et traitement des images.....	51
III.9.1.1. Images Google Earth (GE)	51
III.9.1.2. Images satellitaires Landsat8 et Sentinel2	52
III.9.2 Enquête.....	53
III.9.3. Télédétection	53
A. Logiciel Google Earth Pro,.....	53
B. logiciel Arcgis (Arcmap)	53
III.9.4. Outils de prospection.....	54
1. Global Positioning System (G.P.S)	54
2. Appareil photo numérique	54
Introduction.....	55

IV.1 Acquisition et traitement des données par la Télédétection	55
IV.1.1. Exploitation des images satellitaires Google Earth Pro (GEP).....	56
IV.1.2. Exploitation des images satellitaires Landsat8 / Sentinel2.....	57
IV.1.3. Modèles d'estimation de rendement à distance par les indices de végétation.....	58
IV.1.3.1. Calculs des indices de végétation.....	58
IV.1.3.2. Approche de la modélisation.....	61
IV.1.3.3. Critères de performance du modèle.....	62
IV.2. Données de Diagnostic d'enquêtes sur le terrain - Mesures in situ	63
IV.2.1. Travail du sol.....	64
IV.2.2. Semis.....	64
IV.2.3. Irrigation.....	64
IV.2.4. Fertilisation.....	64
IV.2.5. Désherbage.....	64
IV.2.6. Récolte.....	64
IV.3. Données fournies par les administrations locales	65
PartieIII: Résultats et discussions	
Introduction	66
I.1. Exploitation des images téléchargées	66
I.2. Cartographies de la culture de céréales sous pivot dans les différents périmètres	68
I.2.1. Cartographie du périmètre de Zaouiet kounta et Inzeghmir.....	69
I.2.2. Cartographie du périmètre de Tsabit (Grara et raya).....	71
I.2.3. Cartographie du périmètre de Mguiden.....	71
I.2.4. Cartographie du périmètre de Fenoughil (Baamer).....	72
I.2.5. Cartographie du périmètre d'Aoulef (Med Boudiaf).....	73
I.2.6. Cartographie du périmètre d'Aougrout (Zaouiet Sidi Abdellah).....	73
I.2.7. Cartographie du périmètre d'Adrar.....	74
I.3 Evolution de la superficie et du nombre de pivots par périmètre agricole.....	75
I.3.1. Evolution des superficies cultivées en maïs.....	76
I.3.2. Surface moyenne irriguée par les pivots.....	77
I.3.3 Conclusion.....	78
I.4. Résultats de l'exploitation des images satellitaire GEP (Google Earth Pro)	79
I.4.1. Problème de chevauchement des images sur GEP.....	79
I.4.2 Réalisation de plan d'une exploitation.....	80
I.4.3. Détection de l'état de pistes agricoles et accès à l'exploitation.....	80
I.4.4. Localisation des Forages qui alimentent les pivots.....	81
I.4.5. Détection de pratique agricole.....	83
I.4.6. Combinaison entre les images GEP et Landsat8.....	83
a- Détection d'une opération de récolte du maïs.....	84
b. Détection de l'irrigation.....	85
c. Images capturées sur le terrain (avec un Smart phone OPPO 5).....	85
I.4.7. Classification des images, Google Earth, par photo-interprétation.....	86
I.5. L'exploitation des images satellitaire Landsat8 et sentinel2	87
I.5.1. Détection de quelques pratiques agricoles.....	87
I.5.1.1 Détection de travail du sol.....	87
I.5.1.2 Détection de la rotation ou de l'assolement de culture.....	88
I.5.1.3 Détection du problème de levée (terrain/image).....	89
I.5.1.4 Détection de la récolte via Landsat8.....	90
I.5.2. Calcul des indices de végétation et l'estimation de rendement.....	91
II.1. Estimation du rendement	92
II.1.1. Calculs de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI).....	92
II.1.2. Calculs de l'Indice de végétation amélioré EVI.....	93
II.2. Modèles d'estimation des rendements	93
II.2.1. Modèle d'estimation des rendements par le NDVI.....	93
II.2.2. Modèle d'estimation de rendement par l'EVI.....	94
II.2.3. Critères de performance.....	94
II.2.4. Paramètres statistiques.....	94
II.2.5. Amélioration des performances des modèles.....	96
Introduction.....	97
III. 1. Diagnostic socio-économique.....	97

III.1.1. Diagnostic sociologique	97
III.1.1.1. Classe d'âge.....	97
III.1.1.2. Formation en agriculture	98
III.1.1.3. Contraintes de la main d'œuvres (MO)	98
III.1.2. Diagnostic économique.....	99
III.1.2.1. Esprit d'investir chez les agriculteurs.....	99
III.1.2.2. Coût de la production du maïs dans la région d'étude.....	100
III.1.2.3. Commercialisation.....	101
III.1.2.4. Développement et durabilité de la culture de maïs	101
III.1.2.5. Problème d'accès à l'exploitation.....	101
III.2. Diagnostics techniques	104
III.2.1 Le travail du sol.....	104
III.2.2. Analyse du sol, salinité et contrôle de fertilité	105
III.2.3. Le Semis.....	106
III.2.3.1. Les dates de semis et incidence sur le calendrier cultural	107
III.2.3.2. La densité de semis.....	108
III.2.4. Variétés cultivés : exigences et performance.....	108
III.2.5. Phénomène de manque à la levée	109
III.2.6 Diagnostic exhaustif de la Machine d'irrigation - le pivot	111
III.2.6.1. Fuites d'eau	111
III.2.6.2. Problème des ornières	111
III.2.6.3. pannes fréquentes sur le pivot	112
III. 2.7 Besoins en eau	113
III.2.7.1 Exemple de réglage au niveau de l'organe d'aspersion du Pivot	113
III.2.7.2 Planning d'irrigation par le pivot	114
III.2.7.3. Irrigation et topographie du terrain.....	115
III.2.7.4. Le niveau statique de forages	116
III.2.7.5. Débits de forages	116
III.2.8. La fertilisation	117
III.2.8.1. Engrais de fond NPK.....	117
III.2.8.2. Engrais de couverture	118
III.2.8.3. Le problème de blocage des engrais dans le sol	118
III.2.9. Mauvaises herbes (MH) : constat, types de MH et lutte.....	119
III.2.10. Appel aux spécialistes	123
III. 2.11. La récolte.....	123
III.2.12. Evolution des rendements observés sur le terrain.....	126
III. 2.13. Présentation du mode de conduite de la culture du maïs	126
III.2.14. Elaboration de la fiche technique de la culture du maïs	127
Conclusion générale et perspectives	132
Références bibliographiques	
Annexes	

Figure 1:	a- cycle de vie du maïs ; b- Composants d'un pied de Maïs – (Soltner, 2005).....	6
Figure 2:	carence en éléments nutritifs chez le maïs Source :K+S Kali, IPNI, Unifa.....	10
Figure 3:	Une rampe pivotante et ses principaux éléments constitutifs. (Hamrelaine, 2020).....	15
Figure 4:	a- Tour centrale et armoire de commande d'un Pivot à Goléa ; b- Tour d'une rampe frontale à Souk El Tenin CAZEL Béjaïa (Hamrelaine, 2008)	16
Figure 5:	Principe de l'avancement d'un Pivot (Hamrelaine 2020)	17
Figure 6:	Répartition des buses le long d'une rampe à partir de leur code-.....	18
Figure 7:	a- exemple de contrôle d'uniformité avec des Catch Can (pluviomètres) ; b- résultats de contrôle ..	18
Figure 8:	Une ornière formée par le passage de roues du pivot. Photos personnelles 2016.....	19
Figure 9:	Photo - Rampe frontale au niveau du CAZEL Souk El Tenine BEJAIA.....	21
Figure 10:	Pivot Artisanal de Oued Souf à Adrar. Source : Photos personnelles Adrar	22
Figure 11:	Les limites du Système Aquifère du Sahara septentrional.....	24
Figure 12:	Conception de SIG (Longley <i>et al.</i> , 2005).....	28
Figure 13:	Notion de couche en SIG (Khorram <i>et al.</i> , 2016)	29
Figure 14:	principe d'acquisition d'images.....	31
Figure 15:	Représentation schématique d'une onde électromagnétique tirée de (Bonn et Rochon, 1992).....	34
Figure 16:	Interactions du rayonnement électromagnétique avec la matière « absorption, réflexion, transmission » (Bonn et Rochon, 1992)	34
Figure 17:	Spectre électromagnétique (Moquet, 2003).....	35
Figure 18:	a- Illustration des interactions entre le sol et la végétation, intégrées au niveau de la mesure satellitaire (Fensholt, 2003). b- Variations de la signature spectrale en fonction de l'état physiologique de la végétation (UVED, 2008)	35
Figure 19:	Courbes de réflectance spectrale pour le sol et la culture (végétation verte) selon Scotford & Miller (2005).....	36
Figure 20:	Influence de la structure cellulaire des feuilles sur leur signature spectrale. D'après Jensen (2000)	37
Figure 21:	Variation de NDVI en fonction de la santé de la végétation (Robert Simmon, NASA GSFC in Denis A., 2020)	39
Figure 22:	Indicateurs phénologiques issus du produit MOD12Q2.....	41
Figure 23:	découpage administratif de la région d'étude	45
Figure 24:	Traits morphologiques en 3D de la zone d'étude (Benhamza, 2013)	46
Figure 25:	Superficie totale attribuée dans le cadre du programme d'accession à la propriété foncière agricole (APFA)	47
Figure 26:	Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm (PDGDRS, 1999)	50
Figure 27:	Les zones d'intérêt pour l'étude encadré par les images téléchargées.....	53
Figure 28:	Exemple de sites visités durant l'enquête – Google earth Pro	54
Figure 29:	Organigramme de la méthodologie adoptée.....	55
Figure 30:	Evolution de la surface irriguée et nombre de pivots par ordre de classement, par périmètre agricole et par campagne en 2013 et 2018 –à Adrar.....	68
Figure 31:	Carte de localisation géographique des pivots dans les périmètres de la GMV agricole dans la wilaya d'Adrar (Touat-Gourara-Tidikelt). Hamrelaine, 2018	69
Figure 32:	Carte de Chronologie de la culture du maïs sous pivot à Zaouiet Kounta et Inzaghmir Landsat8 – Adrar – 2014 à 2018.....	70
Figure 33:	Cartographie des Cultures du maïs et du blé sous pivot à Tsabit/Sbaa – Adrar – 2014 à 2018- Landsat8.....	71
Figure 34:	Répartition des pivots dans la ferme Ennahda à Mguiden – Landsat8-2018	72
Figure 35:	Cartographie des Cultures du maïs et du blé sous pivot dans le périmètre Fenoughil - Adrar - Campagne 2014/2015/2016 – Landsat8	73
Figure 36:	Cartographie des Cultures du maïs et du blé sous pivot dans le périmètre d'Aoulef (Med Boudiaf) - Adrar - Landsat8.....	73
Figure 37:	Cartographie des cultures du maïs et du blé sous pivot pivots dans le périmètre d'Aougrout (Sidi Abdellah) - Adrar – 03/2018 Landsat8.....	74
Figure 38:	Cartographie des cultures du maïs et du blé sous pivot dans le périmètre d'Adrar (Aéroport) - Adrar – 03/2018 Landsat8	75
Figure 39:	Nombre de pivots (a) et surfaces irriguées (b) par campagne de 2013 à 2018.....	75
Figure 40:	Courbes de corrélation entre les données estimées (télédétection) et observées (DSA/ ONAB) ; a) nombre pivots, b) surfaces emblavées	76

Figure 41:	Evolution de la superficie et du nombre de pivots.	77
Figure 42:	Surface moyenne d'un pivot par campagne agricole.	78
Figure 43:	Sur Google Earth (capture d'écran) deux dates sur la même image 9/7/2013 en bas et 30/01/2016 en haut)	79
Figure 44:	Comparaison entre image landsat8 à gauche et image Google Earth à droite Pivots maïs et blé : ferme TAMAZIRT à Tsabit.....	80
Figure 45:	Tracé d'un plan de la ferme CCLS Adrar à Fenoughil sur GEP- campagne 2015/2016.....	80
Figure 46:	L'image montre l'absence de pistes Agricoles, mis à part celle en bleu - Périmètre de concession de Zaouiet kounta - Image Google earth 2016	81
Figure 47:	Localisation de forages dans le périmètre de Fenoughil - Image G Earth 2018.....	82
Figure 48:	Image GEP, détection des pratiques agricoles, des parcelles circulaires sous pivots : pré-irrigation (a), travail du sol (b), récolte (c) piste agricole (d) et des anciennes parcelles (e) - dans le Périmètre de Tsabit.	83
Figure 49:	Combinaison entre les images GEP et Landsat8 pour une meilleur interprétation.....	84
Figure 50:	Combinaison entre les images GEP et Landsat8 pour détecter l'irrigation.....	85
Figure 51:	Champs du blé, les Espaces vides apparaissent dans l'image GEP avec l'exutoire et la formation des sels. Source : Photos Hamrelaine 7/04/2016.....	85
Figure 52:	Champs de maïs, les espaces vides dépourvus de maïs avec un excès d'eau d'irrigation. Source : Photos personnelle 24/10/2015	85
Figure 53:	Maïs S/Pivot- OUALI- FN- Adrar - Campagne 2015/2016.....	86
Figure 54:	Maïs S/Pivot 11- DAAMECHE- Aéroport - Adrar – Campagne 2015/2016.....	86
Figure 55:	Maïs S/Pivot 2- BENOUMER 2- Fenoughil- Adrar - Campagne Erreur ! Signet non défini. 2015/2016 - Image du 14/02/2016 Google Earth	86
Figure 56:	Surfaces emblavées perdues (non productive) par manque de levée.....	87
Figure 57:	Exemple montrant la cartographie des zones de céréales récoltées, labourées ou pas encore récoltées sur une image Landsat8 30/11/2017, résolution 30m: (a) Composition colorée (Proche IR/Rouge/Vert).....	87
Figure 58:	Trois campagnes de maïs, exemple ferme CCLS à Fenoughil.....	88
Figure 59:	détection du début de la moisson du maïs sous deux pivots à Fenoughil, image Landsat 8 du 11/03/2020	91
Figure 60:	Exemple de différentes classes de NDVI d'un pivot de maïs situé dans le périmètre de Fenoughil selon les valeurs des indices de végétations, les surfaces et le taux de chaque classe.....	92
Figure 61:	Exemple de différentes classes d'EVI d'un Pivot de maïs situé dans le périmètre de Fenoughil selon les valeurs des indices de végétation, les surfaces et le taux de chaque classe.....	93
Figure 62:	Comparaison graphique (a) et régression linéaire (b) entre les rendements estimés par les indices NDVI et les rendements observés.	95
Figure 63:	Comparaison graphique (a) et régression linéaire (b) entre les rendements estimés par les indices EVI et les rendements observés..	95
Figure 64:	Age moyen des chefs d'exploitations dans trois périmètres.	97
Figure 65:	Taux des chefs des exploitations ayant une formation en agriculture	98
Figure 66:	Taux de différentes catégories de main d'œuvre par périmètre.....	99
Figure 67:	Taux de difficulté d'accès à l'exploitation dans les périmètres de GMV selon les déclarations des agriculteurs et d'après notre constat durant l'enquête.	102
Figure 68:	chisel (a) ; cultivateur à dents (b) ; cover crop (c); d- Agenda indiquant la profondeur de travail du sol. Source: photos personnelles 20/10/2015 (CCLS)	104
Figure 69:	Sol mal préparé – cultivateur à dent – Photo personnelle : Aougrou - 2016.....	104

Figure 70:	Taux d'utilisation de différents types d'outils pour le travail du sol.	105
Figure 71:	Taux d'agriculteurs qui font l'analyse du sol.....	105
Figure 72:	Surface (ha) touchée par la salinité estimée par les agriculteurs.	106
Figure 73:	Semoir monograin 6 rangs à Tsabit (privé).	106
Figure 74:	dates de semis du maïs dans les différents périmètres de GMV.	107
Figure 75:	Taux d'agriculteurs faisant le déplacement de leurs pivots.....	107
Figure 76:	Densités de semis du maïs (grains/ha)	108
Figure 77:	Dimensions d'un épi variété Ranti - Source : photos personnelles 2015 - Ferme CCLS -	109
Figure 78:	Résultats de l'enquête sur le manque à la levée	110
Figure 79:	Manque de levée du maïs sous pivot : a-Fenoughil 21/10/2016 ; b- Zaouiet Kounta 12 /11 /2016 avec un Drone.	110
Figure 80:	Taux de présence de fuites d'eau sur les pivots.....	111
Figure 81:	intervention sur le pivot pour éviter la formation des ornières	112
Figure 82:	(a)-Taux de pannes fréquentes sur les pivots. (b) Un cardan en mouvement bloqué par les plants de maïs	112
Figure 83:	Un champ de maïs mal irrigué – gaspillage d'eau. Photos : Hamrelaine 2015 – Tsabit.....	113
Figure 84:	Une intervention en plein irrigation pour diminuer le débit sur la travée centrale en assurant les besoins en eau pour la dernière travée du pivot.	114
Figure 85:	Topographie d'un Pivot à Zaouiet Kounta	116
Figure 86:	Niveau statique, moyen, de forages par périmètre	116
Figure 87:	Débit des forages dans les grandes mises en valeur.	117
Figure 88:	Engrais du fond (q/ha)	117
Figure 89:	Engrais de couverture (q/ha)	118
Figure 90:	Utilisation des biostimulants (acide humique) sur la culture de maïs.....	119
Figure 91:	Taux des agriculteurs pratiquant la lutte contre les MH.....	120
Figure 92:	différents champs de maïs sous pivot infestés par les MH et spécialement par le chénopode. Photo : Hamrelaine 2015- 2016	121
Figure 93:	Pré irrigation pour lutter contre les MH – cas du brome (ferme CCLS)	122
Figure 94:	Taux d'agriculteurs ayant fait appels aux spécialistes.....	123

Figure 95:	Différentes dates de récolte du maïs	124
Figure 96:	la verse dans un champ de maïs : (a) machine en pleine moisson ; (b) ramassages des épis à la main ; (c) un épi brisé par les roues de la MB - Photos personnelles du 12/03/2016 -Tsabit.....	124
Figure 97:	La production de maïs ramassé à la main dans des remorques de tracteur en attendant le battage à poste fixe. Photos personnelles du 18/04/2016 Fenoughil.....	125
Figure 98:	Rendement moyen q/ha par périmètre agricole pendant les trois campagnes.	126
Figure 99:	Fiche technique de la culture du maïs suivi par la ferme de CCLS élaborée par Téberbi et Hamrelaine en 2017/2018.	128

Liste des tableaux

Tableau 1:	Résultats des analyses du sol sous pivots pour différentes zones comparés aux teneurs souhaitables.....	9
Tableau 2:	Superficies irriguées dans les périmètres de mise en valeur à Adrar.....	12
Tableau 3:	Programmes de la grande mise en valeur agricole au Gourara- Touat-Tidikelt - 2004	13
Tableau 4:	récapitulatif des différents types d'asperseurs existants	17
Tableau 5:	La superficie cultivée dans la grande mise en valeur au GTT (2003 et 2005)	20
Tableau 6:	Nombre total des pivots implantés et évolution des taux de pannes (CDARS).....	23
Tableau 7:	Evolution des superficies et des productions des céréales irriguées sous pivots à Adrar (DSA Adrar, 2009)	23
Tableau 8:	Capacité d'exploitation des eaux pour l'agriculture dans la wilaya d'Adrar (DSA d'Adrar, 2015).	26
Tableau 9:	systèmes de références des coordonnées de l'Algérie.....	30
Tableau 10:	Principaux indices de végétation définis à partir de données de télédétection.....	40
Tableau 11:	Variations interannuelles des précipitations. Source station INRAA Adrar (2018).....	49
Tableau 12:	Les caractéristiques des sols du secteur de mise en valeur	50
Tableau 13:	Classification d'aptitude des terres pour l'irrigation de cultures céréalières.....	51
Tableau 14:	Caractéristiques de quelques variétés cultivées dans différents périmètres de GMV entre 2014 et 2016.	51
Tableau 15:	Images landsat8 utilisées, les périmètres, de GMV, concernés et la date correspondante.....	52
Tableau 16:	Le calendrier de culture du blé et du maïs sous pivot.....	56
Tableau 17:	Classes prévues pour le calcul de l'NDVI, un exemple de toutes les parcelles enquêtées.....	59
Tableau 18:	Les valeurs des indices de végétation selon les classes d'NDVI.....	59
Tableau 19:	Classes prévues pour le calcul de l'EVI, un exemple de toutes les parcelles enquêtées.....	60
Tableau 20:	Les valeurs des indices de végétation selon les classes d'EVI.....	60
Tableau 21:	Nombre de Pivots détectés et superficies estimées de la culture céréalière (blé/maïs) dans la wilaya d'Adrar - 2013 à 2018.....	67
Tableau 22:	Comparaison entre les données estimées (télédétection) et observées.....	76
Tableau 23:	Chronologie de développement d'un pivot du maïs du semis à la récolte.....	90
Tableau 24:	Valeurs des indices de végétation selon les classes d'NDVI.	92
Tableau 25:	Valeurs des indices de végétation selon les classes d'EVI.....	93
Tableau 26:	Critères de performance des modèles selon les deux types d'indices de végétation.....	94
Tableau 27:	Comparaison des paramètres statistiques des rendements estimés par les deux types d'indices de végétation.	94
Tableau 28:	Investissement dans le futur dans le maïs	100
Tableau 29:	Les charges estimées d'un pivot de 30 ha pour deux campagnes CCLS.	100
Tableau 30:	La durabilité de la culture du maïs selon les 41 exploitants enquêtés	101
Tableau 31:	taux de formation d'ornières sur le passage des roues du pivot.	112
Tableau 32:	Planning d'irrigation par campagne pour le maïs (culture d'été)	115
Tableau 33:	Mode de suivi d'un Pivot (N°5) 30 ha ; campagne 2014/2015 – variété RENTI.....	127

Résumé

De nombreuses techniques d'estimation du rendement des cultures sont utilisées. La plus efficace repose sur l'utilisation de données géo spatiales et de technologies telles que la télédétection, notamment dans les conditions de la présente étude où le ciel est souvent dégagé. Dans le but d'estimer et de cartographier les superficies cultivées en maïs sous pivots dans la région d'Adrar, en Algérie, et de prédire les rendements, nous avons utilisé le logiciel Arcgis, pour exploiter les données des images satellitaires de Google Earth Pro, Landsat8 et Sentinel2 de 2014 à 2016. Ces données nous ont permis de calculer les indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et EVI (Enhanced Vegetation Index). Ils ont permis de distinguer plusieurs classes de végétation et ce, selon la densité du couvert végétal et son état sanitaire. Pour développer les modèles d'estimation des rendements, les classes des indices identifiées ont été utilisées comme des variables indépendantes et les rendements observés ont été utilisés comme variable dépendante. La technique de la modélisation choisie est la régression robuste (RR). Pour évaluer les modèles de prédiction, les critères de performance ; le coefficient de détermination (r), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) ont été réalisées. Afin de d'évaluer et d'améliorer la conduite de la culture du maïs sous pivots dans les zones d'étude un diagnostic socio-économique et technique a été effectué.

Les résultats obtenus ont montré une répartition des pivots dans trois régions potentielles (Touat, Gourara et Tidikelt) avec un net accroissement de la superficie cultivée tout au long des trois campagnes d'étude. Le modèle obtenu par les données basées sur l'EVI est plus performant par rapport à celui des données basées sur le NDVI. Ainsi, les critères de performance r , RMSE et MAE sont respectivement de 0,77, 8,30 q/ha et 7,17q/ha. En plus de faciliter l'exploitation et l'interprétation des données satellitaires d'imagerie, le diagnostic socio-économique et technique ont permis d'identifier la relation étroite entre l'itinéraire technique et les rendements obtenus.

Mots clés : Maïs, Cartographier, télédétection, Estimation des rendements, NDVI, EVI, régression robuste

Abstract

Many techniques for estimating crop yields are used. The most effective is based on the use of geospatial data and technologies such as remote sensing, especially under the conditions of the present study where the sky is often clear. In order to estimate and map the areas cultivated with maize under pivots in the Adrar region, in Algeria, and to predict yields, we used the Arcgis software, to exploit data from satellite images from Google Earth Pro, Landsat8 and Sentinel2 from 2013 to 2018. These data allowed us to calculate the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index) indices. They made it possible to distinguish several classes of vegetation, depending on the density of the vegetation cover and its state of health. To develop the models for estimating returns, the classes of the indices identified were used as independent variables and the observed returns were used as the dependent variable. The chosen modeling technique is robust regression (RR). To assess prediction models, performance criteria; the determination coefficient (r), Square root of mean square error (RMSE) and Mean absolute error (MAE) were performed. In order to assess and improve the management of corn cultivation under pivots in the study areas, a socio-economic diagnosis and technic was carried out.

The results obtained showed a distribution of the pivots in three potential regions (Touat, Gourara and Tidikelt) with a clear increase in the cultivated area throughout the three study campaigns. The model obtained by the data based on the EVI performs better compared to that of the data based on the NDVI. Thus, the performance criteria r, RMSE and MAE are respectively 0.77, 8.30 q/ha and 7.17q/ ha. In addition to facilitating the use and interpretation of satellite imagery data, the socio-economic and technical diagnosis made it possible to identify the close relationship between the technical itinerary and the yields obtained.

Keywords: Maize, Mapping, remote sensing, Yield estimation, NDVI, EVI, robust regression

ملخص

تستخدم العديد من التقنيات لتقدير غلة المحاصيل (العوائد). الأكثر فاعلية منها يعتمد على استخدام البيانات والتقنيات الجيومكانية مثل الاستشعار عن بعد، خصوصا في ظل ظروف الدراسة الحالية حيث تكون السماء صافية في كثير من الأحيان. من أجل تقدير ورسم خريطة المساحات المزروعة بالذرة الصفراء تحت المرشات المحورية في منطقة أدرار بالجزائر، وللتنبؤ بالمردود، استخدمنا برنامج Arcgis واستخدام بيانات صور الأقمار الصناعية من Google Earth Pro و Landsat8 و Sentinel2 من 2014 إلى 2016. ثم حساب مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) ومؤشر الغطاء النباتي المحسن (EVI). فتم التمكن من التمييز بين عدة درجات من النباتات، وذلك اعتماداً على كثافة الغطاء النباتي وحالته الصحية. بالإضافة إلى ذلك، ومن أجل تطوير نماذج لتقدير العوائد، تم استخدام فئات المؤشرات المحددة كمتغيرات مستقلة واستخدمت العوائد المرصودة كمتغير تابع. تقنية النمذجة المختارة هي الانحدار القوي (RR). ولتقييم نماذج التنبؤ تم استخدام معايير الأداء؛ كمعامل التحديد (r) والجذر التربيعي لمتوسط الخطأ التربيعي (RMSE) ومتوسط الخطأ المطلق (MAE). ومن أجل تقييم وتحسين إدارة زراعة الذرة تحت المحاور في مناطق الدراسة، تم إجراء التشخيص الاجتماعي والاقتصادي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها، خريطة توزيع المحاور في المناطق الثلاثة الرئيسية (توات، قورارة و تيديكلت) مع زيادة واضحة في المساحة المزروعة خلال مواسم الزراعة الثلاثة المتتالية في منطقة الدراسة. النموذج الذي تم الحصول عليه بواسطة البيانات المستندة إلى مؤشر الغطاء النباتي المحسن (EVI) يعمل بشكل أفضل مقارنة بنموذج البيانات المستندة مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي. وبالتالي، فقد كانت معايير الأداء r و RMSE و MAE على التوالي 0.77 و 8.30 ق/هكتار و 7.17 ق/هكتار على التوالي. بالإضافة إلى تسهيل استخدام وتفسير بيانات صور الأقمار الصناعية، ساعد التشخيص الاجتماعي والاقتصادي والتقني في تحديد العلاقة الوثيقة بين المسار التقني والعوائد التي تم الحصول عليها.

الكلمات المفتاحية: الذرة، رسم الخرائط، الاستشعار عن بعد، تقدير العائد، مؤشر NDVI، مؤشر EVI، الانحدار القوي

Liste des abréviations

- **ANRH** : Agence nationale des ressources hydrauliques
- **APFA** : Accession à la Propriété Foncière Agricole
- **ASAL** : Agence Spatiale Algérienne
- **BADR** : Banque de l'Agriculture et du Développement Rural
- **BNEDER** : Bureau National des Etudes pour le Développement Rural
- **CAAS** : Complexe Agro-Alimentaire du Sud
- **CAZEL** : Complexe Agricole Zootechnique d'Elevage
- **CCLS** : Coopérative des Céréales et Légumes Secs
- **CDARS** : Commissariat au Développement de l'Agriculture des Régions Sahariennes - Ouargla
- **DSA** : direction de services agricoles
- **EOS** : Electro Observing Systems
- **ESA** : l'Agence Spatiale Européenne
- **ETM+** : Enhanced Thematic Mapper Plus
- **FAO** : L'organisation des nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (Food And Agriculture Organisation)
- **INSID** : Institut National du Sol, Irrigation et Drainage – Adrar
- **ITGC**: Institut Technique de grandes cultures - Alger
- **MADRP** : ministère de l'Agriculture, du Développement rural et des Pêches
- **MARE** : Mean Absolute Relative Error (erreur moyenne absolue et relative)
- **MATALB** : Mathworks laboratory
- **NS** : non significatif
- **OAIC** : L'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales
- **OLI** : Operational Land Imager
- **ONAB** : l'Office National des Aliments du Bétail
- **ONFAA** : Observatoire National des filières Agricoles et Agroalimentaires
- **ONS** : Office National des Statistiques
- **ONU**: Organisation des Nations Unies
- **OSS** : Observatoire du Sahara et du Sahel
- **PDGRS** : Plan Directeur General de Développement des Régions Sahariennes
- **r** : Coefficient de corrélation
- **Rdt** : Rendement (q/ha)
- **RLM** : Régression Linéaire Multiple
- **RMSE** : Root Mean Squared Error (erreur moyenne quadratique)
- **RLR** : Régression linéaire Robuste
- **S.A** : irrigation sans arrêt
- **SAU** : Surface agricole utile
- **SIG** : Système d'Information Géographique
- **USGS** : United Stat Glovise System

ANNEXES

Annexe 01 : Questionnaire de l'enquête

Annexe 02 : Résultats des indices de végétations

Annexe 03 : Coordonnées géographiques de Forages alimentant les Pivots

Annexe 04 : Statistique de Production, superficie et nombre de pivots de la culture du maïs délivré par l'ONAB

Annexe 05 : Exemple d'une fiche de diagnostic technique de suivi d'un pivot

Annexe 06 : Quelques résultats

Annexe 07 : Article publié

Introduction générale et problématique

L'augmentation de la population devrait faire pression sur la production alimentaire d'environ 60% au cours des 35 prochaines années (**FAO 2015**). L'agriculture irriguée, malgré sa forte consommation d'eau, contribue au développement de la production de plusieurs cultures et constitue une alternative à l'augmentation de la production alimentaire.

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique et de ses conséquences sur l'homme et son environnement, l'estimation précoce de la production agricole aux échelles nationale ou régionale est, plus que jamais, au cœur d'enjeux économiques, géostratégiques et humanitaires très importants (**Van Ittersum et al., 2008**).

En Algérie, la production céréalière a connu une faible croissance comparativement à la consommation qui a fortement augmenté, et ce, malgré les efforts déployés en matière de développement de la céréaliculture. En effet, celle-ci reste caractérisée par des variations notables liées aux paramètres climatiques qui sont difficiles à maîtriser. Pour cela, le secteur céréalier suscite un intérêt particulier et une importance considérable en matière d'investissement, de vulgarisation, d'amélioration génétique et de toutes autres actions susceptibles d'améliorer la productivité (**Djermoun, 2009**).

Les besoins de l'Algérie en céréales, en général, et en maïs grain, en particulier, sont importés en grande partie (**CREAD, 2018**). La facture de l'importation, en 2014, a atteint 3,54 milliards de dollars pour 12,3 millions de tonnes de céréales (blés, maïs, orge); en 2015, la quantité de céréales importée est de l'ordre de 14,16 millions de tonnes (**CNIS, 2015**).

Aussi, la production nationale en maïs grain est faible, elle ne représente que 10% des besoins globaux du pays. Le déficit est comblé par les importations qui représentent 31% de la quantité totale importée en céréales et 25% de la valeur totale (**ONFAA, 2015**).

Encore, faut-il souligner que les cours du maïs sur le marché international ne cessent d'augmenter et cela se répercute inévitablement sur les prix des productions animales (viandes, lait ou œufs) en Algérie. Pour cela, un encouragement a été accordé au développement et l'intensification de la culture du maïs grain et fourrager à travers toutes les régions du pays (**MADR, 2014**).

Ainsi, la culture du maïs, sous pivot, a commencé à connaître son essor dans quatre wilayas du sud : Ghardaïa, Ouargla, et Adrar (**Kerroumi, 2016**). La situation, en termes de superficie, est estimée à 5 000 ha avec une augmentation au fil du temps. A El-Goléa par exemple, la superficie est passée de 100 ha en 2011 à 2 000 ha en 2018 (**Djekboub, 2018**).

Dans la région d'Adrar, la culture du maïs a pu avoir un intérêt considérable, au point que sa superficie a, nettement, évolué en passant de 800 ha en 2013/2014 à 1 346 ha en 2015/2016 (**DSA, 2016**). Des pivots de superficie de 20 à 40 ha ont été implantés pour la culture du maïs grain, dans les parties Nord (Aougrou et Tsabit) et Sud (Fenoughil, Zaouiet Kounta, Inzeghmir et Aoulef) de la wilaya.

Si, selon **Courault, (2016)**, la réussite de la culture du maïs à Adrar, repose sur le respect de l'itinéraire technique de la culture (nature, travail du sol, adaptation des dates de semis, nature, doses, d'apport des fertilisants, application de divers traitements: les herbicides, insecticides et fongicides, réglage de la vitesse du pivot pour l'irrigation, et la détermination de la date de la récolte. Elle peut, en outre, nécessiter une gestion plus globale qui exige, en effet, la disponibilité d'une base de données réelle et en temps opportun sur l'état des ressources (eau, sol et végétal).

L'écosystème des régions arides se caractérise par sa fragilité ; les ressources hydriques « faibles ou fossiles » et les conditions édaphiques contraignantes (salinité, calcaire et pauvreté en matière organique) (**Halitim, 2011**).

L'utilisation durable des ressources naturelles, d'après **Justice et al. (2007)**, est subordonnée à la qualité (précision) des informations et à leur caractère instantané sur les superficies cultivées et l'estimation du rendement (ER).

Classiquement, l'acquisition des informations sur l'efficacité de l'utilisation des ressources naturelles a consisté en la réalisation d'interviews à travers une enquête auprès d'un ou plusieurs groupes représentatifs d'agriculteurs.

Cette méthode est difficilement applicable au contexte de la Wilaya d'Adrar vue l'immensité de terrain et l'éparpillement de périmètres agricole de grande mise en valeur où des contraintes et problèmes peuvent déjà entraver le processus de collecte de l'information.

Quant à la qualité des résultats de cette méthode, les éléments d'information tirés sont souvent imprécis ou entachés d'erreurs. **De Groot et al., (2005)** justifient, également, que le manque de ressources et compétences dans les pays en développement peut être un facteur limitant important des estimations quantitatives nécessitant une grande précision.

Pour contourner ces contraintes, la télédétection constitue une technique plus performante pour acquérir beaucoup de données utiles et en temps réel. A ce titre, les photographies aériennes et les données satellitaires sont utilisées pour la cartographie des parcelles du sol, des ressources en eau et des caractéristiques topographiques (**Carfagna et al., 2005**).

Cet outil permet également de renseigner sur l'utilisation des terres à des fins agricoles telles que la classification des types de végétation, la détection des maladies, la végétation endommagée et la détection de cultures en état de stress (**Ustin et al., 2010**).

Les indices de végétation (IV) ont été largement utilisés pour surveiller les changements de la végétation et de la couverture végétale (**De Fries et al., 1995**). Le développement des indices de végétation est basé sur l'absorption différentielle, la transmittance et la réflectance de l'énergie par la végétation dans les régions rouge et proche infrarouge du spectre électromagnétique (**Jensen, 1996**).

Les images satellitaires à haute résolution issues de Google Earth, Landsat8 et Sentinel2 constituent, également, un outil efficace pour la cartographie et le suivi des types de cultures. Elles sont utilisées pour réaliser des couches par zones (**Knorn et al., 2009**). Les systèmes de télédétection, à savoir les satellites météorologiques et d'observation de la terre, peuvent fournir des données permettant d'estimer la production agricole (**Lobell et al., 2005**).

Par modélisation, des études de télédétection se basant sur les indices spectraux de la végétation ont pu mettre en évidence de nouveaux indices tels que NDVI (l'indice de végétation normalisé par différence) mis au point par **Tucker (1979)** et l'EVI (Enhanced Vegetation Index ou indice de végétation amélioré proposé par **Rocha et al., (2009)**).

Par ailleurs, les informations issues d'observations de télédétection peuvent être intégrées aux méthodologies de modélisation appliquées aux cultures. Ces données ont été utilisées dans des modèles de culture pour l'ER régional (**Doraiswamy et al., 2005**).

Des modèles fondés sur les paramètres météorologiques, ont pu être mis au point pour calculer la biomasse produite à partir de l'équation de **Monteith (1972)**. En Algérie, l'application de ces modèles est illustrée par le travail de **Guérif et al., (1993)** réalisé à Sidi Bel Abbès. Dans cette étude, les auteurs ont pris en compte l'indice de stress hydrique avec

une dizaine de paramètres afin d'estimer la production de céréales en conditions semi-arides, dans les domaines optique (NDVI) et thermique (température de surface).

Il existe des modèles simples basés sur des images à date unique et qui peuvent fournir des informations utiles sur les cultures et leur rendement probable. **Muthy et al. (1994)** ont constaté que les indices de végétations calculés, à partir d'images prises aux stades floraison et d'épiaison, étaient bien corrélés avec le rendement ; ils peuvent, ainsi, être utilisés pour la prévision du rendement à travers la régression multiple.

En Algérie, la majorité de travaux réalisés dans le domaine de la télédétection sont effectués par le **BNEDER (1994)** et l'**ASAL (2012)** au profit du MADR et particulièrement le Commissariat au Développement de l'Agriculture des Régions Sahariennes (CDARS). Ces travaux sont particulièrement centrés sur la cartographie des terres, la dynamique des paysages en zone aride (**Haddouche, 2009**), l'occupation du sol agricole à grande échelle **Sitayeb et Benabdéli (2008)**, l'érosion hydrique (**Toumi et al., 2013 ; Souidi et al., 2017**) et phénomène d'ensablement (**Bensaid, 2006**), la salinisation (**Zaine et al., 2017**) et les catastrophes naturelles.

Objectifs de l'étude

Si l'emploi de la télédétection a été largement orienté à l'étude de la biodiversité, au changement climatique, à la surveillance de la dégradation du milieu naturel, notamment dans les écosystèmes fragiles de la steppe, du Sahara et même des zones humides du pays ; beaucoup d'aspects agronomiques (irrigation d'appoint, fertilisation et utilisation des pesticides, prédiction ou estimation de la production, etc.), sont aujourd'hui, insuffisamment ou pas du tout, abordés. Ces volets sont, pourtant, très importants à développer pour un meilleur pilotage de l'agriculture aux échelles de l'exploitation et de la parcelle. C'est, précisément, dans cette optique que notre étude a été proposée et réservée à l'agriculture saharienne. Elle s'inscrit dans un objectif de parer à un déficit en matière d'études à portée purement agronomique dans ces régions du Sahara. Le suivi de la culture, par le moyen de la télédétection et le SIG, au moment de la production, que ce soit à l'échelle parcellaire ou à l'échelle d'un périmètre agricole, constitue un aspect majeur de notre travail.

A l'échelle parcellaire, on ne saurait se passer du rôle décisif que jouerait l'outil utilisé surtout dans la détection des pratiques agricoles telles que le labour, l'irrigation, la récolte, etc.

C'est aussi ce contexte qui motive notre désir d'identifier, si possible, les raisons du progrès et de l'accroissement de la productivité des céréales et du maïs en particulier. Il en serait de même pour les situations qui cacheraient des échecs ; nous en établirons le constat par le moyen des techniques de la télédétection et SIG. A la fin de ce volet, une cartographie de la culture des céréales sous pivot sera établie avec l'identification des périmètres agricoles de grande mise en valeur (GMV) ainsi que l'estimation de leurs extensions spatiales. L'exploration des zones à potentiel agricole sera également envisagée à travers la détection des changements.

Dans le cadre de ce travail, l'analyse du changement spatio-temporel du couvert végétal permettra de calculer les indices de végétation NDVI et EVI et conduira à l'élaboration des modèles d'estimation de rendement et qui représente l'objectif fondamental de cette thèse

Pour ce faire, nous adopterons la méthode de modélisation, la plus largement recommandée de notre temps. C'est la méthode de régression linéaire multiple que **Simrad (2018)** a critiquée à cause de l'aberration qui pourrait découler de valeurs erronées. La méthode qui

est suivie, dans cette thèse, est la régression robuste qui a l'avantage de surmonter la défaillance de la précédente méthode. Aussi, nous nous sommes interrogés si la détermination et l'analyse des indices de végétations (NDVI et l'EVI), à eux seuls, suffisent pour établir la prévision de rendement du maïs. Parce que, l'exécution par la méthode classique, de cette opération sur les vastes périmètres de la région d'Adrar, serait, évidemment, délicate ; du fait qu'elle pourrait être longue, coûteuse et demandeuse de moyens de logistique.

Dans cette étude, nous verrons également si, à partir d'une seule date d'image par campagne, on pourrait extraire des informations sur la végétation et le rendement.

Les diagnostics et estimations des rendements du maïs obtenus par l'utilisation des outils de télédétection et SIG, sont complétés par une enquête socio-économique et technique de terrain à même d'illuminer un bon nombre de points que les techniques (télédétection et SIG) utilisées ne pourront jamais atteindre. Nous résumons ces points comme suit :

- analyser les problèmes qui entravent réellement l'amélioration de la production des céréales, en général, et du maïs, en particulier.
- déterminer les facteurs clés dont dépendraient la fiabilité et la précision des modèles d'estimation de rendement qui seront proposés.
- élaboration d'une fiche technique pour la conduite de la culture du maïs,
- essai d'estimation de coût de production et le seuil de rentabilité de la culture du maïs pour un pivot de 30 ha,

Cette étude s'attèle à répondre à ces interrogations et également à faire le point sur l'opportunité de se tourner vers la numérisation de l'agriculture algérienne afin de satisfaire à un des Objectifs de Développement Durable (ODD) décrétés par la FAO en 2015.

Aperçu sur la thèse

La présente étude utilise des données de télédétection par satellite, des statistiques sur les cultures, des informations sur le calendrier des cultures et des observations in situ, à travers une enquête. La caractéristique innovante de cette étude est l'identification d'une combinaison de télédétection, de SIG et de modélisation de cultures à travers une régression robuste servant à l'estimation de rendement de maïs. Cette thèse est constituée de trois parties. La Première partie est consacrée à la synthèse bibliographique et contient deux chapitres :

- Chapitre 1 : est réservé à la culture du maïs et le système d'irrigation par pivot.
- Chapitre 2 : présente des notions générales sur la géomatique et ses outils, à savoir le Système d'Information Géographique (SIG) et la Télédétection pour la cartographie de l'occupation du sol et l'estimation de rendement dans la parcelle.

La deuxième partie est constituée de deux chapitres consacrés aux matériels et méthodes dont un pour le matériel utilisé et l'autre pour expliquer la méthodologie adoptée.

La troisième partie est dédiée aux résultats et discussions. Enfin, cette thèse sera couronnée d'une conclusion où seront présentés les faits marquants du travail, ses limites et les perspectives de mise au point de méthodes aussi fiables que possible pour l'estimation du rendement des céréales à Adrar et le développement de l'agriculture saharienne.

Première Partie

Synthèse bibliographique

Chapitre I

La culture du maïs sous pivot dans la wilaya d'Adrar

Chapitre I: La culture du maïs sous pivot dans la wilaya d'Adrar

I.1. Aspect agronomique du maïs

I.1.1. Le maïs (*Zea mays* L.)

Le maïs (*Zea mays* L.) est la plante la plus cultivée au monde et la première céréale produite devant le blé. La production mondiale de maïs en 2013 était de 839 millions de tonnes, contre 653 millions de tonnes pour le blé (**Planetoscope , 2013**). C'est la céréale la plus énergétique (**Charcosset, 2009**), due à ses atouts nutritifs (richesse en amidon, présence de protéine, de minéraux) et économiques (culture simple à produire, à récolter et à stocker) NUSS (2011). D'importantes surfaces sont également consacrées à la production de maïs-fourrage destiné à l'alimentation du bétail soit en vert, soit sous forme d'ensilage (**Gay, 1984**).

a. Origine et aire de répartition

Le maïs est cultivé depuis des millénaires en Amérique centrale, comme l'attestent les grains trouvés au Mexique (**Serratos - Hernandez, 2009**). D'après **Chevalier (1932)**, la culture du maïs serait assez ancienne en Afrique du Nord, au Sahara et au Soudan et remonterait au 16^e siècle. On ne connaît rien de précis sur l'origine de la culture du Maïs en Algérie. Il semble que cette culture y aurait été introduite d'Espagne par les Arabes et les Maures.

b. Classification botanique

Le maïs (*Zea mays* L.) appartient à la famille des poacées. Le maïs cultivé est une plante diploïde (**Jaritz et Bonnejmte, 1997**). Actuellement, le genre *Zea* comprend cinq espèces réparties sur deux sections : *Zea* et *Luxuriantes*. *Zea mays* L. ssp. *Mays* est la seule espèce du genre à être cultivée et qui détient une place importante dans l'économie mondiale (USDA, 2005). C'est une plante allogame, monoïque (**De Kouassi, 2017**) et annuelle à grand développement végétatif (1 à 3 m de hauteur); elle présente une tige pleine à gros diamètre (3 à 4 cm) et des fleurs unisexuées (**Henri et al. 1968**).

c. Croissance et développement

Selon la variété (précocité) et les températures de croissance, le maïs peut atteindre sa maturité physiologique (stade auquel les grains ont cessé d'accumuler la fécule et la protéine) en 90 à 130 jours environ après l'émergence de la plante lorsque celle-ci est cultivée aux tropiques à des altitudes situées entre 0 et 1 000 mètres. A des altitudes supérieures, il peut mettre 200 à 300 jours pour atteindre sa maturité. Certaines variétés sont plus précoces que d'autres (**Tanaka et al., 1972**).

Phase 1: de la germination à la formation des fleurs (aigrettes)

Les plantes émergent en quatre à cinq jours dans des conditions chaudes et humides mais elles peuvent mettre jusqu'à deux semaines ou plus si le temps est frais ou très sec. Pratiquement aucune germination ne se fera à des températures du sol inférieures à 13°C. Des champignons et des insectes s'attaquant à la graine dans le sol sont encore actifs dans des sols frais et ils peuvent causer des dégâts considérables avant même que les jeunes plants commencent à pousser (Picard *et al.*, 1990).

Phase 2: formation des fleurs et pollinisation

La formation des fleurs se produit environ 40 à 70 jours après l'émergence de la plante pour les variétés de 90 à 130 jours. La fleur émerge du verticille des feuilles un ou deux jours avant qu'elle ne commence à perdre le pollen. La pollinisation est une période très critique au cours de laquelle les besoins en eau et en éléments nutritifs sont très élevés (Simon *et al.*, 1989).

Phase 3: du développement de l'épi à la maturité

La plupart des épis de maïs ont 14 à 20 rangées comportant 40 ovules ou plus par rangée et produisent environ 500 à 800 grains. Toute déficience d'eau, d'éléments nutritifs ou de rayonnement solaire au cours des quelques premières semaines du développement des grains affectera généralement en premier les grains situés à l'extrémité de l'épi, les faisant se recroqueviller ou avorter. Le maïs est très sensible au stress hydrique à ce stade étant donné l'importance de ses besoins (jusqu'à 10 mm par jour dans des conditions très chaudes et sèches) (Djemai 1990).

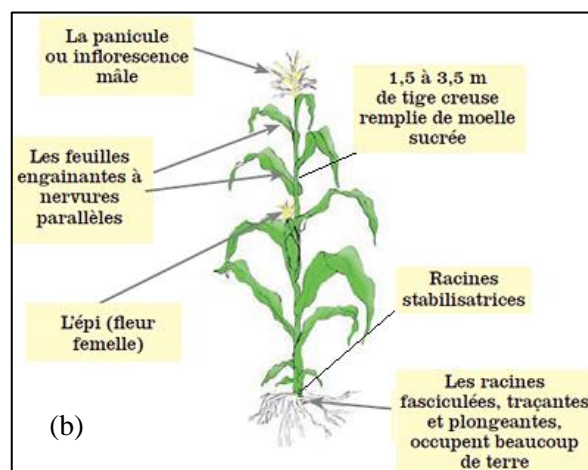
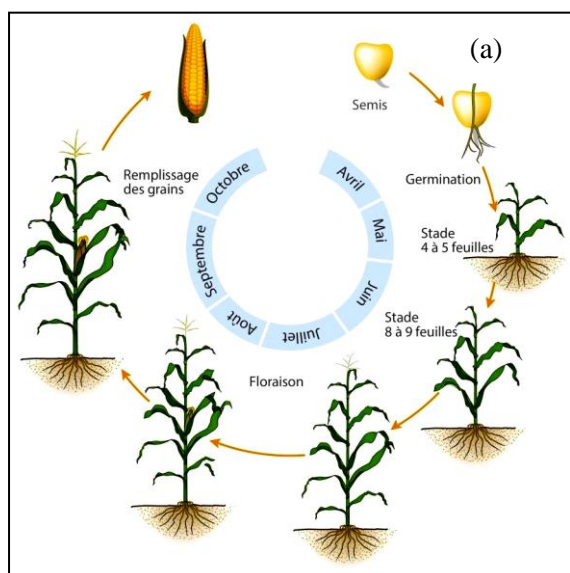


Figure 1: a- cycle de vie du maïs ; b- Composants d'un pied de Maïs – (Soltner, 2005)

I.1.2. Variétés cultivées et semis

Le maïs est une culture qui se développe bien dans les sols à texture sableuse (**callot et al., 1982**). Selon **Maas, (1993)**, le maïs est une culture modérément tolérante à la salinité avec une gamme de pH tolérée par la plante varie de 6 à 8 .

a. Les clés du choix variétal en zones arides et semi-arides

Au cours des 50 dernières années, la productivité du maïs a fait l'objet de progrès fulgurants, bien supérieurs à ceux des autres plantes. Aujourd'hui, les potentiels de rendements ne sont même pas comparables à ceux obtenus 20 ans auparavant, en raison essentiellement des progrès de la génétique (**Barrière, 2001**). Sur la même période, l'efficacité d'utilisation de l'eau n'a pas été améliorée. En régions arides, les conditions de température et d'ensoleillement pourraient permettre de cultiver des variétés très productives (maturité tardive pour la production de maïs grain), mais les ressources en eau nécessaires pourraient ne pas être disponibles, ou coûter trop cher à exploiter, d'où un rendement théorique qui pourrait ne jamais être atteint. Le choix d'une variété dépend donc d'un équilibre entre les besoins hydriques de la plante (liés au rendement potentiel) et la disponibilité en eau.

b. Hybrides de maïs adaptés aux régions chaudes

Plusieurs variétés ont été cultivées dans les différents périmètres de la wilaya d'Adrar. En ce qui concerne le maïs fourrage, le choix variétal doit également tenir compte de la qualité de l'aliment final. Si la production de lait revêt une importance primordiale dans le système d'exploitation, des variétés productives pourvues de valeur nutritionnelles exceptionnelles doivent être choisies. La plupart des variétés introduites peuvent être utilisées soit pour la production de grain ou pour l'ensilage ou pour les deux.

c. Le semis

Selon des essais réalisés en France en 2013, disponibles sur le site (www.lgseeds.fr), la vitesse d'avancement doit être adaptée en fonction du type de semoir, de la préparation de la parcelle, du taux de cailloux et de la texture du sol et qui permet d'obtenir une régularité de profondeur de semis ainsi que de la distance entre les graines. Le respect d'une vitesse adaptée permet en moyenne de préserver 7 % du potentiel de la parcelle en évitant le problème de manque et/ou de double.

I.1.3 Irrigation

I.1.3.1. Efficacité d'utilisation de l'eau

La photosynthèse du maïs est de type C₄. Cela signifie que le premier glucide formé possède 4 atomes de carbone. Comme toutes les plantes en C₄, le maïs se caractérise par un

meilleur rendement photosynthétique et une meilleure utilisation de l'eau que les plantes en C₃. En l'absence de facteurs limitants (eau, nutriments, lumière), le maïs ou le sorgho produisent 40 kg de matière sèche/mm/ha, tandis que le blé ou le ray-grass ne produisent que 25 kg matière sèche/mm/ha, et la luzerne 20 kg matière sèche/mm/ha (**Barrière, 2001**). En d'autres termes, le maïs à grain et fourrager nécessite moins d'eau pour produire autant de biomasse que la luzerne ou le blé, grâce à leur efficacité physiologique d'utilisation de l'eau.

I.1.3.2. Résistance à la sécheresse

Lorsqu'il est soumis à un stress, le maïs perd cette exceptionnelle efficacité d'utilisation de l'eau car il est fragilisé par un système racinaire peu développé (en comparaison d'autres plantes en C₄ comme le sorgho). Si l'efficacité physiologique d'utilisation de l'eau reste inchangée, l'efficacité globale chute en revanche en situation de stress hydrique.

I.1.3.3. Les eaux d'irrigation

Dans les régions sahariennes, les eaux d'irrigation proviennent de la nappe du continentale intercalaire appelée communément « l'albien ». La nature des eaux diffère d'une région à une autre. La conductivité électrique varie de 1ms/cm à 5 ms/cm, on distingue globalement deux types d'eau :

- * Eau douce, où la conductivité électrique se situe au voisinage de 1 ms/cm, cette eau se trouve généralement à l'amont des palmeraies, et regroupe les eaux captées par les foggaras, la plupart des forages d'eau potable et les forages alimentant les pivots (ex. forage d'Aougrout, conductivité électrique = 1,07 ms/cm).
- * Eau légèrement salée : la conductivité électrique, varie de 2 à 5 ms/cm dont la concentration des sels augmente à proximité des palmeraies. Ces eaux sont captées généralement par les puits peu profonds et alimentés partiellement par les eaux de drainage (puits de la station INRA d'Adrar conductivité électrique = 5 ms/cm).

I.1.3.4. Besoins en eau

Selon l'ITGC (2011), en conditions de d'irrigation et de conduite hautement intensive de la culture de maïs peut restituer, par transpiration, jusqu'à 2 740 des 2 800 litres qu'il a extrait du sol, ce qui correspond à 1400 mm pour un cycle de 5 mois. Au grand sud, les besoins en eau sont estimés à 9000 m³/ha/100jours d'irrigation par pivot (**Kerroumi, 2016**).

I.1.4. Fertilisation

En Algérie, les zones arides représentent près de 95% du territoire national dont 80% dans le domaine de l'hyperaride (**Halitim, 1985**). Les sols sahariens sont généralement

pauvres en éléments nutritifs, la fertilisation raisonnée reste à l'heure actuelle le moyen le plus efficace pour l'obtention d'une productivité optimale (**Halilat, 2004**). L'absence, dans la plupart des cas, d'analyses du sol et de l'eau rend toute politique de fertilisation difficile à concevoir (**Zankhri, 2017**). Les recommandations pour le maïs sont de 4 q/ha de triple superphosphate(TSP) et 5 q/ha d'urée. Les résultats des analyses du sol, obtenus par **Derbali (2011)**, représentent la réserve du sol avant la mise en place de la culture. Le tableau 1 donne les résultats des analyses du sol sous pivots de différentes zones comparés aux teneurs souhaitables.

Tableau 1: Résultats des analyses du sol sous pivots pour différentes zones comparés aux teneurs souhaitables

Détermination	Teneur souhaitable	Résultats			Appréciation
		Z. Kounta	Fenoughil	Tsabit	
- Classe texturale		terre sableuse	terre sableuse	terre sableuse	Sol léger
Matière organique	2,2 à 3 %	0,5	0,29 %	1,6%	Très faible
- Carbone /Azote (C/N). Conditions pour la décomposition de la matière organiques	9 - 10	49	10,23	40	défavorables /ralentie /défavorables
- Calcaire total %	5	5,3 %	9%	11,38 %	Sol modérément calcaire
- Calcaire actif %	< 5	5%	1,86%	3,40%	- Faible
- Capacité Echange Cationique (CEC) %	20 – 25	10,14	6	6	-Très faible
- Taux de K ₂ O échangeable (mg/kg)	180 à 230	900	546	440	- Elevé
- Taux de MgO échangeable (mg/kg)	90 à 140	430	386	281	- Elevé
- P ₂ O ₅ assimilable (mg/kg)	130 à 175	102,53	150	160	Un peu faible / Satisfaisant
- Soufre total (S) (mg/kg)	50	600	650	600	- Très élevé
- pH du sol	6,6 - 7,3	8,25	8,02	7,8	- Alcalin
-Conductivité électrique mmhos/cm	4 max	0,54 non salé	2,1	3,05	- Légèrement salé

Derbali (2011)

Dans la zone d'Adrar, l'étude réalisée par **Derbali (2011)** a mis en évidence un sol fragile et vulnérable aux aléas climatiques qu'il convient de protéger, une fertilité physique et biologique très faible et une fertilité chimique satisfaisante en potassium et en magnésium et faible en phosphore (cas d'un pivot à Zaouiet Kounta). L'étude a aussi montré que pour les différentes années d'exploitation, le sol a gardé son équilibre en phosphore avec un apport d'engrais phosphatés à raison de 180 unités/ha chaque année de mise en culture.

Malgré les exportations par les plantes, le lessivage et l'absence de fertilisation potassique et magnésique, le sol a gardé sa richesse en potassium et magnésium qui se justifie par la richesse du sol et l'eau d'irrigation en ces éléments.

Le rôle du magnésium est très important dans la plupart des fonctions vitales de la plante. La chlorophylle est riche en magnésium et un manque de cet élément secondaire affecte l'activité photosynthétique de la plante et conséquemment, le rendement et la qualité des produits.

Un pH supérieur à 7 rend inassimilable pour le maïs le Fe, B, Zn et Mn du sol. Or, le maïs a des besoins importants en certains oligo-éléments (**Belaid, 2013**). Les oligo-éléments majoritairement prélevés sont le fer et le manganèse. Viennent ensuite le bore et le zinc. Le maïs est très sensible à une carence en zinc (figure 2). En sol carencé, on observe dès le stade 6-8 feuilles des décolorations jaunes entre les nervures. Des applications foliaires de zinc sont possibles.



Figure 2 : carence en éléments nutritifs chez le maïs Source :K+S Kali, IPNI, Unifa

On trouve aussi l'utilisation des biostimulants des végétaux, tel que l'acide humique, qui est un fertilisant ayant pour fonction de stimuler les processus de nutrition des végétaux indépendamment des éléments nutritifs qu'il contient, dans le seul but d'améliorer une ou plusieurs des caractéristiques des végétaux ou de leur rhizosphère (**Escale, 2020**) suivantes :

- l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs,
- la tolérance aux stress abiotiques,
- la disposition des éléments nutritifs emprisonnés dans le sol et la rhizosphère.

Un biostimulant est défini par sa fonction et non par sa composition.

Les composés d'acide humique sont largement utilisés dans la production agricole et dans le grand sud Algérien, en raison de leurs effets positifs :

- amélioration des sols salins, calcaires, alcalins, sableux et même l'eau d'irrigation

- augmentation de l'efficacité des engrais dans un sol nouveau (première mise en culture) et aussi dans la germination des graines et la production de plants
- augmentation de la capacité de rétention des sols (sableux ou sol ayant subi une sécheresse)
- favorisent l'échange de cations dans le sol (permettent de retenir d'avantage les éléments nutritifs NPK et oligo-éléments)
- favorisent l'augmentation de la masse racinaire

I.1.5. Le système de production et la mise en valeur

Le lancement de la mise en valeur agricole repose sur la loi de 1983 relative à l'accèsion à la propriété foncière agricole (APFA). Concrètement, cette loi autorise la réalisation de programmes de mise en valeur agricole sur les terres du domaine privé de l'État en zones sahariennes, steppiques et montagnardes. Trois éléments permettent de recontextualiser le développement de cette nouvelle forme de mise en valeur (**Otmane, 2010**).

- 1- Le premier réside dans le renchérissement du prix des céréales sur les cours mondiaux et la dépendance croissante de l'Algérie face aux marchés extérieurs.
- 2- Le second élément de cette loi, d'abord limitée au seul Sahara, avait pour objectif subsidiaire le développement de régions sahariennes, caractérisées par des économies fragiles et dépendantes du nord algérien.
- 3- Enfin, d'un point de vue politique, cette loi s'inscrivait dans la logique de libéralisation économique des années 1980, comme le précise **Bessaoud (2008)**.

Ce système de production intensif utilise des procédés modernes pour les différentes spéculations. Avec le décret de 1992 (289/92 juillet 92), le programme prioritaire du gouvernement encourage les investissements à grande échelle. Les bénéficiaires ont droit entre 250 à 1000 ha. Plus tard, en 2000, plus de 80 000 ha étaient attribués pour environ 4 000 attributaires dans le Plan national de développement agricole (PNDA) dans les trois parties de la wilaya d'Adrar : Touat, Gourara et Tidikelt dont environ 55 % pour la grande mise en valeur. 629 forages ont été réalisés dans les trois sous-ensembles depuis le lancement de ce programme, dont 392 affectés à la grande mise en valeur (**ANRH, 2004**) ; leur profondeur varie entre 90 et 150 mètres, pour un débit moyen de 25 l/s par forage. Les exploitations ont bénéficié de plus d'une centaine de rampe-pivots. On distingue actuellement trois types de mise en valeur.

I.1.5.1. Petite mise valeur

C'est un système de polyculture en sous étage (palmier, henné, maraîchage, céréales et fourrages...) et de complémentarité avec l'élevage ovin ou caprin dont la superficie varie de 2 à 5 ha. L'irrigation se fait à l'aide de puits. Ce système se rapproche de la production oasienne de type familial destiné, en grande partie, à l'autoconsommation. Il reproduit la même logique de fonctionnement.

I.1.5.2. La moyenne mise en valeur

Elle concerne des exploitations d'environ 30 à 50 ha. Le fonctionnement, la finalité ainsi que les moyens de production utilisés durant le processus de production de ce système sont différents de la petite mise en valeur. Les exploitations sont, soit, individuelles, soit, sous forme de groupement d'entraide paysanne (GEP).

I.1.5.3. La grande mise en valeur (GMV)

Notre étude est consacrée à ce type de mise en valeur, les superficies attribuées et occupées par la grande mise en valeur varient entre 50 et 250 hectares par exploitation. Elle utilise des moyens de production modernes et les nouvelles techniques agronomiques.

Tableau 2: Superficies irriguées dans les périmètres de mise en valeur à Adrar

Année	Superficie irriguée (ha)		
	Petite mise en Valeur	grande mise en Valeur	total
2000	5 070	5 174	10 244
2014	8 576	6 310	14 886

DSA, 2015

Le but est de créer de grands pôles de productions, ce qui a permis l'extension des superficies de la région. On trouve même des exploitations ayant une taille de 1000, 1500 à 5 000 ha comme l'exemple du Complexe Agro-Alimentaire du Sud (CAAS). Elles étaient destinées à la production de céréales sous pivots à grande échelle. Cependant, en 2005, moins de 5 % des superficies attribuées à la grande mise en valeur ont été réellement mises en culture, montrant un grand décalage entre les ambitions et les réalisations de ces programmes (**Otmane et Kouzmine, 2013**).

Avec la loi APFA (1983), des périmètres de taille assez importante sont créés au niveau de la wilaya d'Adrar. Le tableau 3 montre l'emplacement et les superficies de ces grands périmètres mis en place. Le projet politique (**Otmane, 2010**) de la grande mise en valeur agricole s'est concentré sur la production céréalière, engageant la région dans la réalisation de programmes très ambitieux. La mise en valeur dans la wilaya d'Adrar s'étend sur l'axe routier Timimoune - Adrar - Aoulef soit une distance de 590 km avec une forte concentration dans la région du Touat. 14 périmètres représentant 64 423 ha (tableau 3) ont été créés dans 13 communes. Le Touat a bénéficié de trois quarts des programmes, il compte

les zones les plus importantes de la grande mise en valeur agricole : Sbaa et Adrar au nord, Baamer au centre, et Stah Azzi et Ain El Feth au sud. Six autres périmètres, de superficies, cette fois-ci, inférieures, de l'ordre de 3 478 ha ont été aménagés dans le Tidikelt. Par ailleurs, le seul périmètre créé au Gourara (Zaouiët Sidi Abdellah), dans la commune d'Aoughrout, couvre une superficie qui représente trois fois celle mise en valeur dans le Tidikelt (12 143 ha). Depuis 2017, un nouveau périmètre qui s'appelle Ennahda s'ajoute à Mguiden (30 000 ha) dans le cadre d'une coopération entre l'état (MADR) et le privé (Sahraoui). C'est un méga projet destiné à la production de céréales et fourrages sous pivot.

Tableau 3 : Programmes de la grande mise en valeur agricole au Gourara- Touat-Tidikelt (GTT) en 2004

Sous ensemble	Périmètre	Commune	Superficie programmée (ha)	Superficie attribuée (ha)
Touat	Stah Azzi	Zaouiël Kounta	129 626	18 750
	Baamer	Fenoughd	21 604	10 533
		Tamest	20 000	2 735
	Aéroport	Adrar	37 740	4 014
	Grara et Raye	Sbaa. Tsabit	31 494	7 559
	Ain el feth	inzeghmir	14 706	4 961
	Ouaïna	Timmi	250	250
Gourara	Zaouiët Sidi Abdellah 1 et 2	Aoughrout	20 000	12 143
Tidikelt	Med Boudiaf	Aoulef	3 630	2 026
	Barka	In salah	500	500
	Sahla tahtania		200	200
	taghbeRa	In ghaR	152	152
	foggaRet Ez z 1	foggaRet Ez zaoUa	500	500
	foggaRet Ez z 2		100	100
Total	14		280 502	64 423

La grande mise en valeur agricole s'est développée selon deux types d'attribution foncière : collectif et individuel. L'attribution collective destinée à la population locale, la superficie de leurs exploitations variant de 50 à 1 500 ha, destinées à l'irrigation par rampe-pivot ainsi qu'à la culture du palmier et du maraîchage. Quant au type individuel, les attributions se sont réalisées sur de grandes superficies, comprises entre 100 et 5 000 ha, en mobilisant des entrepreneurs agricoles originaires de la région ou exogènes. Selon l'enquête de terrain (**Dahmane, 2008** et **Merabti, 2008**) 76 attributaires de la grande mise en valeur n'étaient pas issus du secteur agricole : 29 étaient auparavant commerçants, 31 fonctionnaires dont 10 enseignants et 16 exerçaient des fonctions libérales. Ces entrepreneurs ont, par ailleurs, bénéficié du soutien de l'État (réalisation de forages, équipement hydroagricole et aménagement des périmètres agricoles) et de crédits accordés par la Banque de l'agriculture et du développement rural (BADR).

Les exploitants individuels sont accompagnés par L'Office Algérien Interprofessionnel des Céréales (OAIC) à travers les Coopératives de Céréales et de Légumes Secs (CCLS). Ces dernières fournissent des prestations de services à termes tel que l'approvisionnement en semences et en engrais avec des prix subventionnés. À la fin de la saison, elle s'occupe de la récolte, de l'achat, du transport et du stockage des produits. Ces exploitants « accèdent plus facilement à la terre, à l'eau, au crédit et aux aides de l'Etat. Ils bénéficient de la politique de soutien des prix » (**Bessaoud, 2016**). Dans le modèle de GMV, l'achat de la production des céréales est assuré par la CCLS. La rentabilité économique de ce modèle est souvent justifiée par une production moyenne de blé dur d'environ 35 q/ha, considérée élevée par rapport au nord du pays où la production moyenne est de 10 à 15 q/ha. Cette comparaison est illusoire, elle ne prend pas le coût de production en considération. Selon **Idda (2019)**, un exemple de périmètre de Baamar - Fenoughil, pour l'année agricole 2013/2014, seulement 693 ha ont été réellement mis en culture et 794 ha pour 2015/2016 (7,5 %) irrigués par 25 pivots. Le rendement moyen réalisé varie de 30 et 40 q/ha selon les années avec des pics de 70 q/ha dans certaines exploitations.

I.2. Conduite de l'irrigation par rampes pivotantes

Le pivot central, la rampe pivotante ou le Pivot est l'un des systèmes (machine) d'irrigation modernes utilisés en agriculture pour mieux valoriser les ressources en eau, particulièrement dans les régions arides pour les grandes cultures. Il s'agit d'un système qui s'adapte à tous types de terrains, et qui permet d'accroître le nombre de récoltes annuelles dans ces zones. Il est désormais possible d'apporter aux cultures, outre l'eau d'irrigation, des engrais et produits phytosanitaires par le biais de la fertigation appliquée de manière très uniforme, précise et efficace. La rampe pivotante a été inventée aux Etats Unis, où a été construit le premier appareil dans l'état de Nebraska en 1949 (**Rolland, 1980**). Ce système était destiné à irriguer des cercles de très grand rayon, couvrant ainsi des surfaces circulaires atteignant 200 ha (**Cemagref, 1995**). Ce système d'irrigation est totalement automatique et élimine toute intervention humaine, sauf pour l'entretien. Le pivot a connu depuis son invention de nombreuses améliorations lui permettant de se propager à travers le monde entier. Ainsi de nombreux pays l'ont adopté et utilisé pour la mise en valeur des grands espaces.

I.2.1. Description d'une rampe pivotante

Le pivot est le point où se fait l'arrivée d'eau et d'électricité. Il est généralement fixé sur une dalle en béton équipée d'encrages scellés dans des parcelles. Une armoire de

commande située au niveau de la tour centrale fixe le temps de fonctionnement du moteur de la dernière tour au cours d'un cycle d'une minute. Elle permet de choisir la vitesse d'avancement pour apporter la dose d'arrosage requise. On trouve également dans l'armoire un coupe-circuit général un système autorisant le déplacement de l'appareil avec ou sans eau, en avant et en arrière, un interrupteur de mise en route et d'une installation pour l'injection de produits chimiques (engrais, pesticides). L'électricité est distribuée à la machine par un collecteur circulaire à balais pour les appareils effectuant une rotation complète.

I.2.1.1. Structure du Pivot

Les tours représentent les supports de la canalisation. Elles sont équipées de roues animées par des moteurs électriques ou hydrauliques à huile commandés séquentiellement par des micro-rupteurs assurant l'alignement des travées entre elles (figure 3).

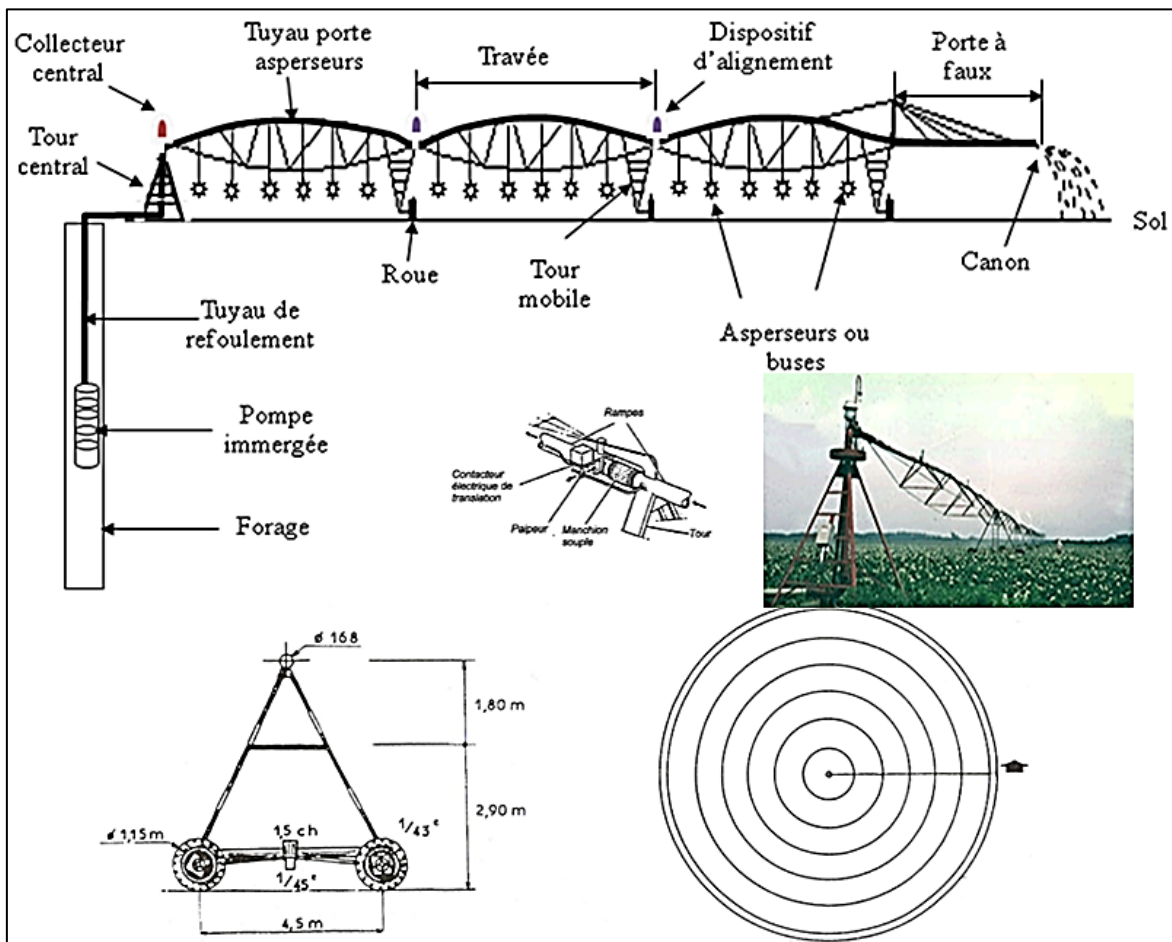


Figure 3 : Une rampe pivotante et ses principaux éléments constitutifs. (Hamrelaine, 2020)

Les travées sont suspendues entre deux Tours. Elles sont constituées d'une canalisation servant de poutre, rigidifiées par une structure. D'une longueur de 30 à 65 m, elles laissent un dégagement sous structure de 2,5 à 3,5 m, et de 3,5 à 5 m de hauteur totale (Kranz, 1998).

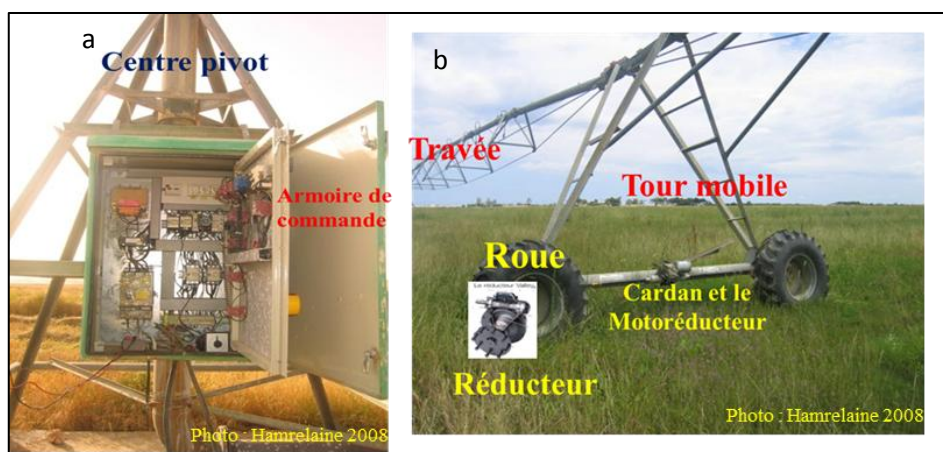


Figure 4 : a- Tour centrale et armoire de commande d'un Pivot à Goléa ; b- Tour d'une rampe frontale à Souk El Tenin CAZEL Béjaïa (**Hamrelaine, 2008**)

La canalisation est généralement en acier galvanisé. Elle est constituée d'éléments de 6 ou 12 m, assemblés entre eux par des brides boulonnées. Son diamètre varie de 114 mm à 219 mm voire 254 mm pour les grands appareils avec des épaisseurs variant de 2,5 à 4 mm. La conduite est équipée de piquages à intervalles réguliers (1 à 3 m) destinés à recevoir les organes d'arrosage (**Cemagref, 1995**). La liaison hydraulique entre travées est assurée par une gaine souple ou un manchon métallique avec joints. La structure se termine par une canalisation haubanée, placée en porte-à-faux. D'une longueur pouvant atteindre 24 m, elle est souvent équipée d'un canon d'extrémité. Il est alimenté par un surpresseur. Le pivot arrose automatiquement un cercle ou une portion de cercle dont la superficie varie de 1 ha à 150 ha. Le déplacement des tours est assuré par des moto-réducteurs constitués d'un moteur électrique et d'un réducteur divisant par 20 à 50 la vitesse du moteur. Les moteurs électriques ont une puissance de 0,25 à 3 CV (0,18 à 2,2 KW). Ils sont disposés sur les tours, au milieu de la barre transversale reliant les roues (**Cemagref, 1995**).

I.2.1.2. Les organes d'arrosages

Les rampes d'arrosage peuvent être équipées de différents types d'asperseurs, chacun ayant des contraintes particulières (**Rolland, 1980**), ces derniers exigent, pour un bon fonctionnement, une pression supérieure à 2 bars (tableau 4). Leur portée est comprise entre 12 et 18 m. Les **buses ou sprays** fonctionnent à faible pression (0,5 à 3 bars). Leur faible portée atteignant un maximum de 5 m et entraîne des intensités pluviométriques élevées. Ils sont, de ce fait, à éviter sur des sols peu perméables. Les **buses à déflecteur tournant** utilisent un déflecteur tournant (rotor), fonctionnant à pression moyenne variant de 0,7 à 4 bars. Ils peuvent être disposés à l'extrémité des cannes de descente, le rotor peut émettre de 1 à 6 jets suivant le débit. Leur portée varie entre 8 et 14 m.

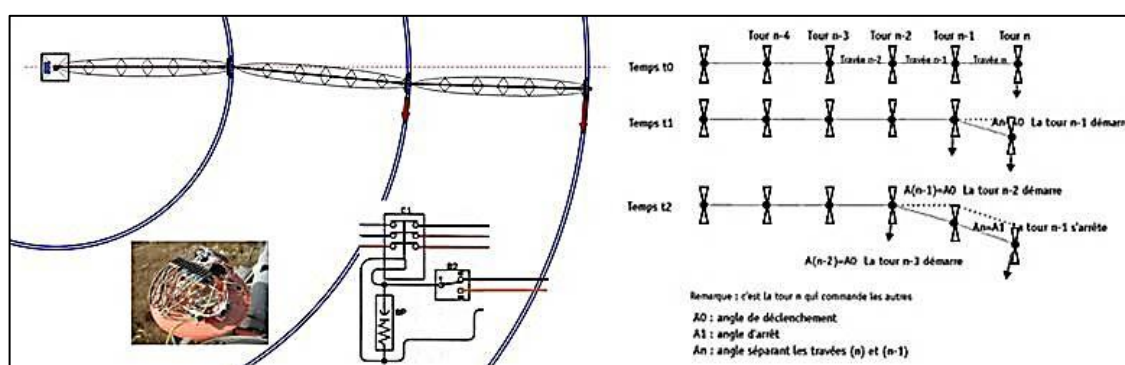
Tableau 4 : récapitulatif des différents types d'asperseurs existants

Asperseurs	Asperseurs à impact (Sprinkler®)	Asperseurs à déflecteurs fixe (spray)	Asperseurs à déflecteurs rotatifs (rotor ou rotator)
			
Pression disponible de fonctionnement	2 à 4 bars	0,5 à 2 bars	0,7 à 3,5 bars
Portée (en fonction de la hauteur de l'asperseur et de la pression)	12 à 20 mètres	2,5 à 8 mètres	8 à 14 mètres
Sensibilité au vent	Moyenne	Faible	Moyenne
Intensité pluviométrique	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Faible

Source : fiche-pivot chambreagri.fr

I.2.2. Principe et mode de fonctionnement

La vitesse moyenne de déplacement du pivot est fixée par le temps de fonctionnement de la tour d'extrémité. Le mouvement de l'ensemble de l'appareil se fait ensuite par corrections angulaires successives entre travées (figure 5). Au niveau de chaque tour un boîtier étanche renferme un système de micro capteurs à cames et à billettes qui permet de maintenir l'angle entre deux travées dans un intervalle donné. Ils arrêtent la rampe et la station de pompage : c'est la mise en sécurité. Les constructeurs de rampes pivotantes fournissent des tableaux et abaques qui établissent les correspondances entre la longueur de la rampe, le débit au pivot, la hauteur d'eau appliquée en une révolution pour une vitesse donnée de l'avancement de la tour d'extrémité.

**Figure 5** : Principe de l'avancement d'un Pivot (Hamrelaine 2020)

I.2.3. Busage et contrôle de l'uniformité d'arrosage de l'appareil

Le débit nécessaire au niveau de chaque asperseur dépend uniquement de sa position sur la rampe. Le choix des caractéristiques des buses dépendra des deux paramètres suivants : la pression disponible et le débit requis. Selon **Molle (1998)**, l'uniformité d'arrosage est d'autant plus grande que les écartements entre distributeurs sont réduits, permettant un meilleur recouvrement entre asperseurs voisins. Un busage est calculé pour une série de

caractéristiques hydrauliques bien déterminées (types d'asperseurs, l'écartement et la pression), toute modification d'une seule unité (figure 6), d'entre-elles change le comportement de l'ensemble.

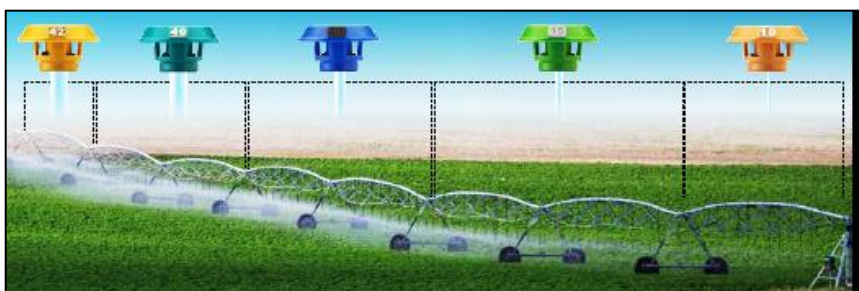


Figure 6: Répartition des buses le long d'une rampe à partir de leur code-
Source : nelsonirrigation.com.

Il est à signaler que la hausse du coût d'électricité globalement liée au pompage de l'eau peut être un indice de l'usure du matériel d'arrosage (asperseurs/buses). En effet, l'usure des asperseurs engendre l'élargissement des orifices des buses ce qui entraîne l'augmentation du débit. La pompe travaille donc plus fort et consomme plus d'électricité (Molle, 2005).

Le contrôle de la qualité de la répartition pluviométrique et en particulier de son uniformité est primordiale, notamment lorsque le busage vieillit et aussi lorsqu'il est envisagé d'utiliser l'appareil pour effectuer des épandages de fertilisants ou de produits phytosanitaires par aspersion. Ce contrôle peut être réalisé sous forme d'une «Fiche de diagnostic d'un pivot au champ selon la norme ISO11545». Ce type de contrôle est négligé chez 98% d'agriculteurs enquêtés. Le calcul du coefficient d'uniformité (CU) proposé par Christiansen (1942) et Heerman (1968) permet une appréciation globale de la distribution d'eau (figure 7) à partir de mesures sur deux rayons.

A titre d'exemple pour un pivot ANABIB 160EL de 30 ha délivrant une pluviométrie moyenne de 9 mm à une vitesse d'avancement de 100%, le niveau des intensités pluviométriques délivré au niveau de la dernière travée est de l'ordre de 150 mm/h alors que le sol sablonneux ne supporte qu'un maximum de 50 mm/h (Boukhalfa, 2004).

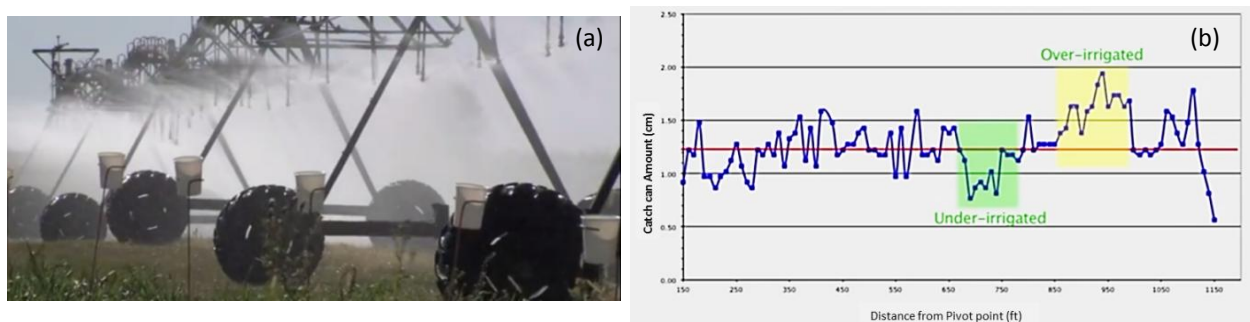


Figure 7: a- exemple de contrôle d'uniformité avec des Catch Can (pluviomètres) ;
b- résultats de contrôle – Source : NDSU, 2018

Selon l'OSS (2008), la faible efficacité généralisée de l'irrigation en termes de productivité du mètre cube d'eau est de:

- 0,32 kg de dattes/m³ d'eau pour le palmier dattier, alors qu'elle peut dépasser 0,5.
- 0,02 kg de grains de blé/m³ d'eau pour le blé sous pivot, alors qu'elle peut dépasser 1,2
- 2,5 kg de tomates/m³ d'eau pour la culture de tomate de plein champ alors qu'elle peut dépasser 6.

I.2.4. Problème de la formation d'ornières

Une ornière se forme lorsque l'eau tombée directement sur les roues par les asperseurs installés à côté de la tour mobile provoque un creux profond, de 30 à 40 cm, sur le passage des roues (figure 8) engendrant un freinage d'avancement de la tour et la détérioration de la chaîne cinématique (cardan et réducteurs). Ces pannes sont très fréquentes et causent des dégâts surtout durant les stades critiques de développement de la végétation.



Figure 8 : Une ornière formée par le passage de roues du pivot. Photos personnelles 2016

I.2.5. L'expérience du pivot en Algérie

La mise en valeur des terres sahariennes du sud algérien est basée sur la culture céréalière sous pivot (**Kassah, 1998**). Ces régions ont connu, depuis 2013, une activité agricole très intense (après un ralentissement fin 90 jusqu'à 2008), orientée vers la production céréalière (blé/maïs) sous pivots. Le débit mobilisé est très important : 40 à 70 l/s pour des pivots de 30 à 50 ha (**Benmalek, 2000 et Boucedra, 2010**). Cependant, la mauvaise conduite d'irrigation par le pivot et la méconnaissance des besoins en eau des cultures par les agriculteurs ont entraîné un gaspillage de quantités considérables d'eau et d'énergie, entraînant parfois une chute catastrophique de la production.

I.2.5.1. Etat des lieux de pivot dans les régions sahariennes

La "grande mise en valeur" a nécessité de très gros moyens et la préparation d'une vaste infrastructure de base plus de 563 forages, et plus de 400 pivots à travers les wilayas de Ouargla, Ghardaïa et Adrar dont à peine une centaine en fonction..., le tout financé par l'Etat, mais souvent non opérationnels à cause de divers problèmes (pannes, abandons, dégradations...). Selon le CDARS, les données sur l'état des lieux des pivots au grand sud durant 23 campagnes (1986/ 1987 à 2003/2004) montrent que le nombre de pivots non fonctionnels va de pair avec la progression de leur implantation avec des taux de pannes qui tournent autour des 36 %. Ces pannes sont dues à plusieurs raisons (**Boukhalfa, 2004**) : matériel détérioré pour la majorité des pivots provoquant des pannes dues aux fuites d'eaux au niveau du tubage, des conduites principales et à la défektivité de l'axe du centre pivot, des buses bouchées par le calcaire provoquant une hétérogénéité d'irrigation. De même, nous avons constaté que certains pivots ne sont pas équipés en buses ainsi que la détérioration d'un grand nombre de réducteurs. Selon Kouzmine (2010), sur la base des images satellitaires, le nombre de pivots exploités en 2005 représente la moitié de celui de 2003 dans l'ensemble de la région (Tableau 5). Cela s'est très nettement ressenti à travers la régression des récoltes et des livraisons à la CCLS. La superficie irriguée par rampe-pivot dédiée aux céréales a également diminué de 2 999 à 1 817 ha, soit une réduction d'environ 40 %.

Tableau 5 : La superficie cultivée dans la grande mise en valeur au GTT (2003 et 2005)

Commune	En 2003		En 2005	
	Superficie (ha)	Nombre de Pivots	Superficie (ha)	Nombre de Pivots
Zaouiet kounta	1091	30	656	15
Fenoughil	820	21	508	14
Adrar	110	3	0	0
Tsabit (Sbaa)	642	17	362	8
Inzeghmir	170	4	153	7
Aougrout	120	4	91	3
Aoulef	28	1	47	1
Tamest	18	1	0	0
In ghar	0	0	0	0
Total	2999	81	1817	48

Selon **Boucedra (2010)**, il y a une absence totale de suivi des irrigations par la majorité des agriculteurs. Il a été signalé que la vitesse, de la majorité, des pivots était de 40 % pour une fréquence journalière de 1,16 l/s/ha (10 à 12mm/j) et ce, pendant toute la campagne. Il est à noter que les irrigations appliquées sur le terrain ne correspondent pas aux doses préconisées pour les céréales par la fiche technique et qui sont de :

- Vitesse du pivot de 100 % du 1^{er} au 10^{ème} jour : stades germination et levée ;
- Vitesse du pivot de 60-70 % du 16^{ème} au 45^{ème} jour jusqu'à l'épiaison ;

- Vitesse du pivot de 80-90%, du 45^e jour jusqu'à la maturation ;
- Arrêt complet de l'irrigation 10 jours avant la récolte.

D'après les données de la DSA d'Adrar (2009), les rendements du blé de 14 campagnes agricoles sont très médiocres, faute de moyens de production mobilisés à chaque campagne par l'état pour améliorer les rendements. Les rendements atteints par les pays utilisateurs de ce système dépassent les 70 q/ha. Cependant, les problèmes de pivots cités ci-dessus et sans oublier l'effet de l'absence de la maîtrise de la technicité de pivots par les agriculteurs participent énormément dans la chute des rendements.

I.2.5.2. Évolution du marché des rampes d'irrigation mécanisées en Algérie

En Algérie, le premier pivot à titre expérimental a été introduit par les américains, en 1986, dans la commune de Ain Zekkar dans la wilaya de Ouargla. C'est un pivot de marque Valmont appartenant à l'annexe de CCLS de Hassi Messaoud. Tandis que le premier pivot fabriqué par ANABIB remonte à juin 1987 (**Boukhalfa, 2004**), pour la région de Gassi-Touil (Ouargla) et la région d'Adrar. En 1996, la région de Taàdmit (wilaya de Djelfa) a bénéficié de ce nouveau système d'irrigation. La seule rampe frontale introduite en Algérie est celle qui se trouve à Béjaïa (**Hamrelaine, 2008**) exactement dans la plaine de souk El Tenine au Complexe Agricole Zootechnique d'Élevage (CAZEL), une filiale de la SGP PRODA (figure 9).



Figure 9: Photo - Rampe frontale au niveau du CAZEL Souk El Tenine BEJAIA. L'introduction de ce système au moment de démarrage des opérations de mise en valeur dans le cadre de l'APFA et de PNDA, dans les régions sahariennes a permis l'augmentation de la surface irriguée pour la culture des céréales. Ils existent des pivots d'irrigation de 10, 15, 22, 32 et 50 ha. Le choix entre cette gamme de pivots reste fonction de plusieurs paramètres, dont les plus importants sont le financement et le débit du forage (**Chaouche, 2006**).

Cette machine a été introduite à Adrar en 1987 dans la ferme pilote de **SBAA** au nord de la wilaya et à titre privé dans le Ksar de Melouka. On trouve aussi plusieurs marques étrangères de pivots : Américaine, française, Espagnol, Türk et chinoise (Otech, Zimmatic, Irrifrance, Valmont, TL ...). Ces compagnies sont représentées par plusieurs fournisseurs Algériens

comme, Groupe kherbouche à Tlemcen, ACI El Achour à Alger, AgriSud TL irrigation hydraulique système à Béjaïa. Selon les statistiques disponibles au niveau de la DSA d'Adrar, l'évolution la plus marquée concerne le nombre de pivots fonctionnels sur les quinze dernières années, qui est passé de 90 pivots en 1995 à 98 pivots en 2010 et à 187 pivots en 2015 et selon **Douag (2018)** jusqu'à 318 pivots. Il y a lieu de signaler que cette évolution de pivots n'a pas été souvent encadrée par un appui technique adéquat à même de permettre aux céréaliers d'acquérir des connaissances modernes en matière de conduite d'irrigation.

I.2.5.3. Constructeurs de Pivots en Algérie

L'entreprise IRRAGRIS filiale ANABIB - Bordj Bou-Arréridj - Algérie est spécialisée dans la fabrication de tubes et matériel d'irrigation relevant de l'EPE ANABIB, Filiale du Groupe IMETAL. Cette entreprise étatique assure l'étude, la fabrication, la fourniture et l'installation de systèmes d'irrigation par aspersion complets et clé en main. IRRAGRIS fabrique notamment : La rampe d'aspersion classique largement exportée sur le marché international, après avoir conquis le marché algérien. Le pivot d'irrigation : Système programmable conçu pour l'irrigation automatique de grandes surfaces (10 à 76 hectares) avec un rendement optimal.

a. Coût des pivots marque ANABIB Bordj Bouarirej Algérie

Pour fixer les idées, un pivot se vend entre 150000 et 200000 DA l'hectare. Les Prix en TTC (ANABIB, 2018) sont : Pivot de 1 ha à 690.000,00 DA, 30 ha à 5.940.000,00 DA et 50 ha à 7.500.000,00 DA. Plus le pivot est grand, plus son coût à l'hectare sera faible.

b. Pivot Artisanal de Oued Souf

Lors de notre visite à la wilaya d'El Oued (2003 et 2010) nous avons eu l'occasion d'assister à la réalisation de différentes pièces d'un mini pivot artisanal chez un ferronnier. Le pivot El'Hdadi (figure 10) est le grand exemple qui reflète les besoins réels des agriculteurs. Vu ses dimensions, les dépenses sont moindres et acceptables, il est moins cher et plus apte à combler les besoins sociaux dits familiaux comparativement aux grands pivots conventionnels introduits par l'État, qui étaient coûteux et non adaptés aux objectifs et aux capacités techniques des agriculteurs **Ould Rebai (2017)**. Cette habileté traditionnelle purement locale est peu coûteuse (180.000DA/1ha) assure, entre autres, de belles récoltes de pommes de terre.



Figure 10: Pivot Artisanal de Oued Souf à Adrar. Source : Photos personnelles Adrar

I.2.5.4. Des freins multiformes

Selon **Otman (2010)**, l'environnement social et politico-économique, ainsi que les contraintes pédoclimatiques sahariennes ont joué en défaveur de l'ambition des aménageurs. Les sols exigent un apport indispensable en fertilisants (**Dubost, 2002**). L'énergie électrique pour le pompage de l'eau se trouve sur-tarifée, ainsi que le problème de surcoûts de transport entre le Sud et le Nord. Enfin, les équipements d'irrigation électro-mécanique nécessitent une technicité qui peut se traduire, en cas de panne, par une mise en péril de la récolte. Le tableau (6) suivant donne une idée du nombre total de pivots implantés et l'évolution des taux de pannes de ces derniers d'après le commissariat de développement agricole de régions sahariennes (CDARS).

Tableau 6 : Nombre total des pivots implantés et évolution des taux de pannes (CDARS)

Année	Pivots total	Pivots opérationnels	Pivots en pannes	Taux de panne
1986/87	4	4	0	0
1987/88	49	25	24	48,9
1988/89	69	38	31	44,9
1989/90	154	93	61	39,6
1990/91	190	114	76	40
1991/92	221	124	97	43,8
1992/93	273	176	97	35,5
1993/94	340	225	115	33,8
1994/95	357	213	144	40,3
1995/96	359	218	141	39,3
1996/97	377	197	180	47,7
1997/98	430	240	190	44,2
2000/2001	434	196	238	54,8
2001/2002	434	178	256	56
2002/2003	434	147	287	66,1
2003/2004	436	170	266	61

Ce constat de taux de panne publié par le CDARS peut expliquer la faiblesse des rendements moyens enregistré durant 14 campagnes (Tableau 7) dans la wilaya d'Adrar.

Tableau 7: Evolution des superficies et des productions des céréales irriguées sous pivots à Adrar (DSA Adrar, 2009)

Campagnes	Céréales sous pivots			Moy - q/ha
	ha	q	q/ha	
95/96	4655	129970	28	30
96/97	4173	132675	32	
97/98	3790	116130	31	
98/99	3240	101445	31	
99/00	3348	10524	31	
00/01	3588	106732	31	
01/02	3032	109283	36	
02/03	2061	67106	33	
03/04	2742	85288	31	
04/05	1196	38711	32	
05/06	1591	37722	24	
06/07	961	31138	33	
07/08	1010	23283	23	
08/09	1576	52384	32	

I.3. L'eau au Sahara - réserves et enjeux

L'exploitation du SASS dit « nappe albiénne » est très ancienne ; les affleurements de sables et de grès rouges attribués à l'Albien étaient connus par les oasis, c'est dans ces couches que se sont creusées les foggaras du Gourara-Touat-Tidikelt. Dès 1891, des forages furent réalisés dans les mêmes couches à El-Goléa, les sondages effectués à Zelfana en 1948, en atteignant le toit de la formation à 650 m, firent jaillir l'eau en surface, à un débit considérable, de plus de 300 l/s (**Dubost, 2002**).

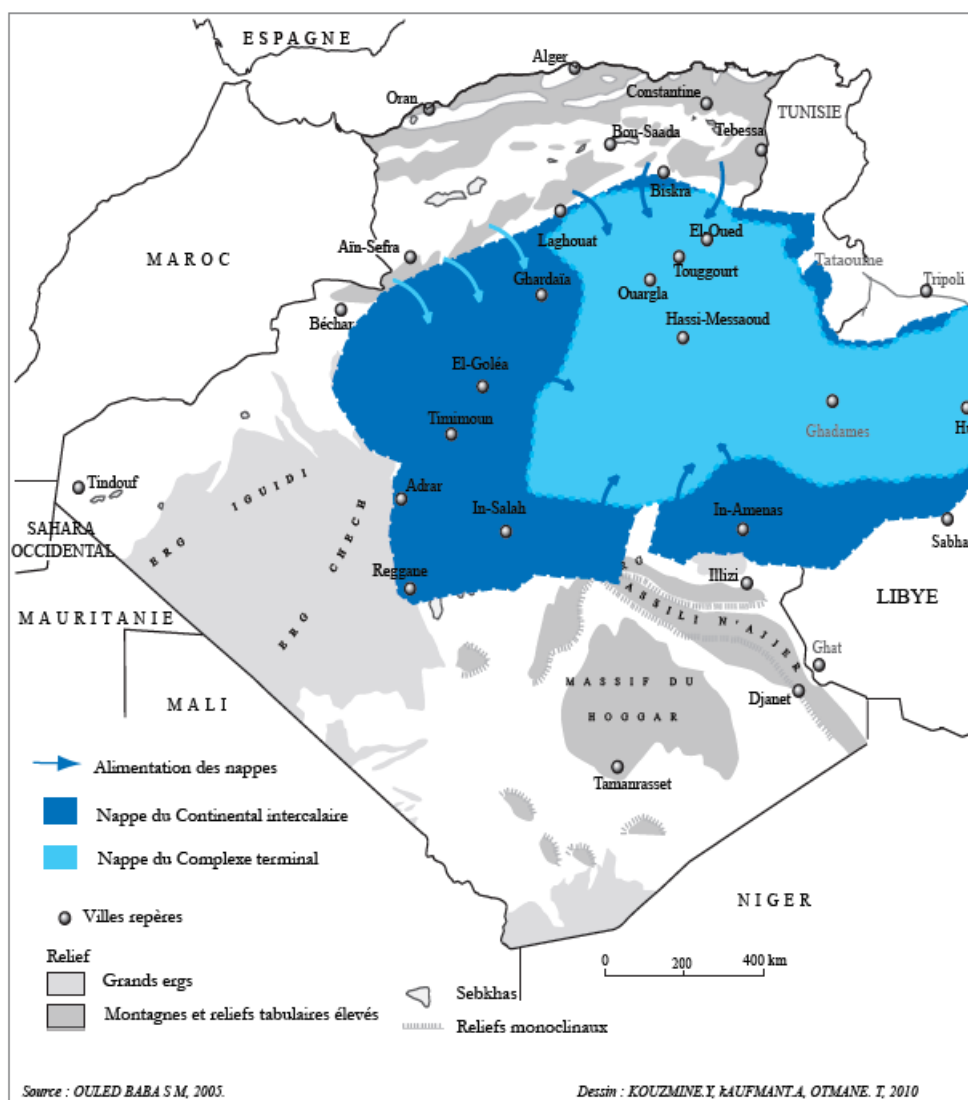


Figure 11: Les limites du Système Aquifère du Sahara septentrional

Le système aquifère du Sahara septentrional est composé de deux principaux aquifères : le Continental intercalaire et le Complexe terminal, couvrant la partie septentrionale du Sahara algérien, le sud de la Tunisie et se prolongeant dans le nord de la Libye (figure 11). Ce système occupe une superficie de 1.100.000 km² (Ould Baba, 2005). Les réserves théoriques des deux aquifères sont estimées à près de 60.000 milliards de m³. Il est à remarquer, que d'autres ressources en eau situées dans la périphérie du bassin du Sahara septentrional

(Biskra, Laghouat, Bechar, Hoggar et Tassili) sont également importantes et se caractérisent surtout par des nappes phréatiques.

I.3.1 Les nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT)

Constituent incontestablement la ressource la plus importante et relativement la mieux étudiée.

I.3.1.1 La nappe du Continental Intercalaire CI ou Albien

C'est un grand réservoir d'eau fossile qui s'étend sur une superficie globale de 840 000 Km² dont 600 000 Km² en Algérie (le reste en Tunisie et en Libye) plus de 1000 m de profondeur, 1 à 2 g/l de sels, chaude, 60°C). Le CI couvre les 2/3 du Sahara Septentrional avec une réserve de 40 000 Milliards de m³. Cette nappe est exploitée dans la wilaya d'Adrar et d'in Salah.

I.3.1.2. La nappe du Complexe Terminal CT

La nappe du Complexe Terminal (CT) se localise dans le Sahara occidental et s'étend sur une superficie de 350 000 Km² avec une profondeur oscillant entre 100 et 500 m. Ces eaux sont froides et généralement salées (de 3 à 8 gr/litre). Cette nappe est exploitée dans les Ziban, Oued Righ, Souf et Ouargla. Selon **Zenkri (2017)**, le modèle numérique du SASS (Système Aquifère du Sahara Septentrional) a permis de vérifier qu'il existe une possibilité de porter l'exploitation jusqu'à 6,1 milliards de m³ à l'horizon 2050. Actuellement, le volume global utilisé par l'agriculture est estimé à 3,384 Milliards de m³/an par le biais de 9676 forages, 36963 puits et 879 (foggaras et sources) à partir du Continental Intercalaire, du Complexe Terminal et autres nappes. La ressource en eau disponible et non exploitée est d'environ 2916 Milliards de m³/an sur le CI/CT. D'après **Benhamza (2013)**, le bassin SASS se subdivise en trois sous bassins : le bassin du Grand Erg Occidental à l'Ouest, le bassin du Grand Erg Oriental au centre et le plateau de la Hamada El Hamra à l'Est. La région d'étude fait partie du bassin du Grand l'Erg Occidental, qui englobe dans sa majeure partie la nappe du Continental Intercalaire (CI). Elle affleure tout le long de l'axe reliant Timimoun à In Salah, elle représente la partie à surface libre du SASS dans sa partie Sud-Ouest.

Les ressources en eau utilisées dans le domaine agricole Adrarien sont les foggaras au nombre de 918 et d'un débit total de 3680 l/s, les forages au nombre de 529 et d'un débit total de 9120 l/s et les puits au nombre de 4898 et d'un débit total de 9820 l/s. Ce bref aperçu montre que les forages, bien que leur nombre soit limité, ont un débit élevé. Par contre les foggaras sont la ressource en eau dont le débit par unité est le plus faible (0,25 L/s par foggara en moyenne) (**Nedjah et al., 2011**).

I.3.2. Le nombre de forages

La nappe du Continental Intercalaire atteint 566 forages en 2000. Cela correspond, pour la même année, à une exploitation totale de 340 Millions de m³/an, équivalent à un débit de 10,75 m³/s. Pour l'année 2005, le nombre total de puits a atteint 3355 puits. La capacité d'exploitation est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 8 : Capacité d'exploitation des eaux pour l'agriculture dans la wilaya d'Adrar (DSA d'Adrar, 2015).

Désignations	Nombre	Débit en m ³ /s	Nappe exploitée
Forage A.E.P	264	1,1803	C.I
Forage d'Irrigation	538	2,7337	C.I
Forage Industrie	32	0.135	C.I
Forage de Reconnaissance Pétrolier, Minier	67	-	C.I
Piézomètre	12	-	C.I
Foggara Pérenne	897	2,7926	C.I
Foggara Tarie	503	-	C.I
Puits Traditionnel	3355	1,1	C.I
Puits traditionnel TIMIAOUINE	110	0,01	Inferoflux

Conclusion

L'agriculture au Sahara est une réalité qui constitue l'avenir de l'Algérie, surtout avec la réduction des ressources hydriques et le problème foncier agricole au nord. Considérant les réserves d'eau importantes de la nappe du Continental intercalaire, des résultats obtenus par l'irrigation des céréales sous rampe-pivot dans d'autres pays et sous la pression sociale d'une demande alimentaire forte (notamment en céréales), le pouvoir algérien a mis en œuvre un vaste programme de mise en valeur agricole dans le Sahara, y effectuant de lourds investissements (**Otmane, 2010**). Les communes de la région ont attribué 64 423 ha aux paysans des oasis ainsi qu'à des entrepreneurs venus du Nord du pays. Les attributions, et les créations de nouveaux périmètres ont été plus conséquentes dans le Touat que dans le Gourara et le Tidikelt. En 2017 la DSA, affirme la création de nouveau périmètre à Mguiden (ferme Ennahda) avec ses 30 000 ha. Nonobstant, après trois décennies, les résultats n'apparaissent pas à la hauteur de l'investissement réalisé ; les effets conjugués des contraintes sociales, économiques et écologiques ont entravé le bon fonctionnement des exploitations. L'enquête réalisée dévoile, que la majorité des rampes pivotantes installées souffrent de leur répartition d'eau. Ceci se reflète directement sur les rendements qui ne dépassent pas une moyenne de 30 q/ha de blé. Ce dysfonctionnement entraîne en même temps une dissipation de l'énergie

électrique, et de fertilisants au niveau de certaines parties du pivot. Cela nécessite la correction des principaux défauts concernant l'efficacité d'application de l'eau à la parcelle par l'adoption de nouvelles technologies disponibles sur le marché. Précisons que le meilleur coefficient de sécurité est encore une bonne maintenance des installations, plutôt qu'une « gestion de l'urgence » face aux pannes. Cependant, la GMV a connu depuis 2010 une reprise du nombre de pivots fonctionnels dans tous les périmètres agricoles de la wilaya. La superficie réellement cultivée de GMV en 2005 a été inférieure à 3000 ha, elle est passée à 14000 ha en blé sous pivot selon la **DSA (2020)**.

La situation réelle sera bien exposée et cartographiée dans le chapitre matériel et méthode, en utilisant les images satellitaires. Depuis 2013, la culture de Maïs, qui est une culture d'été, a commencé à gagner plus de terrains car elle est préférée par de nombreux agriculteurs. Pour mieux amortir le pivot et rentabiliser l'activité agricole en générale, la culture du maïs est introduite dans la région comme production agricole complémentaire à la culture de blé. Pour cette culture, l'engagement de l'agriculteur est lié aux décideurs politiques à travers l'ONAB par la signature de contrat d'achat de la production. La revalorisation du prix d'achat des céréales par l'État en 2008 a permis une multiplication par trois de la superficie emblavée entre 2007 /2008, et 5 fois plus en 2020. Ce qui ouvre des perspectives réelles en vue d'une relance de l'activité agricole à l'avenir pour aboutir à l'autosuffisance en céréales. Le programme de GMV nécessite une révision profonde pour corriger les défaillances et les erreurs suscitées, plus particulièrement en termes de gaspillage d'eau et revoir la productivité de cette matière précieuse en termes de rendement.

Chapitre II

Géomatique, Système d'Information Géographique et Télédétection

Chapitre II: Géomatique, système d'information géographique et télédétection

La géomatique, dans sa signification lexicale, est «l'application de l'informatique à la géographie». Elle regroupe l'ensemble des outils et méthodes permettant de représenter, d'analyser et d'intégrer des données géographiques (Laurini *et al.* 1993). Elle se base sur au moins trois activités distinctes : la collecte des données géographiques, le traitement de ces données et la diffusion de celles-ci. Les principaux outils de la géomatique sont les trois systèmes (3S) : le SIG, la Télédétection (Remote Sensing RS) et le GPS.

II.1 Le système d'information géographique (SIG)

II.1.1. Définition

Selon Weng (2010), le SIG désigne un ensemble de logiciels intégrés, spécifiquement conçus pour être utilisés avec des données géographiques, qui comprennent à la fois les données spatiales et les données attributaires décrivant les caractéristiques géographiques. Il effectue une gamme complète de fonction de base comprenant la saisie, le stockage, l'extraction, la transformation et l'affichage (Figure 12).

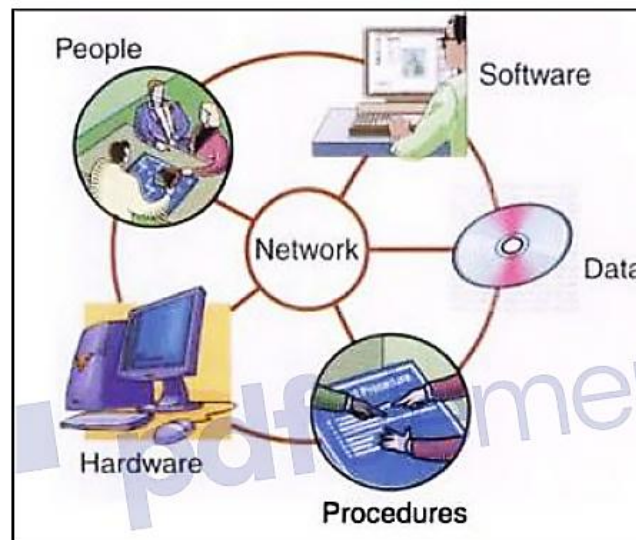


Figure 12 : Conception de SIG (Longley *et al.*, 2005).

II.1.2. Modes d'organisation des données géographiques

Le SIG organise les données géographiques en couches thématiques et en table. Les jeux de données géographiques d'un SIG étant géoréférencés et correspondent à des emplacements dans le monde réel et se superposent les unes aux autres.

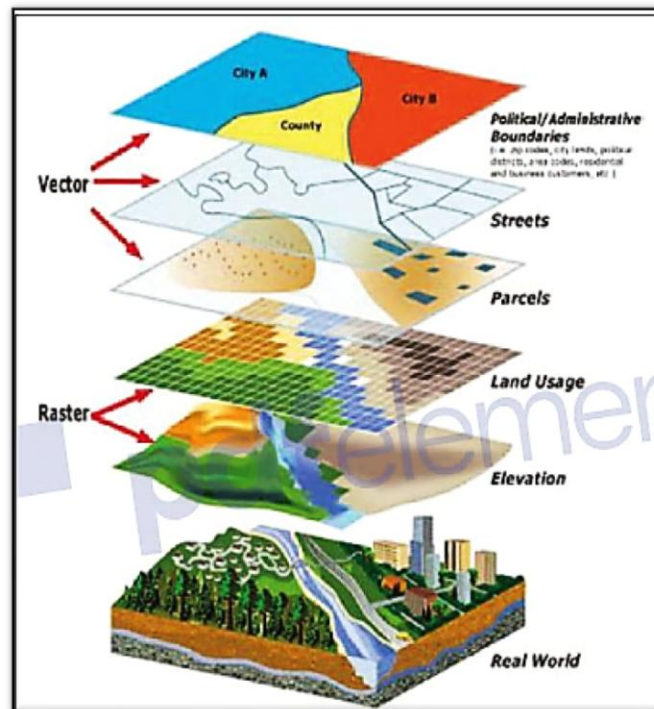


Figure 13 : Notion de couche en SIG (Khorram *et al.*, 2016)

II.1.3. Les données du Modèle Numérique d'Altitude (MNA)

La carte des pentes est obtenue après traitement du MNA à l'aide du SIG (Baccari *et al.*, 2005). Elle représente un paramètre important dans l'étude et la caractérisation de l'état de dégradation du sol. Une pente forte accélère le ruissellement, par conséquent, la vulnérabilité du sol à l'érosion augmente (Chikhaoui *et al.*, 2010).

II.2. Définition de la cartographie

La cartographie est une forme de communication et peut être vue comme une forme de langage spatial pour décrire les emplacements, discuter les lieux et interpréter les arrangements bidimensionnels des fonctionnalités (Bartels, 1998), elle a été également définie comme «la production y compris la conception, la compilation, la construction, la projection, la reproduction, l'utilisation et la distribution des cartes » (Tyner, 2010), la cartographie de nos jours est principalement menée en Systèmes d'Information Géographique (Ruas, 2011). Selon Brimicombe (2010), il y a deux types de cartes.

II.2.1. Carte topographique

Ces cartes sont un outil de référence, montrant les contours d'une sélection de caractéristiques naturelles et artificielles de la Terre, elles agissent souvent comme un cadre pour d'autres informations. La carte comporte une surface utile et un habillage.

II.2.2. Carte thématique

Ces cartes sont un outil pour communiquer des concepts géographiques tels que la distribution des espèces forestières, les cartes thématiques sont importantes en matière du SIG, elles nous permettent de choisir les combinaisons de couches, les intervalles de classe, les couleurs, les motifs et les symboles.). Elles sont présentées sous forme de quatre cartes thématiques : pentes, géologie, réseau hydrographique (**Baccari et al., 2005**).

II.2.3. Système de référence géographique et planimétrique en Algérie

Selon l'arrêté de 25 février 2003 de Journal officiel algérien N°30 fixe les systèmes de références des coordonnées géographiques, planimétriques et altimétriques relatifs au territoire national comme suit (tableau 9).

Tableau 9 : systèmes de références des coordonnées de l'Algérie

Zone	Système Géodésique	Ellipsoïde associé	Projection	Méridien origine
Territoire national	Nord Sahara	Clarke 1880	UTM Fuseaux 29,30,31 et 32	-9°; -3° ; +3° ; +9°
	WGS-84	IAG - GRS 80	UTM Fuseaux 29,30,31 et 32	-9°; -3° ; +3° ; +9°

Source : Journal officiel algérien N°30 -2003

II.2.4. Global Positioning System (GPS)

Un récepteur GPS (figure 14) est un appareil servant à calculer une position géographique à partir des signaux reçus des satellites GPS (Correia, 2012).

II.3. La télédétection

II.3.1. Définition

La télédétection en anglais « remote sensing » est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc. (Bonn *et al.*, 1992).

II.3.2. Principe de la télédétection

Les principales étapes (Figure 14) de la télédétection sont les suivantes:

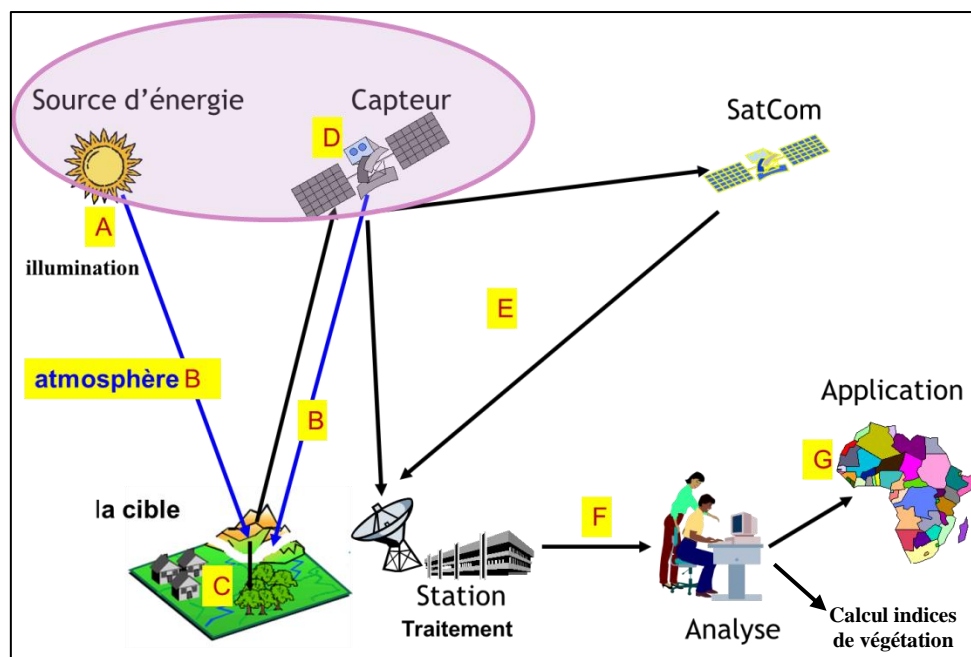


Figure 14: principe d'acquisition d'images

(A) Source d'énergie ou d'illumination : Tout processus de télédétection nécessite une source d'énergie pour illuminer la cible. (B) Rayonnement et atmosphère : Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur. (C) Interaction avec la cible: Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

(D) Enregistrement de l'énergie par le **capteur** : Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée. **(E)** Transmission, réception et **traitement** : L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques). **(F)** Interprétation et **analyse** : Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible. **(G) Application** : La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier (**Tébourbi, 2006**).

II.3.3. Les domaines d'application de la Télédétection

Atzberger et al. (2013) identifient quatre types d'applications différentes de la télédétection en agriculture : Estimation de la biomasse et du rendement, gestion de la vigueur de la végétation et des stress hydriques, évaluation du développement phénologique, et cartographie des parcelles et du changement d'occupation du sol.

L'agriculture est l'un des domaines d'application privilégié de la télédétection, et ce pour différentes raisons (**Baghdadi N, et al., 2016**):

- L'étendue des territoires concernés et la diversité des usages des sols et des pratiques qu'elle génère et qu'il est important de connaître, tant pour des objectifs de recensement (statistiques agricoles, suivi des mesures agro-environnementales) que pour la modélisation bio géophysique des agro-hydro systèmes dont ces usages et pratiques représentent des forçages.
- L'aspect hautement stratégique du suivi dynamique de l'état des cultures, de leur potentiel de production comme de leurs besoins en eau d'irrigation tant pour des objectifs de prévision, de sécurité alimentaire que de bonne gestion des ressources ; L'intérêt de l'aide au pilotage des opérations culturales en fonction de la variabilité intra-parcellaire (agriculture de précision) pour une meilleure efficacité, un usage parcimonieux des intrants et une agriculture respectueuse de l'environnement.

II.3.4. Les capteurs utilisés

a- Capteurs à détection passive

L'énergie du Soleil (Source d'énergie ou de rayonnement pratique pour la télédétection), est soit réfléchi (La portion visible) ou absorbée et retransmise (infrarouge thermique) par la cible. Les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie disponible

naturellement sont des capteurs passifs. Le capteur passif peut seulement percevoir l'énergie réfléchiée lorsque le Soleil illumine la Terre (Köhl et al., 2006). Le principal inconvénient de ce type de capteur est d'être inopérant si le ciel est sombre ou nuageux.

b- Capteurs à détection active

Dans le domaine des micro-ondes (Réflectif), l'énergie émise par la surface de la Terre est très faible, tout comme celle qu'elle peut réfléchir. L'instrument *radar* a son propre émetteur qui envoie des ondes électromagnétiques vers la surface observée. Les ondes interagissent avec la surface et sont diffusées dans toutes les directions. Une partie est renvoyée (rétrodiffusée) vers le radar et captée par son récepteur (Köhl et al., 2006)

II.3.5. Les grandes familles de satellites

a- Capteurs moyennes résolutions

Nous nous intéressons ici aux satellites d'orbites basses polaires (par opposition aux satellites géostationnaires). Ces satellites passent au-dessus du même point après un certain nombre d'orbites, ce qui définit la fréquence de revisite. Pour Landsat 8, elle est de 16 jours, et pour Sentinel2, elle est de 5 jours. Les propriétés comme la résolution au sol des images et le nombre de bandes spectrales est une propriété des capteurs embarqués. Pour Landsat8, le capteur OLI offre 11 bandes, avec des résolutions au sol de 30 m pour le visible et le "SWIR" (Short wave infrared) et de 100m pour les bandes dans l'infrarouge thermique et 15m pour la bande panchromatique. Pour Sentinel 2, les capteurs MSI fournissent des images hyperspectrales moyennes résolutions (13 bandes), avec différentes résolutions en fonction de la bande spectrale, soit 10 m, 20 m et 60 m. Le capteur Sentinel 2 a été lancé en 2015 afin de surveiller les paramètres de surface avec une fréquence d'environ une fois par jour sur une base globale à une résolution spatiale de 10 m. Il a 11 bandes ; bleu (0,430 à 0,470 μm), rouge (0,61 à 0,68 μm), NIR (0,78 à 0,89 μm) et SWIR (1,550 à 1,750 μm). Contrairement à Landsat 8, la résolution ne se dégrade pas avec un angle de vue croissant. (Garrouette et al., 2016 ; Combal et al., 2017 ; Li et Roy, 2017 ; Julia et al., 2018).

b- Capteurs à très haute résolution (Hyperspectraux)

Par rapport à l'imagerie multispectrale qui ne possède qu'une douzaine de bandes spectrales, l'imagerie hyperspectrale comprend des centaines de bandes spectrales. Les capteurs hyperspectraux conviennent bien aux études sur la végétation, car les signatures spectrales de réflectance /absorption d'espèces individuelles ainsi que des communautés de pixels mixtes plus complexes peuvent être mieux différenciées des bandes spectrales beaucoup plus larges de son imagerie (Yang et al., 2010).

II.3.6. Bases physiques de la télédétection

a- Le rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique est une forme de propagation de l'énergie dans la nature, dont la forme qui nous est la plus familière est la lumière visible telle que la perçoit l'œil humain (Kergormad, 2009).

b- Les ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique correspond à la vibration simultanée dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique (figure 15) c'est une onde progressive et transversale. Le sens de la variation des champs est perpendiculaire à la direction de propagation (Kergormad, 2009).

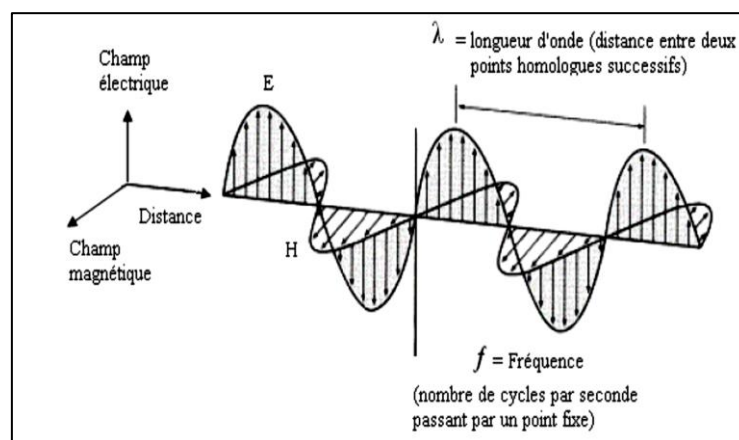


Figure 15 : Représentation schématique d'une onde électromagnétique tirée de (Bonn et Rochon, 1992).

Le rayonnement électromagnétique se caractérise par la période qui est le temps (T) pendant lequel l'onde effectue une oscillation complète, la fréquence est l'inverse de la période (1/T), c'est l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique qui est détectée par les capteurs utilisés en télédétection (Kergormad, 2009). Tout rayonnement (figure 16), affectant une matière donnée, est absorbé, réfléchi ou transmis de façon à répondre à la relation :

$$\alpha + \tau + \rho = 1. \text{ Où :}$$

α = Absorption ;

τ = Transmission ;

ρ = Réflexion.

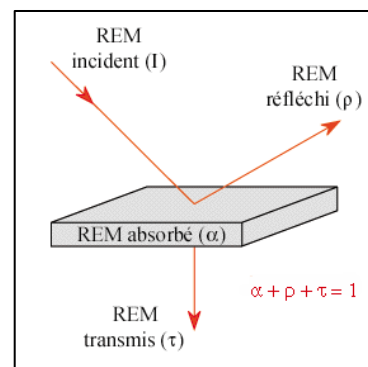


Figure 16 : Interactions du rayonnement électromagnétique avec la matière « absorption, réflexion, transmission » (Bonn et Rochon, 1992)

c- Le spectre électromagnétique

D'après **Weng (2010)**, tout le Rayonnement Electromagnétique (REM) peut être décomposé en ondes sinusoïdales élémentaires qu'on appelle composantes spectrales du rayonnement. Les longueurs d'onde sont données par la figure suivante (figure 17).

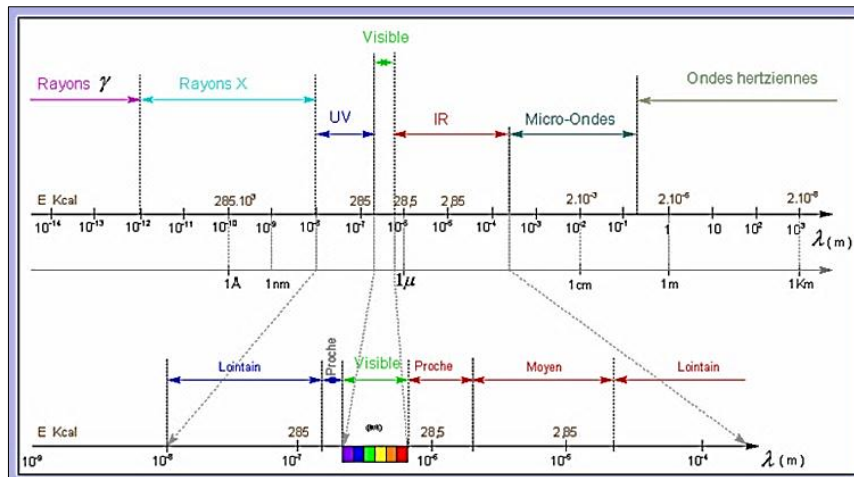


Figure 17 : Spectre électromagnétique (Moquet, 2003).

II.3.7. Signatures spectrales de la végétation

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 17, et selon **Moquet (2003)**, la végétation, en général, possède une réflectance très faible dans le rouge (~660nm) et le bleu (~450nm), faible dans le vert (~546nm) et élevée dans le proche infrarouge (0,7-1 μm). Ces valeurs peuvent varier en fonction de la teneur en eau de la plante, de la structure des feuilles, de leur densité et de l'âge (**Guyot, 1984**).

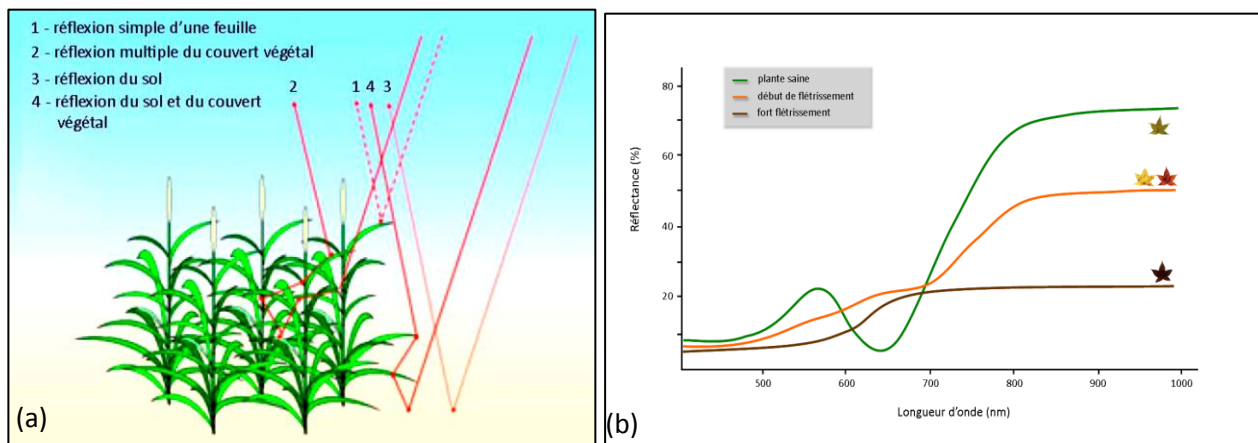


Figure 18 : a- Illustration des interactions entre le sol et la végétation, intégrées au niveau de la mesure satellitaire (Fensholt, 2003). b- Variations de la signature spectrale en fonction de l'état physiologique de la végétation (UVED, 2008)

L'identification et le suivi des couverts végétaux repose sur la réponse spectrale des surfaces dans les différentes longueurs d'onde et donc sur la notion de signature spectrale. Lorsque la végétation est peu couvrante (figure 18), la réponse spectrale des plantes est affectée par la réflectance des sols. Le signal mesuré par le capteur intègre généralement les réflectances du sol et de la végétation (Huete, 1989).

Les caractéristiques spectrales d'une végétation saine se distinguent par une faible réflectance en bleu, élevée en vert, très faible en rouge et très élevée dans le NIR (Chen *et al.*, 2010 ; Genc *et al.*, 2013). Il existe une grande différence dans les caractéristiques spectrales entre le sol et la culture, en particulier au niveau du «bord rouge/red edge» qui est le point où le spectre électromagnétique passe du visible au NIR (longueur d'onde d'environ 700 nm) (figure 19). Cette région est utilisée pour détecter les paramètres biochimiques et biophysiques dans les cultures, ce qui est utile dans les études de végétation. Le principe est que la majorité de la lumière rouge est absorbée par la chlorophylle dans la canopée tandis qu'une forte proportion de la lumière NIR est réfléchi (Ramoelo *et al.*, 2012). La verdure (teneur en chlorophylle) de la canopée est liée au pourcentage de réflectance rouge absorbé et au pourcentage de réflectance NIR réfléchi (Lillesand *et al.*, 2008).

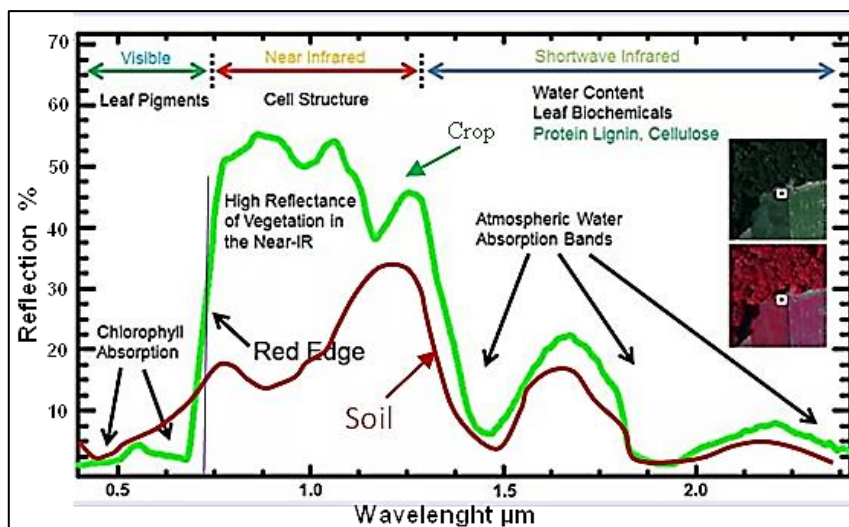


Figure 19: Courbes de réflectance spectrale pour le sol et la culture (végétation verte) selon Scotford & Miller (2005).

II.3.8. La structure cellulaire des feuilles

La surface principale du couvert végétal du maïs est constituée de feuilles où se produisent des échanges d'énergie et de gaz. L'influence des propriétés biophysiques et biochimiques sur les propriétés de réflectance des plantes (figure 20) aide à définir les trois domaines spectraux distinguables (visible, proche infrarouge [NIR] et moyen infrarouge). Les longueurs d'onde bleue et rouge sont absorbées par la chlorophylle, les vertes sont très faiblement réfléchies par la feuille, le rayonnement PIR est fortement réfléchi par le parenchyme lacuneux (Jensen, 2000).

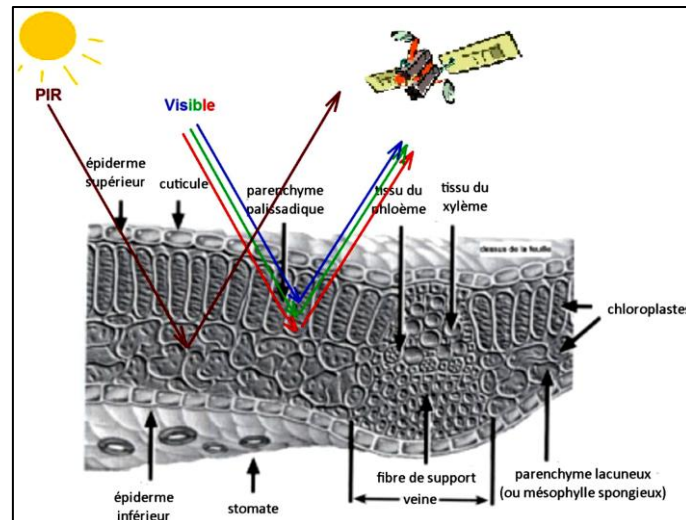


Figure 20 : Influence de la structure cellulaire des feuilles sur leur signature spectrale.
D'après Jensen (2000)

II.3.9. Notion de l'image satellite

D'après **Habert (2002) in Derouche, (2006)** l'image satellite est une image numérique représentant les mesures d'un rayonnement réfléchi ou émis par la surface terrestre. Les images sont caractérisées par la partie du spectre électromagnétique utilisée (visible, infrarouge, ondes radar), la résolution du sol, c'est-à-dire la taille du plus petit élément ou échantillon sur le terrain, la répétitivité de l'observation qui est un des grands avantages de l'observation par satellite. Cette dernière peut fournir des séries temporelles d'images de la même zone dans des conditions d'observation assez identiques.

II.3.10. Techniques de classification de l'image

Pour classer les images de télédétection, plusieurs approches sont disponibles (**Lassieur, 2006**). On se limite à la classification basée sur des pixels individuels qui peut être supervisée ou non supervisée. Des échantillons de terrains sont utilisés pour estimer et identifier les caractéristiques spectrales de chaque classe. La classification peut être réalisée avec de nombreux logiciels d'analyse d'images comme Arcgis, Qgis, Erdas et ENVI.

a. Classification non-supervisée

Les données sont classées en fonction de leurs caractéristiques spectrales, sans aucune information a priori sur la nature des objets à classer. L'interprète intervient pour fixer un nombre de groupes et des seuils. Les méthodes les plus courantes sont des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ou des classifications à partir de centres mobiles (**Girard & Girard, 1999**). Le principe de la classification non-supervisée est d'attribuer automatiquement chaque pixel à une classe suivant sa signature spectrale.

b. Classification supervisée

Les données sont classées vis à vis d'objets de référence, choisis par l'interprète. (Girard & Girard, 1999).

La *première étape* dans la réalisation d'une classification supervisée est d'allouer pour chacune des classes, des échantillons représentatifs qui peuvent être identifiés sur l'image. (Appelés échantillons de terrain ou parcelles d'entraînement). Ensuite, des polygones sont digitalisés autour de ces exemples et assignés à une classe.

La *seconde étape* est l'analyse de ces pixels à l'intérieur de l'échantillon de terrain. Des fichiers de signatures contenant des informations statistiques sur la réflectance de ces pixels à l'intérieur des classes sont créés. Ensuite, le classifieur compare chaque pixel avec les signatures et les alloue à la classe la plus proche suivant une certaine méthode statistique.

II.4. Indices de végétation (VIs)

Dans la plupart des études agricoles, les valeurs de réflectance spectrale d'au moins deux bandes de longueurs d'onde (de chaque côté du «bord rouge») sont mesurées pour permettre le calcul d'un rapport. Ces ratios sont connus sous le nom VIs et beaucoup ont été développés au fil des ans. L'approche de télédétection consistant à utiliser des mesures d'indices de végétation (IV) repose sur le fait que la réflectance de la végétation fournit une mesure de la quantité et de l'état de verdure qui est appliquée, ce qui est un indicateur utilisé pour estimer le rendement (Duncan *et al.*, 2015). Mirik *et al.* (2012) ont également décrit les indices de végétation spectrale comme des expressions mathématiques qui impliquent des valeurs de réflectance provenant de différentes parties du spectre électromagnétique. Cet outil, mathématique, permet de calculer des indices spectraux de la forme $ND(V, W, S) = \frac{I - S}{I + S}$ par le modèle $(B1-B2)/(B1+B2)$.

Des indices plus complexes peuvent être calculés à l'aide du raster calculator en utilisant des logiciels spécialisés comme Qgis, Arcgis ou Erdas.

II.4.1. Définition de l'indice de végétation par différence normalisée NDVI

Par définition le NDVI, utilisé pour mesurer la biomasse verte (Tucker, 1979), le degré de verdure représente la concentration de chlorophylle, il mesure réellement le rayonnement photo-synthétique actif absorbé par le couvert végétal (Sellers, 1985). Les valeurs NDVI varient avec l'absorption de la lumière rouge par la chlorophylle de la plante et la réflexion du rayonnement infrarouge par les cellules foliaires remplies d'eau. Sa valeur numérique varie de -1 à 1. Lorsqu'il est proche de 1, il indique la présence de végétation avec une forte activité chlorophyllienne et une forte densité et lorsqu'il est proche de 0 il indique

l'absence de feuilles vertes ou végétation peu dense. Il permet aussi d'évaluer l'importance de la biomasse et de suivre l'activité chlorophyllienne (Tucker *et al.*, 1981).

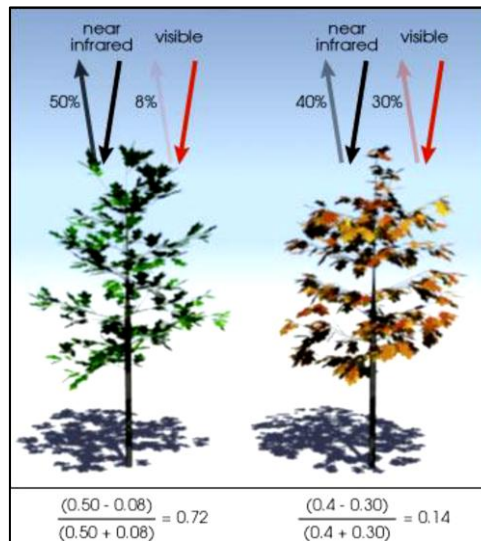


Figure 21 : Variation de NDVI en fonction de la santé de la végétation (Robert Simmon, NASA GSFC in Denis A., 2020).

Une plante (Figure 21) saine (à gauche) absorbe beaucoup de lumière visible et réfléchit une grande partie de la lumière proche infrarouge. La végétation malade ou clairsemée (à droite) absorbe plus de lumière visible et réfléchit moins la lumière proche infrarouge.

II.4.2. Les indices relatifs aux effets conjugués des sols et de l'atmosphère

Liu et Huete (1995) ont proposé l'indice de végétation amélioré EVI (Enhanced Vegetation Index) pour optimiser le signal de végétation. La formule de l'EVI a montré une aptitude prédictive élevée dans l'estimation du rendement du maïs par rapport aux autres indices testés (NDVI et SAVI) (Wang., 2014; Zhang *et al.*, 2014). De par son utilisation de la bande bleue, l'EVI fournit, évidemment, une correction atmosphérique nettement avantageuse comparativement à l'NDVI (Bolton *et al.*, 2013 ; Justice *et al.*, 1998; Huete *et al.*, 1999). Il a été ainsi proposé comme indicateur plus robuste de la qualité et de la biomasse fourragère (Garrouette *et al.*, 2016). L'EVI offre une plus grande plage dynamique que l'NDVI (Huete *et al.*, 2002).

$$EVI = G \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + C_1 \rho_R - C_2 \rho_B + L} \quad (02)$$

où :

$G = 2,5$: facteur de gain

$L = 1$: facteur d'ajustement des sols

$C_1 = 6$ et $C_2 = 7,5$: coefficients de correction de la diffusion atmosphérique.

II.4.3. Indices de végétation (IV) relatif à l'effet du sol sur la réflectance de la végétation

Ces indices supposent une relation linéaire entre le proche infrarouge et la réflectance visible du sol nu. Ces IVs donnent de meilleurs résultats que le NDVI avec une faible couverture végétale car ils éliminent l'effet de fond du sol (de Wit et Boogaard, 2001 ; Huete 1988, Qi *et al.*, 1994).

Tableau 10: Principaux indices de végétation définis à partir de données de télédétection

Les indices simples	
$DVI = \rho_{PIR} - \rho_R$	Bacour <i>et al.</i> (2006)
$RVI = \frac{\rho_{PIR}}{\rho_R}$	Krieger <i>et al.</i> (1969) ; Jordan (1969)
$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$	Rouse and Haas (1973) ; Tucker (1979)
Les indices de stress hydrique	
$MSI = \frac{\rho_{MIR}}{\rho_{PIR}}$	Hunt and Rock (1989)
$NDWI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_{MIR}}{\rho_{PIR} + \rho_{MIR}}$	Gao (1996)
Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère	
$ARVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_{tb}}{\rho_{PIR} + \rho_{tb}}$	Kaufman and Tanré (1992)
$GEMI = \eta (1 - 0.25\eta) - \frac{\rho_{rouge} - 0.25}{1 - \rho_{rouge}}$	Pinty et Verstraete (1992)
Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère	
$EVI = G \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + C_1 \rho_R - C_2 \rho_B + L}$	Huete <i>et al.</i> (1999)
Les indices prenant en compte les températures de surface	
$T DVI = \frac{T_S - T_{S(min)}}{a + b NDVI - T_{S(min)}}$	Sandholt <i>et al.</i> (2002)

Source : Caloz et Puech, 1996; Gilabert *et al.*, 2002.

II.4.4. Relations entre les indices de végétation et les paramètres biophysiques

Afin d'estimer un ou plusieurs paramètres biophysiques pour en générer une carte, les meilleures corrélations entre les mesures de terrain et les indices de végétation peuvent être sélectionnées. Des régressions linéaires simples, non linéaires simples et non linéaires multiples peuvent également être testées (Jayanthi *et al.*, 2007).

II.4.5. Relations entre indices de végétation et indices phénologiques

Ces indices sont issus du produit MODIS Land Cover Dynamics V005 (MCD12Q2 ou « Land Cover Dynamics Yearly L3 Global 500 m » qui synthétise en 7 variables la phénologie d'un couvert végétal (Vintrou, 2012), (figure 22) selon l'ordre suivant :

- Le premier indice décrit la date de démarrage de la croissance de la plante
- Le second indice correspond à la date de maturité,
- Le troisième indice porte sur la date de début de la sénescence,
- L'indice 4 concerne la date d'entrée en dormance, c'est-à-dire de fin de cycle.
- Les indices 5 et 6 correspondent, respectivement, aux valeurs de l'indice de végétation à la date de démarrage et de maturité
- Et enfin le septième indice qui est l'intégrale de l'indice de végétation durant la saison de croissance.

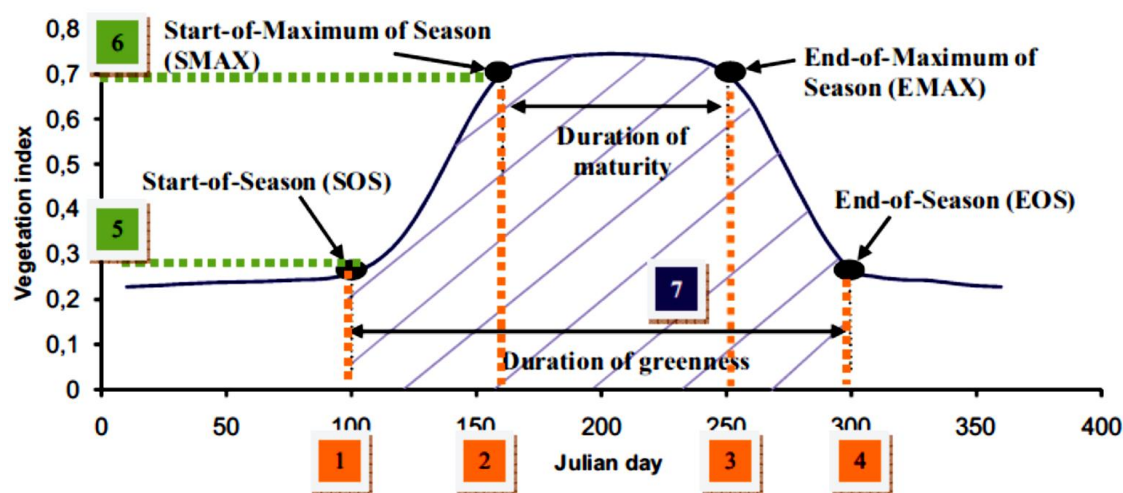


Figure 22 : Indicateurs phénologiques issus du produit MOD12Q2. 1. Date de démarrage de la saison (Start-of-Season) ; 2. Date de maturité (Start-of-Maximum of Season) ; 3. Date de sénescence (End-of-Maximum of Season) ; 4. Date du minimum de la saison (End-of-Season) ; 5. et 6. Valeur de l'indice de végétation pour les dates du minimum et du maximum ; 7. Intégrale de l'indice de végétation durant la saison de croissance. (Source : Zhang et al., 2003, adapté par Vintrou, 2012).

II.5. Méthodes de l'estimation du rendement

Il existe plusieurs méthodes de prévision du rendement, allant des relevés terrestres traditionnels aux techniques de télédétection plus avancées (**Rembold et al., 2013**).

II.5.1. Méthodes classiques (directes)

D'après **Chivasa (2017)**, les données de rendement sur les cultures de base comme le maïs, dans le continent africain, ont rarement été collectées en utilisant des méthodes de télédétection plus avancées. Très souvent, partout où les données sont collectées, d'anciennes méthodes conventionnelles traditionnelles d'enquête au sol sont utilisées sur les techniques d'échantillonnage minimales. **Burke et Lobell (2017)** estiment que les résultats des enquêtes sur le terrain sont difficiles à mettre à l'échelle sur de vastes zones. Les méthodes d'enquête au sol nécessitent beaucoup de main-d'œuvre et sont coûteuses, contiennent des erreurs et impliquent des méthodes incohérentes. Le temps requis pour terminer les levés au sol est

généralement long. La couverture de l'enquête de certains sites est pratiquement impossible en raison de l'inaccessibilité. Par conséquent, une production importante, dans certaines zones, peut être négligée.

II.5.2. Méthodes par télédétection spatiale : atouts et contraintes

A la différence des techniques dites conventionnelles (classiques), les données de télédétection par satellite sont applicables sur de plus grandes zones et peuvent donc surveiller les cultures à l'échelle mondiale, régionale ou locale, fournissant une couverture, une cartographie, une classification et des prévisions de rendement importantes (**Wójtowicz et al., 2016**). Cependant, les capteurs à distance des satellites sont affectés par les conditions météorologiques (Stafford 2000), le bruit atmosphérique et l'obtention de données à partir de ceux-ci peuvent être coûteux. L'obtention de prévisions de rendement précises dans des paysages agricoles hétérogènes à l'aide de données télédétectées par satellite dépend de la résolution des capteurs et d'autres facteurs exogènes (**Chivasa, 2017**).

Malgré la période de révision de Landsat 8 OLI qui est peu longue (16 jours) et qui limite considérablement le nombre d'observations au cours d'une saison de croissance typique, en particulier lors de la prise en compte de la probabilité de présence de nuages, ce qui limiterait la détection réussie (**Johnson 2014**), les estimations de rendement se sont avérées assez précises dans les systèmes de culture homogènes (**Lobell et al., 2005 ; Gitelson et al., 2012**) et peuvent être appropriées aux périmètres agricoles du grand sud Algérien. De plus, les étapes phénologiques du maïs peuvent être facilement capturées par la révision de 16 jours.

La disponibilité de données gratuites de Sentinel 2 aide à l'application de la télédétection dans des paysages agricoles hétérogènes (**Belward et Skøien, 2015**). Les capteurs multispectraux des séries Sentinel2 et Landsat8 offrent une option vraisemblable. Un pixel correspondant à un certain type de couverture (forêt, sol nus, eau, couvert agricole, zone construite... Les valeurs pour Landsat8 sont les mêmes que pour Sentinel-2 (**Combal et al., 2018**).

II.5.3. Modèles de prévision de rendement

a. Modèles conventionnels - conditions et limites d'application

Dans de nombreux pays, l'estimation du rendement des cultures se base sur les techniques conventionnelles dépendant de la collecte de données sur les récoltes, à partir des visites ou de rapports sur terrain. De tels rapports sont souvent subjectifs, coûteux, prennent du temps et sont sujets à de grosses erreurs dues à des observations de terrain incomplètes, conduisant à une mauvaise évaluation du rendement et des estimations de la superficie

cultivée (**Reynolds et al., 2000**). Dans la plupart des pays, les données sont disponibles trop tard pour que des mesures appropriées soient prises pour éviter les pénuries alimentaires.

b. Approche basée sur les données météorologiques

Dans certains pays, les données météorologiques sont également utilisées et des modèles basés sur les paramètres météorologiques ont été développés. Cette approche est associée à un certain nombre de problèmes, notamment la distribution spatiale de la station météorologique, les données météorologiques ponctuelles incomplètes et/ou non disponibles sur les vastes zones de culture (**de Wit et Boogaard, 2001**).

c. Modèles empiriques

De nombreux modèles empiriques ont été développés pour essayer d'estimer le rendement avant la récolte. Cependant, la plupart des méthodes exigent des données qui ne sont pas facilement disponibles. La complexité des modèles, leur demande en données et leurs méthodes d'analyse rendent ces modèles peu pratiques, notamment au niveau du terrain.

d. Modèles basés sur la télédétection - Caractéristiques et atouts en agriculture

Grâce au développement des satellites, les images de télédétection fournissent un accès aux informations spatiales à l'échelle mondiale, presque en temps réel, sur les caractéristiques et les phénomènes sur la terre. D'après **Mohd et al. (1994)**, les satellites ont le potentiel, non seulement, d'identifier les classes de cultures mais également d'estimer le rendement des cultures. Selon **Schuler (2002)**, ils peuvent identifier et fournir des informations sur la variabilité spatiale et permettre plus d'efficacité dans la prospection sur le terrain. Ce principe de la télédétection végétale consiste à faire correspondre les caractéristiques biophysiques de la végétation étudiée avec ses propriétés optiques (**Pinter et al., 2003**).

Dans la littérature scientifique, plusieurs voies ont été proposées pour l'estimation du rendement et de la biomasse. Pour **Rembold et al. (2013)**, cette estimation est généralement effectuée par régression simple ou par des modèles complexes à partir d'indices de végétation issus de l'imagerie. **Jensen et al. (2007)** montrent qu'il est possible d'estimer le rendement du blé (*Triticum* sp.) grâce à une régression linéaire simple tout en obtenant une forte corrélation avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,91 à partir de l'indice de végétation DVI (Difference Vegetation Index) **Tucker (1979)**.

Prasad et al. (2006) ont combiné le NDVI, l'indice de l'état de la végétation (VCI) et l'indice de l'état de la température (TCI) de NOAA/AVHRR comme variables d'entrée dans leur modèle de prévision du rendement du maïs en utilisant une méthode de régression

linéaire par bloc. Et ont trouvé une bonne corrélation positive ($R = 0,78$) entre le rendement du maïs et les VIs dans l'Iowa, aux États-Unis.

Par ailleurs, une limitation essentielle à l'utilisation de la régression rendement / IV a été relevée. Elle réside, dans le fait que la plupart des études citées ci-dessus ont été réalisées dans une région donnée et ils peuvent ne pas être largement applicables dans d'autres zones géographiques, où le climat est différent. Dans la plupart des cas, les études étaient également limitées par les données disponibles provenant de capteurs à basse résolution obtenus à partir de systèmes de culture assez homogènes (**Chivasa et al., 2017**).

II.6. La télédétection en Algérie

Plusieurs travaux scientifiques (articles, mémoires et thèses) ont été réalisés en Algérie et dont la majorité ont été orientés à la cartographie du couvert végétal et l'estimation de la biomasse. L'étude la plus ancienne, dans ce domaine, revient à **Guérif et al., en 1993** et a porté sur l'estimation de la production de céréales en conditions semi-arides, sur de vastes territoires en Algérie, en utilisant les données du capteur NOAA-AVHRR, dans les domaines optique (NDVI) et thermique (température de surface). Parmi les études ayant eu une portée importante, nous citons celle de **Gueriniaï (2012)** qui a été menée au niveau du sous bassin versant d'Oued El-Hadjia- Djelfa et qui a été consacrée à la détection des changements de l'occupation du sol, sur une période de 22 ans (1987 et 2009). Cette étude a été effectuée à partir des données satellitaires multitudes de Landsat. Un autre travail sur le parc national d'El Kala (PNEK) de la région d'El Taref (Nord-Est algérien) a été réalisé par **Khaznadar (2016)** pour déterminer certains Services Ecosystémiques fournis par le parc et les évaluer grâce à un modèle matriciel et enfin cartographier leur distribution spatiale par l'outil SIG. L'auteur a utilisé des images satellites de 2002 et 2013 pour mesurer l'impact des changements qui ont touché l'occupation du sol dans le parc. Il a été estimé que les techniques de classification et de détection des changements de l'NDVI ont été efficaces pour l'analyse spatio-temporelle des changements de l'occupation du sol qui ont affecté le PNEK. Selon **Maselli (2001)**, les analyses des données mensuelles NDVI pour l'estimation précoce du rendement des cultures céréalières dans les pays d'Afrique méditerranéenne le Maroc, l'Algérie et la Tunisie ont montré qu'il existait des corrélations relativement élevées entre le rendement des cultures et les valeurs NDVI moyennes de mois spécifiques calculées au niveau national.

Partie II

Matériels et Méthodes

Chapitre III

Matériels

III.1. Le cadre géographique et administratif de la zone d'étude

La wilaya d'Adrar (427.368 km²) est située dans le Sud-Ouest de l'Algérie et représente 17,97 % du territoire national. Elle est composée de 28 communes regroupées en 11 Daïrates. Elle s'étend selon les coordonnées géographiques entre les longitudes 0°30' Est et 0°30' à l'Ouest et entre les latitudes 26°30' et 28°30' au Nord. Elle est limitée géomorphologiquement au Nord par le Grand Erg Occidental, au Sud par le plateau de Tanezrouft, à l'Est par le plateau de Tademaït et à l'Ouest par l'Erg Chech. Elle est répartie entre trois régions sahariennes naturelles représentées par :

- Le Gourara : Son centre administratif est la daïra de Timimoune, cette région regroupe toute les palmeraies et les Ksours .
- Le Touat, Elle se prolonge du Brinkane jusqu'à Reggane; c'est la plus vaste région, et la plus intéressante, car elle contient un grand nombre d'exploitation de mise en valeur cultivant la céréaliculture sous pivot.
- Le Tidikelt, cette région elle se prolonge d'Aoulef à Ain Salah (wilaya de Tamanrasset) qui est le centre de la région figure 26.

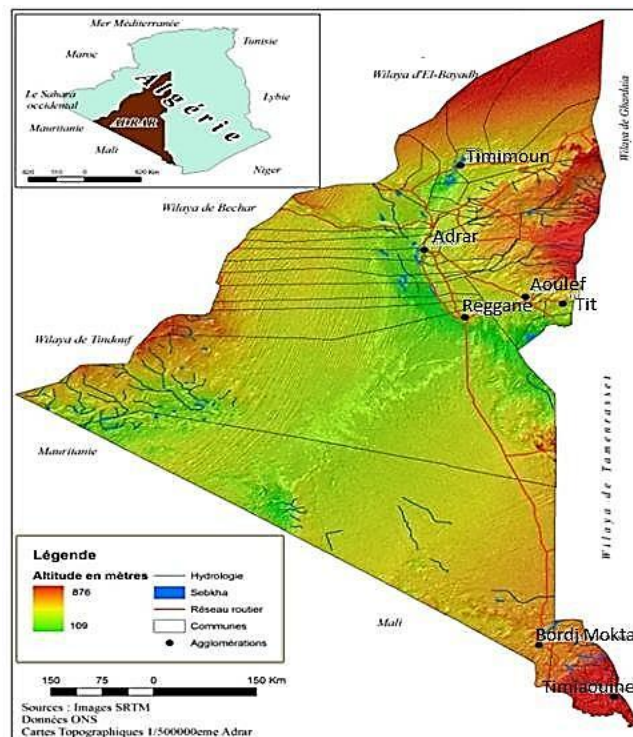


Figure 23 : découpage administratif de la région d'étude

III.2. Aspect géomorphologique et topographique

La wilaya d'Adrar se caractérise par un relief d'aspect désertique, qui se subdivise en trois grands ensembles géomorphologiques (Khalladi, 2007) :

- Les plateaux couvrent de très grandes surfaces. Ils sont constitués de formations géologiques différentes (Crétacé inférieur continental intercalaire et crétacé supérieur secondaire marin).
- Les ergs, ce sont des massifs dunaires s'étendant sur près de la moitié de la wilaya. Ils sont formés au cours du quaternaire tels que le grand erg occidental et l'erg-echech et les sebkhas.

Les conditions climatiques y sont dures avec des écarts de température considérables. La température est maximale en été (plus de 45°C) et donne lieu à un froid glacial en hiver (atteignant parfois les 0°C). Rareté des pluies, ensoleillement intense, forte évaporation, siccité de l'air, vents de sable (vitesse moyenne 5,8 m/s). Les sols sont formés généralement d'aires constituées de couches sédimentaires superficielles dont la fertilité et le pouvoir de rétention en eau et en éléments fertilisants est faible et dont les horizons de surface sont très sensibles à l'érosion éolienne. La formation et l'évolution de ces sols restent conditionnées par le climat et la salinité. Sans mise en valeur, sans apports fréquents d'éléments fertilisants et surtout sans irrigation, il n'est donc point possible de produire dans une telle zone (Sahli, 1997).

III.3. Morphologie et topographie

L'analyse des M.N.T (Model Numérique de Terrain) et les D.E.M (Digital Élévation Model) permettent de voir clairement les formes morphologiques du relief de la zone d'étude, l'altitude par rapport au niveau de la mer de la zone d'étude est de l'ordre de 150 à 200 m au niveau de la dépression, de 200 à 300 m au niveau du Reg et de 350 à 800 m au niveau du plateau de Tademaït (figure 24).

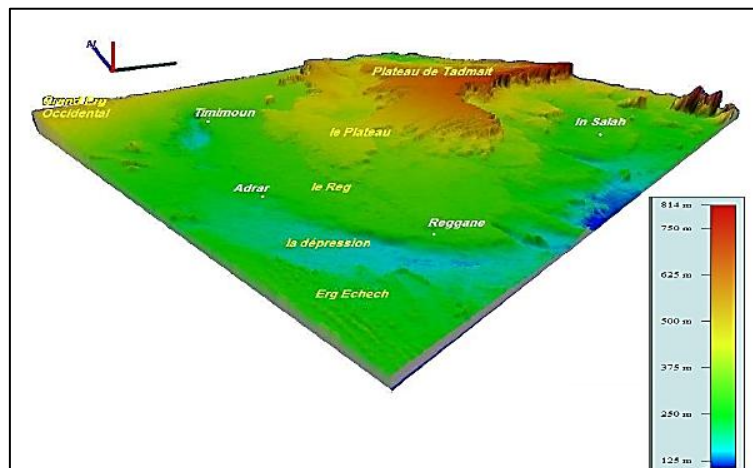


Figure 24 : Traits morphologiques en 3D de la zone d'étude (Benhamza, 2013)

III.4. Population

La population totale de la wilaya d'Adrar est de 439 693 habitants avec une densité de 1,1 personne/km² (ONS, 2015), La population du Chef-lieu de Wilaya ne représente que 16 %. Selon Sahli (1997), la zone d'Adrar est l'une des zones à fortes potentialités agricoles puisqu'il s'y exprime l'essentiel des activités agricoles familiales (palmier-dattier, maraîchage, cultures condimentaires, fourrages, céréales ...).

III.5. Les périmètres agricoles de grande mise en Valeur (GMV)

Dans la région d'étude, la GMV agricole a concerné 08 communes ; elle a été mise en place sur huit périmètres qui couvrent 89986 ha (figure 25). Selon **Bouazghi (2017)**, suite à la création d'un nouveau périmètre de 30000 ha le Gourara vient en tête avec 46,78% de la superficie totale attribuée, il possède les périmètres de Mguiden à Timimoun et Zaouiet Sidi Abdellah à Aougrouit. Le Touat vient en deuxième place il occupe le Tiers soit 30,04% de superficie totale attribuée et possède les zones les plus importantes de la GMV agricole : Sbaa et Adrar au nord, Baamar au centre, et Stah Azzi et Aïn El Feth au sud. Dans le Tidikelt un seul périmètre, Med Boudiaf, était étudié qui représente 2,25% de superficie totale attribuée. Selon **Otmane (2010)**, l'ensemble des périmètres juxtapose des exploitations agricoles de tailles très variables, allant de 50 à 5000 hectares, destinées principalement à la production céréalière sous pivots.

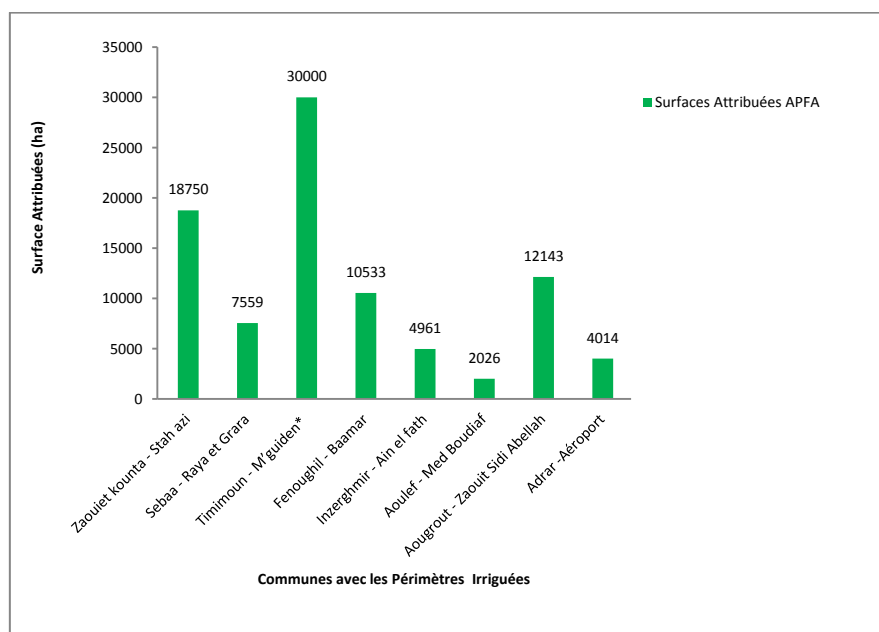


Figure 25 : Superficie totale attribuée dans le cadre du programme d'accèsion à la propriété foncière agricole (APFA)

III.6. Le contexte régional

III.6.1 Climat

Les zones arides sont des régions où les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration au moins durant une période plus ou moins longue de l'année (**Robert, 1996**). D'après **Emberger (1971)**, Ces régions occupent environ 1/3 de la surface terrestre. En Algérie, les zones arides représentent près de 95% du territoire national dont 80 % dans le domaine hyperaride (**Halitim, 1988**). Parmi les principales caractéristiques de ce type de zone c'est son étendu très vaste à travers le monde et notamment en Algérie. Le Sahara algérien qui couvre une superficie de l'ordre de 2 millions de km², entre les 18° et 35° de latitude Nord et constitue un désert parmi les plus arides et les plus chauds du globe. Le climat, de par son caractère hyperaride, constitue à la fois le principal facteur de la pédogenèse et un facteur limitant pour le développement des cultures. L'absence de précipitations, les températures extrêmement élevées et les vents violents contribuent à de très fortes évapotranspirations et contraignent la mise en valeur agricole. Les principaux éléments du climat saharien sont décrits à partir des données météorologiques recueillies dans la station d'Adrar situé dans la station expérimentale de l'INRAA d'Adrar, située à 5 km au sud du chef-lieu de la wilaya dont les coordonnées géographiques sont les suivantes : Altitude : 278 m, Latitude : 27° 49 Nord et Longitude : 00°11 Ouest.

III.6.2 Pluviométrie

La pluviométrie est négligeable (< 25 mm/an). Elle ne peut en aucun cas, être considérée comme l'une des sources d'eau pour les végétaux. Les variations interannuelles (Tableau 11) des précipitations, sur une période de 10 ans (2007-2017), montre que l'année 2009 est la plus arrosée avec des précipitations moyennes de l'ordre de 29,25 mm/an et l'année 2013 est la plus sèche avec des précipitations moyennes de l'ordre de 2 mm/an, les précipitations moyenne interannuelles sont de 11,73 mm/an.

Tableau 11: Variations interannuelles des précipitations. Source station INRAA Adrar (2018)

Année	moyenne (mm/ 2 années)	cumule (2 années)
2007-2008	27,35	54,7
2008-2009	37,73	75,45
2009-2010	19,88	39,75
2010-2011	6,68	13,35
2011-2012	5,93	11,85
2012-2013	4,6	9,2
2013-2014	5,35	10,7
2014-2015	11	22
2015-2016	7,03	14,05
2016-2017	5,78	11,55

III.6.3 Températures

Les amplitudes thermiques sont importantes aussi bien au cours de l'année qu'au cours du mois et de la journée. La température moyenne annuelle est de 24,4°C. Le maximum absolu atteint les 49 °C avec une moyenne 44,9°C en été (juillet). Moyenne des minima du mois le plus froid 4,5°C et des maxima 20,3°C (janvier). Les gelées sont rares mais peuvent être enregistrées voir causer des dégâts catastrophiques (**Laaboudi et al., 2010**).

III.6.4. Vent

Il souffle presque en permanence, avec une moyenne annuelle de 5,7 m/s. La direction dominante est Nord-est. En direction ouest, il souffle souvent en violentes tempêtes de sable exerçant une double action : l'érosion, le transport et la sédimentation. Bien que la vitesse moyenne paraît faible, la vitesse instantanée peut être très grande et peut atteindre 100 km/heure, elle peut causer des dégâts importants sur les cultures et sur les systèmes de protection (serres, murs et brise-vent).

III.6.5 Humidité relative

Elle est souvent inférieure à 50 %. Elle dépasse ce seuil pendant quatre mois durant l'année. Pendant certaines périodes très courtes (jours pluvieux), durant lesquelles elle peut s'approcher de 100 %. La rosée est un événement très rare.

III.6.6. Rayonnement solaire - Insolation

La radiation solaire est très importante car l'atmosphère présente une grande pureté durant toute l'année. L'insolation est très forte et atteint 3500 heures par an (PDGDRS, 1999). La durée d'insolation moyenne est de 8 à 12 heures par jour. Elle excède 9 heures par jour pendant au moins la moitié de l'année, du mois d'avril au mois de septembre. Elle est maximale en juillet avec 12 heures par jour, minimale en janvier avec 8 heures par jour.

III.6.7. Evapotranspiration potentielle.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) des régions sahariennes est l'un des traits marquants du climat. Elle est très importante et présente de plus des variations interrégionales comme le montre l'histogramme suivant. L'ETP de référence, calculée selon la méthode de Penman-Monteith (FAO) est de l'ordre de 1 500 mm au Pays des Dayas à plus de 2 500 mm par an dans la région d'Adrar. Elle est maximale en juin, juillet et août, minimale en décembre et janvier. La figure 26 présente les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculées pour 14 stations représentatives (PDGDRS, 1999).

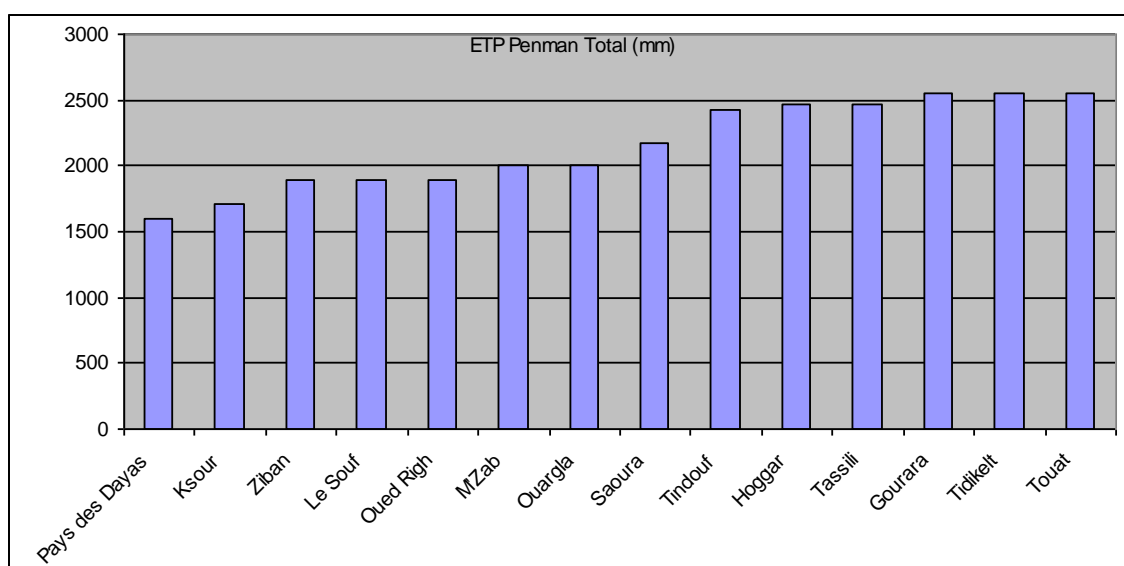


Figure 26 : Evapotranspiration potentielle mensuelle en mm (PDGDRS, 1999).

III.7 Caractéristiques des Sols

Les caractéristiques des sols du secteur de mise en valeur ont été regroupées en quatre sous-groupes (Sa1, Sa2, Sa3 et Sa4) les plus pratiques présentés dans le chapitre rapport sol de l'étude de (PDGDRS, 1999) selon le tableau suivant :

Tableau 12 : Les caractéristiques des sols du secteur de mise en valeur

Région	Classes des sols				Sa Totale
	Sa1	Sa2	Sa3	Sa4	
Touat	224 926	419 353	51 801	86 540	782 620
Gourara	518 894	123 467	2 349	64 100	708 810
Tidikelt	81 569	234 102	41 036	60 000	413 717

Sources: PDGDRS (1999)

Dans la région du Touat et du Gourara ce sont des sols essentiellement bruts d'ablation, d'épaisseur moyenne (3 à 5cm). Dans le Tidikelt, ce sont des sols peu évolués subdésertiques modaux et des sols minéraux d'érosion éolienne, d'épaisseur moyenne qui occupent près de 215 000 ha dont la majorité sont aptes à l'irrigation sous réserves de pouvoir les drainer dans de bonnes conditions.

- **Sa1** : Surface pédologique d'aspect hétérogène et grossier.
- **Sa2** : Surface d'aspect homogène et fin.
- **Sa3** : Ce sont des sols sans recouvrement pierreux et présentant un recouvrement de surface de texture fine soit d'origine éolienne, soit correspondant à une accumulation gypseuse avec un horizon de surface pulvérulent reposant sur des horizons sableux (sable fin) généralement épais. cette classe représente 95 000 ha au Gourrara et du Tidikelt.
- **Sa4** : Dépôts alluviaux dans les oueds et épandage dans les zones en dépressions.

Sols minéraux bruts peu évolués d'apport alluvial et aussi d'apport éolien dont l'aptitude à l'irrigation ne peut être prise qu'après des études détaillées. Pour cette classe, la wilaya d'Adrar représente 700 000 ha valorisables.

Tableau 13 : Classification d'aptitude des terres pour l'irrigation de cultures céréalières

Aptitude	Texture	Profondeur Cm	Inclusions (graviers, cailloux) %
Bonne	S	> 80	<30
	S/LS	> 50	< 30
	S/SL	50-80	<30
Moyenne	LS	50-80	30-50
	LS	30-50	<30

Source : PDGDRS (1999)

III.8. Matériel végétal - Variétés cultivées

Plusieurs variétés ont été cultivées avec différents indice FAO. Cet indice permet de classer la précocité de telle ou telle variété. L'indice de précocité FAO varie de 100 à 900. Plus il est élevé, plus la période dont la variété a besoin pour arriver à maturité est longue. Une différence de 100 correspond environ à 10 jours de végétation supplémentaires (**Baux et al., 2010**).

Tableau 14: Caractéristiques de quelques variétés cultivées dans différents périmètres de GMV entre 2014 et 2016.

Variétés	Couleur du grain
high tech 6065 (Egypte)	Grain Jaune
Ranti (France- Caussade)	Grain Jaune
Colonia (France- Caussade)	Grain Jaune

III.9. Matériel Informatique

III.9.1. Téléchargement et traitement des images

III.9.1.1. Images Google Earth (GE)

L'année d'acquisition des images GE présente souvent des caractéristiques très variables. Elles peuvent toutefois s'avérer très utiles à l'élaboration d'une base de données.

Nous avons eu l'occasion d'observer et d'exploiter des images d'une dizaine de pivots emblavés de Maïs. Les images THR proposées gratuitement par GE peuvent servir à recueillir des informations agricoles : surfaces, Forages, nombre de pivots et même certaines pratiques agricoles (travail du sol, l'irrigation, la récolte...).

III.9.1.2. Images satellitaires Landsat8 et Sentinel2

Les images ont été obtenues par l'utilisation de deux plateformes USGS (United States Geological Survey) et/ou LandViewer sur le site Web de l'EOS (Earth Observing System) (<https://eos.com/Landviewer/>). Le téléchargement a été effectué directement sur l'orbitale de satellites Landsat8 et Sentinel2 d'une résolution spatiale de 30 et 10 m respectivement. Les images ont été sélectionnées en tenant compte du critère d'absence de nuages à différentes dates de 2014 à 2018, totalisant 21 images (Tableau 15). Ces images ont un point d'orbite 196-40 et 196-41 et couvrent complètement la zone d'étude sur une distance de la route 590 km (de Mguiden jusqu'à Aoulef). Leurs coordonnées sont UTM Zone 31N, Projection WGS 84

Tableau 15: Images landsat8 utilisées, les périmètres, de GMV, concernés et la date correspondante.

Cultures	Images	Régions	Dates	Références
Maïs	01	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	06/11/2014	LC81960412014310LGN00
	02	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	25/11/2015	S2AGtif: B08, B04, B03
	03	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	10/11/2016	S2AGtif: B08, B04, B03
	04	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	14/11/2017	LC08L1TP19604120171114
	05	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	14/11/2018	LC08L1TP19504120181110
Blé	01	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	27/03/2014	LC81960412014054LGN00
	02	Aoulef	05/04/2014	LC81950412014079LGN00
	03	Aougrouit	27/03/2014	LC81960402014086LGN00
	04	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	30/03/2015	LC81960412015089LGN00
	05	Aoulef	00/00/2015	LC81950412015066LGN00
	06	Aougrouit	30/03/2015	LC81960402015089LGN00
	07	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	16/03/2016	LC81960412016076LGN00
	08	Aoulef	25/03/2016	LC81950412016085LGN00
	09	Aougrouit	16/03/2016	LC81960402016076LGN00
	10	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	03/03/2017	LC08L1TP19604120170303
	11	Aoulef	12/03/2017	LC08L1TP19504120170312
	12	Aougrouit	03/03/2017	LC08L1TP19604020170303
	13	Sebaa/tsabit, Adrar, Fenoughil, Z Kounta et Inzeghmir	22/03/2018	LC08L1TP19604120180322
	14	Aoulef	31/03/2018	LC08L1TP19504120180331
	15	Aougrouit	22/03/2018	LC08L1TP19604020180322
	16	Mguiden	15/03/2018	LC08L1TP19504020180315

Le Touat est couvert par 10 images dont 5 pour du maïs avec lesquels 3 pour l'estimation du rendement et 5 pour la cartographie de la répartition spatiale des pivots actifs (blé et maïs), le Gourara est couvert par deux images (Aougrouit et Mguiden) et le Tidikelt est couvert par cinq images (Aoulef).

Le volume important d'informations à collecter représente une grande difficulté dans le processus d'élaboration d'une base de données. Cette dernière a été organisée et gérée par plusieurs logiciels.

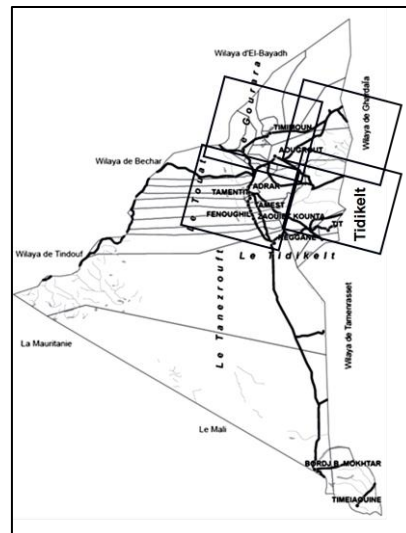


Figure 27 : Les zones d'intérêt pour l'étude encadré par les images téléchargées.

III.9.2 Enquête

Pour un bon déroulement de l'enquête un questionnaire a été confectionné en utilisant le logiciel Sphinx (Annexe 1b). L'échantillon étudié, en raison de sa taille (41 agriculteurs) avec de nombreuses questions posées à chacun, se traduit par la collecte d'une masse importante de données qui ont été compilées et soumises à l'analyse statistique. Les traitements des enquêtes ont été faits par le logiciel "Le Sphinx Plus² version 5" qui permet de concevoir un questionnaire, de saisir et dépouiller les réponses et d'explorer les données enregistrées.

III.9.3. Télédétection

Pour la partie télédétection nous avons utilisé différents types de logiciels dans le cadre de cette étude :

A. Logiciel Google Earth Pro,

En première étape, il a servi pour la phase de recherche initiale des zones de concentration de pivots. Et en deuxième étape, à travers les images sont enregistrées sous format JPEG pour être traitées (géoréférencées) ensuite dans Arcmap.

B. logiciel Arcgis (Arcmap)

Le logiciel Arcgis 10.2 (Arcmap) : Il est utilisé pour le traitement d'image, la cartographie, le calcul des indices de végétation. On peut résumer les principales caractéristiques de ce logiciel comme suit :

- Il fournit des outils pour la visualisation, le géoréférencement, les prétraitements, la classification et l'analyse des images satellitaires (ESRI/USGS). Il répond à la plus part des exigences de base nécessaires pour le traitement d'une image :
- Opérations de superposition des couches thématiques ;

- Analyse de la végétation à l'aide des indices de végétation (NDVI) ;
- Fournis une visualisation online aux données de télédétection par satellites Landsat8,
- Traitements statistiques ;
- Echange de données entre Arcmap et les autres SIG (Qgis, Google Earth.)
 - Type de sortie : représentation cartographique, valeurs numériques ou textuelles, histogrammes, graphiques etc. ;
 - Efficacité dans la gestion des bases de données ;
 - Langage de requête qui permet de mixer les entrées graphiques et non graphiques.

c. Logiciel Matlab

Les résultats des calculs des indices de végétation vont être traités et analysés statistiquement avec le logiciel MATLAB afin de réaliser les modèles d'estimation du rendement. C'est un logiciel très puissant et donne une bonne précision de modèle.

III.9.4. Outils de prospection

1. Global Positioning System (G.P.S)

Le but principal d'un G.P.S est de déterminer la position tridimensionnelle (altitude, latitude et longitude) de manière continue et instantanée. Pour notre cas, le G.P.S a été utilisé pour la vérification des lieux visités et l'état de végétation (anomalies observées) afin de faire une comparaison avec les images satellitaires téléchargées.

Pour le déplacement sur le terrain nous avons utilisé différents types de Véhicules selon la disponibilité on trouve : 4x4, 4x2 et 301 Peugeot HDI 1.6 (personnel).



Figure 28 : Exemple de sites visités durant l'enquête – Google earth Pro
Pivot mais Benzina à ZK 07/11/2015 (a) ; pivot CAAS Aéroport Adrar 2015 (b)

2. Appareil photo numérique

Nous avons utilisé un appareil photos (type portable OPPO S5 8Mpx) pour photographier les différents périmètres, pivots, états de végétation et les aménagements qui ont été réalisés. - **PC portable** puissant, *hp* intel CORE i7, pour supporter les différents volumes de logiciels utilisés.

Chapitre IV

Méthodologie

Introduction

Afin de trouver une relation mathématique ou un modèle pour l'estimation du rendement du maïs, d'accéder aux pratiques agricoles au niveau de la parcelle et de donner une explication aux faiblesses des rendements, la méthodologie que nous avons adoptée fait le lien entre l'observation sur le terrain, genres d'enquêtes et l'observation à travers l'espace via les images satellitaires en utilisant les outils de la géomatique (télédétection et SIG), par l'exploitation de deux types d'images issues : i)- de la plateforme Google Earth Pro ; ii)- de landsat8 et Sentinel2. Les données obtenus seront traitées, analysées et discutées. Les étapes de la méthodologie utilisée sont présentées dans l'organigramme de la figure 29.

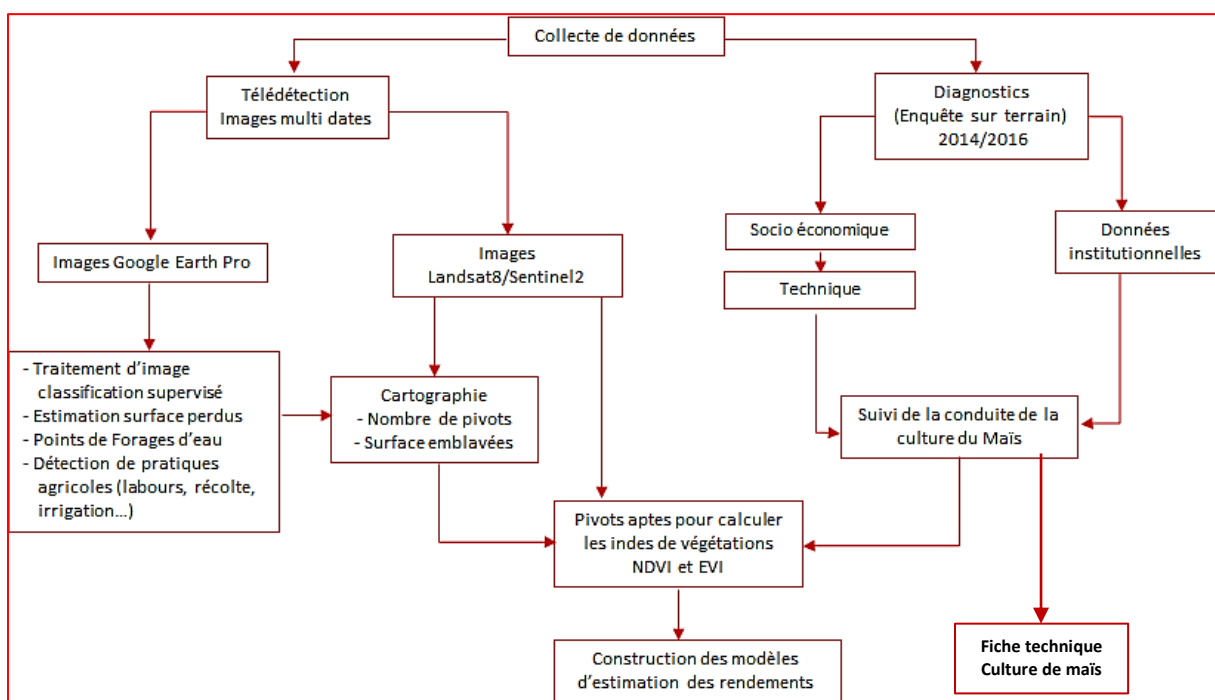


Figure 29 : Organigramme de la méthodologie adoptée.

IV.1 Acquisition et traitement des données par la Télédétection

Pour réaliser des sorties sur le terrain pour enquêter les agriculteurs, on doit connaître l'étalement (la durée) de la saison (Tableau 16) de chaque culture (blé/maïs). La région d'étude est caractérisée par deux saisons de culture principale, le blé (hiver), dont la saison commence en Novembre et dure jusqu'à Avril ; le maïs dont la saison de culture (été) commence au mois d'Août et dure jusqu'au mois de janvier. Pour la cartographie de la répartition spatiale temporelle de pivots opérationnels, nous avons utilisées les images qui couvrent tous les périmètres de GMV. Ainsi, tous les pivots opérationnels (emblavé en blé ou maïs) seront comptés et représenté sur la carte. L'étude sera limitée à deux zones naturelles : le Gourara et le Touat pour la culture du maïs.

Tableau 16: Le calendrier de culture du blé et du maïs sous pivot

	Culture d'hiver						Culture d'été				
	Nov	Dec	Jan	Fév	Mars	Avr	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
Blé											
Maïs											

Trois sources d'informations ont été utilisées pour le suivi de la culture et l'acquisition de données.

Les outils de la télédétection ont permis de saisir les variations de l'espace agricole. Le traitement effectué sur ces images par le logiciel Arcmap et Excel a donné lieu, d'une part, à la réalisation d'une cartographie détaillée de périmètres de mise en valeur et la répartition de pivots actif (culture été/hiver) et, d'autre part, pour calculer les indices de végétations l'NDVI (Normalised difference vegetation index) et EVI (Enhanced vegetation index) qui permettent la réalisation d'un modèle d'estimation de rendement du maïs.

IV.1.1. Exploitation des images satellitaires Google Earth Pro (GEP)

Google Earth pro, ce logiciel a servi pour la phase de recherche initiale des zones d'études.

Après une longue navigation sur la plate-forme GEP, nous avons pu coïncider avec une série d'images (types CNES/Astrium), d'une résolution de 0,5 m, qui nous a beaucoup servi à observer quelques pratiques agricole (état de la parcelle, récolte et irrigation), et qui expliquent une partie de la faiblesse des rendements du maïs sous pivots. Les deux images du 30/01/2016 et du 16/02/2016 coïncident avec le stade de senescence de la culture du maïs. Elles nous ont permis de repérer 24 pivots non récoltés dans les périmètres de Tsabit au nord jusqu'à Inzagmir au sud. Ce sont des images GEP enregistrées sous format JPEG. Leurs traitement sur Arcgis nous a permis d'estimer le taux de superficie emblavé perdu ou non productif par photo-interprétation suivie d'une validation de terrain. Ces images ont subi le traitement suivant :

- Importation de l'image GEP de pivot X, enregistré sous format JPEG, dans Arcgis.
- géoréférencement de l'image.
- A travers l'outil clip dans Toolbox dans Arcgis on garde seulement, la forme circulaire de la parcelle, appelée la zone d'intérêt (ROI : Region Of Interest) délimité par le polygone.
- la classification par la méthode supervisée, ce traitement nous a permis de déterminer 5 catégories de superficies dont trois expliquent la densité (pieds) du maïs et qui sont : superficies de Bonne végétation du Maïs BM, superficies à Faible végétation du Maïs FM ; et des superficies Dépourvu du Maïs DM. Les deux autres classes concernent les superficies de

Mauvaises herbes MH et les superficies de Sol Nu (SN). Ainsi, différentes étapes sont réalisées durant la classification à savoir : i) la numérisation des parcelles et des différents types d'occupation du sol (intra-parcellaire), qui est basée sur l'analyse visuelle des couleurs (photo-interprétation), tons et texture de l'image satellite ; ii) fusion des entités ayant le même type d'occupation ; iii) utilisation de la requête de calcul pour calculer la superficie des cinq classes (cités en haut) de polygones numérisés.

Le GEP a aussi servi pour identifier les forages qui alimentent les pivots vue la difficulté de leurs identifications sur les images Landsat8 ou Sentinel2.

IV.1.2. Exploitation des images satellitaires Landsat8 / Sentinel2

L'acquisition de données pour identifier, compter et cartographier la répartition spatiale de pivots, entre 2013 et 2018, a nécessité les données des images téléchargées. Ces images ont été référencés selon la zone de projection 31 UTM (Universal Transverse Mercator) Nord avec le système mondial géodésique (WGS) 1984.

La télédétection des pivots opérationnels emblavés de céréales étant basée sur l'activité photosynthétique, nous avons opté pour la saison de printemps (fin Mars à la mi-avril) pour le blé, et l'automne (fin novembre à la fin de janvier) pour le maïs car les cultures sont en pleine croissance (chlorophylle max) dans les différents périmètres et durant ces périodes. Pour éviter la confusion, entre les deux cultures, qui peut fausser le comptage de pivots en raison d'un retard de la récolte du maïs, Ce dernier garde une réflectance assez proche de celle du blé pour un certain nombre de pivots à cause d'un semis, de maïs, en retard, de variété tardive ou de manque de matériel Le traitement d'image est basé sur une classification supervisée avec le logiciel Arcgis qui a permis d'une part, de localiser la distribution de tous les pivots actifs à travers la wilaya d'Adrar et d'autre part, à la réalisation d'une carte détaillée des périmètres de GMV. Nous avons procédé au comptage du nombre de pivot de maïs pour les campagnes concernées en réalisant les cercles (Shapefiles) en première étape. Ce travail a permis d'isoler tous les cercles emblavés de maïs ce qui a facilité le repérage de pivots emblavé de blé.

La récolte et le traitement de données géographiques comprennent :

- le téléchargement des Images de landsat8 de différentes dates et pour les périmètres concernés.
- le marquage l'identification d'occupation du sol par les rampes pivotantes
- Une couche géographique ponctuelle de type Shapefile a été créé sur le logiciel Arcgis avec les coordonnées de pivots actifs.

- La couche de sortie de cette opération est un Shapefile polygone (cercle) contenant les informations caractéristiques de chaque pivot (Exemple : La superficie et les coordonnées),
- réalisation de la carte topographique de répartition de rampes pivotantes.
- transfert de données vers le tableur Excel pour les traitements statistique
- traçage de différents graphes concernant l'évolution de superficies et du nombre de pivots.

IV.1.3. Modèles d'estimation de rendement à distance par les indices de végétation

Jusqu'à présent, toutes les informations sur la culture du maïs et son rendement sont collectées sur les lieux. A cause de la difficulté de contacter tous les agriculteurs suite à l'ensablement des pistes, l'éparpillement de périmètres agricoles et les grandes distances parcourues entre exploitations, le recours à la télédétection devient ainsi une approche incontournable. Toutefois, la seule visite obligatoire sur le terrain est celle qui consiste à évaluer le taux d'infestation de la culture par des adventices.

IV.1.3.1. Calculs des indices de végétation

L'objectif de cette étude est la réalisation d'un modèle d'estimation de rendement, pour cela Trois images pour les calculs des indices de végétation (NDVI, EVI) ont été utilisées.

- Une Image landsat8 pour la campagne 2013/2014 (date de l'image : 06/11/2014)
- Deux Images Sentinel2 pour les campagnes 2014/2015 et 2015/2016 (dates des images : mois de Novembre).

Le traitement de ces images est passé par les étapes suivantes :

- Classification multispectrales supervisée avec de fausses couleurs
- Identification des principaux pivots actifs.
- Masquage ou Clipping, c'est la technique de traitement qui consiste à isoler les pivots emblavés par le maïs du reste de l'image téléchargé. Chaque cercle (Shapefile) de pivot et Clipé à part pour faire les calculs des indices de végétation NDVI et EVI. Cette étape permet la création de couches superposées pour les trois campagnes qui facilitera l'analyse. Au total 9 à 10 classes, selon l'indice, sont retenues (inspiré) similaire à celles proposées sur la plateforme ESRI (Environmental Systems Research Institute) et Landviewer. Ces classes montrent la variabilité intra parcellaire, sous le pivot, d'une végétation dense et en bonne santé jusqu'à la classe de l'absence de végétation ou sol nu.

a. Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Le NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) est calculé à partir des réflectances dans les parties rouge et proche infrarouge (NIR) du spectre. Il est calculé par l'équation (1) suivante:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1) \quad (\text{Huete 2002})$$

Avec :

NIR : Valeur de réflectance dans la bande proche infrarouge,

RED : Valeur de réflectance dans la bande rouge (pour Landsat8, la bande 5 représente le proche infrarouge réflectance et la bande 4 représente le rouge réflectance).

Les résultats des calculs ont été enregistrés dans la table d'attribution (Tableau 17).

Tableau 17 : Classes prévues pour le calcul de l'NDVI, un exemple de toutes les parcelles enquêtées.

Classes	NDVI Index	Etat de surface	surface _m ²	surface %
1	0,9 à 1	Aucune végétation		
2	0,8 à 0,9	Sol ouvert		
3	0,7 à 0,8	Végétation clairsemée		
4	0,6 à 0,7	Végétation clairsemée		
5	0,5 à 0,6	Végétation clairsemée		
6	0,4 à 0,5	Végétal clairsemée		
7	0,3 à 0,4	Végétation dense		
8	0,2 à 0,3	Végétation dense		
9	0,1 à 0,2	Végétation dense		
10	-1 à 0,1	Végétation dense		

Trois ensembles de végétation, selon leur densité, ont été identifiés : végétation dense (NDVI maximum), végétation clairsemée (NDVI moyen) et végétation faible (NDVI minimum). Chaque ensemble contient un certain nombre de classes, selon la valeur de l'NDVI, comme l'indique le tableau ci-dessous. Ainsi, 10 classes peuvent être distinguées (tableau 18). Chacune est représentée par le pourcentage de la superficie couverte. Au total, 8 classes parmi les 10 de l'indice d'NDVI ont été identifiées.

Tableau 18 : Les valeurs des indices de végétation selon les classes d'NDVI.

Ensemble de végétation	Végétation dense			Végétation clairsemée			Végétation faible	
	2	3	4	5	6	7	8	9
Valeur NDVI	0,8 à 0,9	0,7 à 0,8	0,6 à 0,7	0,5 à 0,6	0,4 à 0,5	0,3 à 0,4	0,2 à 0,3	0,1 à 0,2

Pour l'NDVI deux variables indépendantes ont été utilisées. La première variable a été construite à partir de la somme de 3 classes à forte densité et la deuxième variable a été construite à partir de la somme de 3 classes à moyenne densité.

b. Indice de végétation amélioré EVI

L'EVI (Enhanced Vegetation Index) incorpore la réflectance dans la partie bleue du spectre en plus du rouge et du NIR. Il a été développé pour être plus sensible à la biomasse en

réduisant au minimum l'effet d'aérosols. Il emploie la bande bleue pour corriger ces effets. Il est calculé par l'équation suivante :

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1\rho_{RED} - C2\rho_{BLUE} + L} \quad (2) \text{ (Huete, 2002)}$$

où :

G : facteur de gain (égal à 2,5)

L : facteur d'ajustement des sols (égal à 1)

C1 = 6 et C2 = 7,5 : coefficients de correction de la diffusion atmosphérique.

Les résultats de calcul ont été enregistrés dans la table d'attribution (Tableau 19).

Tableau 19 : Classes prévues pour le calcul de l'EVI, un exemple de toutes les parcelles enquêtées.

Classes	EVI Index	Etat de surface	surface _m ²	surface %
1	0,8 à Max	végétation dense		
2	0,6 à 0,8	végétation dense		
3	0,3 à 0,6	végétation dense		
4	0,2 à 0,3	végétation clairsemée		
5	0,1 à 0,2	végétation clairsemée		
6	0 à 0,1	Sol nu		
7	-0,3 à 0	Eau/sol nu		
8	-0,6 à -0,3	eau		
9	min à - 0,6	eau		

Au total, 6 classes parmi les 9 de l'indice EVI ont été identifiées. Chacune est représentée par le pourcentage de superficie couverte. Trois variables indépendantes ont été utilisées. Ce sont les trois premières classes à forte densité. La végétation est partagée en deux ensembles ; végétation dense et végétation clairsemée. Par ailleurs, nous avons constaté 3 classes appartenant au premier ensemble et trois classes appartenant au deuxième ensemble (tableau 20). Cet indice détecte 4 autres classes à $EVI \leq 0,1$ mais elles sont dépourvues de végétations.

Tableau 20. Les valeurs des indices de végétation selon les classes d'EVI

Etat de végétation	Végétation dense			Végétation clairsemée		Sol nu
	1	2	3	4	5	
Classes						
Valeur d'EVI	0,8 à 1	0,6 à 0,8	0,3 à 0,6	0,2 à 0,3	0,1 à 0,2	0 à 0,1

Les données de calculs enregistrées dans les tables d'attributions dans Arcgis ont été transférées vers l'Excel pour le traitement statistique. Ces classes nous ont permis d'élaborer le modèle d'estimation de rendement.

c. Validation du NDVI et EVI sur le terrain

Il y avait des différences d'un agriculteur à l'autre dans la réponse aux interviews durant l'enquête. Cela a entraîné des différences dans la qualité de l'information. Pour

s'assurer que les données étaient uniformes, chaque interview a été notée sur le questionnaire. Les notes ont ensuite été utilisées dans l'analyse comme facteurs de pondération pour normaliser les données. Dans cette perspective, les valeurs de l'NDVI et l'EVI sur le terrain de Landsat8 et Sentinel2 ont été évaluées et validées pour déterminer la présence de maïs au cours du cycle de développement. Cela a été fait en identifiant les zones nues et en comparant ces indices avec ceux des champs. Tous les champs (surfaces) avec des indices égaux ou inférieurs aux indices du sol nu ont été retirés du tableau. Sur les 86 champs de maïs sous pivots étudiés, il a été constaté que le maïs validé dans 60 parcelles était conforme à la valeur de NDVI et EVI confirmée par l'image en fausses couleurs Landsat8 et Sentinel2. Le choix de l'image a été réalisé au mois de Novembre de chaque campagne (2014, 2015 et 2016).

d. Traitement de données sur Excel

Les résultats des calculs sont disponibles sous forme de tableaux sur Excel, où nous avons procédé à un pré traitement des données. Une régression linéaire par étapes a été utilisée pour faire un lien entre le rendement et les indices de végétations. Les statistiques de production annuelle de maïs de 2014 à 2016 fournie par l'ONAB pour Adrar ont été utilisées comme variable dépendante. Les 9 classes obtenues pour chaque champ sous pivot ont été regroupées en trois classes. Les valeurs de l'NDVI et l'EVI ont été comparées à la proportion équivalente de sa superficie couverte de végétation. Les valeurs NDVI/EVI (variable indépendante) de trois classes ont été extraites de l'ensemble des données du mois de novembre où l'NDVI est à son maximum. Les données d'entrée et l'association statistique de NDVI et EVI avec la production de maïs ont été systématiquement testées pour les éléments suivants :

- homogénéité des données lors de la mise en commun de l'échantillon,
- corrélation linéaire, logarithmique en utilisant la régression **robuste**

IV.1.3.2 Approche de la modélisation

Notre approche de modélisation de l'estimation du rendement du maïs est basée sur l'utilisation des méthodes de régressions. Cependant, l'application de la régression linéaire (multiple) sur Excel a donné lieu à l'apparition de rendement exceptionnel des cultures (valeurs aberrantes) pouvant entraîner des résultats trompeurs et fausser (affaiblir) le modèle. Afin de résoudre ce problème, nous avons appliqué la technique de régression robuste (M-estimateur) qui n'est pas affectée par ces valeurs aberrantes. Autrement dit cette méthode limite l'influence de toute donnée (aberrante) provenant de l'échantillonnage. Les calculs et la réalisation des courbes ont été effectués sur le logiciel MATLAB 2.1 pour une meilleure précision des modèles.

a. Utilisation de NDVI

Nous rappelons que la somme des valeurs d'NDVI des classes 2, 3 et 4 indiquant la présence d'une végétation dense, représente la première variable indépendante (NDVI1), tandis que la somme des valeurs d'NDVI des classes 5, 6 et 7 indiquant une végétation clairsemée, représente la deuxième variable indépendante (NDVI2). Le rendement observé constitue la variable dépendante. Les classes à faible végétation ont une influence insignifiante sur le modèle, elles ne sont pas prises en considération. Donc, le modèle est construit par deux variables indépendantes NDVI1 et NDVI2. Le résultat sera basé sur l'utilisation de la régression robuste du logiciel MATLAB.

b. Utilisation d'EVI

Dans ce cas, les valeurs de rendements sont considérées comme variables dépendantes. Cependant, les variables indépendantes sont construites par les trois premières classes de valeurs d'EVI (classe 1, 2 et 3) qui représentent la végétation dense. Les classes à végétation clairsemée et à faible végétation ont une influence insignifiante sur le modèle, elles ne sont pas prises en considération. Dans ce cas, le modèle est construit par trois variables indépendantes EVI1, EVI2 et EVI3. Le résultat sera basé sur l'utilisation de la régression robuste du logiciel MATLAB.

IV.1.3.3. Critères de performance du modèle

Pour évaluer les modèles, les critères de performances utilisées sont le coefficient de détermination R (3), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (4) et l'erreur moyenne absolue (MAE) (5).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})(Y_{es} - \bar{Y}_{es})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{es} - \bar{Y}_{es})^2}} \quad (3)$$

- Racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{es})^2}{n}} \quad (4)$$

- l'erreur absolue moyenne (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_{obs} - Y_{es}| \quad (5)$$

Avec : Y est le rendement estimé, Y_{obs} est le rendement observé, \bar{Y}_{es} est le rendement estimé moyen, \bar{Y}_{obs} est le rendement observé moyen, (n) est le nombre d'observations.

IV.2. Données de Diagnostic d'enquêtes sur le terrain - Mesures in situ

L'opération d'enquête consiste à identifier, décrire et localiser les données relatives aux différents périmètres de la grande mise en valeur (GMV) dans la wilaya d'Adrar. Elle est considérée comme étant la phase la plus importante précédant les étapes d'analyse et de numérisation des données. L'enquête directe (face à face) est faite sur le terrain, sur la base d'un questionnaire préétabli (Annexe 01), dans des exploitations agricoles réparties dans les différents périmètres de GMV. Le questionnaire est divisé en trois volets ; le premier concerne l'agriculteur, le deuxième est réservé à la conduite de la culture du maïs (itinéraire technique) et le troisième traite de l'eau et du pivot (machine d'irrigation). Le diagnostic a permis aussi, d'apporter d'autres informations utiles comme l'infestation des mauvaises herbes et les attaques des insectes de différentes espèces.

Les agriculteurs auprès desquels les enquêtes ont été réalisées correspondent aux agricultures pratiquant la culture en dérobé blé/ maïs (deux récoltes/an) disposant de pivots de surface moyenne de 20 ha. L'enquête a touché 41 agriculteurs réparties dans les deux territoires ; le Gourara (Tsabit/Sbaa et Adrar) et le Touat (Fenoughil, Zaouiet kounta et Inzeghmir). Cette phase s'est réalisée principalement au cours de la campagne de la culture du maïs en été (l'installation de la culture) jusqu'au printemps (récolte tardive). Au total, 86 champs du maïs, sous pivots, ont été identifiés pour les campagnes 2013/2014, 2014/2015 et 2015/2016 en interviewant les agriculteurs. Nous avons exploité les informations obtenues lors des interviews pour argumenter les résultats, l'analyse et la discussion. Les étapes de ce travail sont les suivantes :

1- Déplacement sur le terrain pour obtenir le maximum d'informations sur :

- le diagnostic socio-économique : données sur les chefs d'exploitations (âge, formation agricole...), prix de revient et seuil de rentabilité de la culture du maïs,
- le diagnostic technique: Itinéraires techniques de la culture du maïs suivi par les agriculteurs, l'analyse des sols, le système et la conduite de l'irrigation etc.

2- Présentation des images satellitaires et des statistiques de rendements, pour participer et motiver l'agriculteur dans la démarche ;

3- discussion et entretien avec l'agriculteur pour comprendre les variations des rendements.

Les données collectées auprès des agriculteurs concernent les coordonnées, les superficies, les dates de semis, les variétés, le mode de travail du sol,...et même les rendements déclarés sont regroupées dans un tableur par agriculteur et par périmètre. Dans cette enquête nous sommes intéressés à la méthode de conduite de la culture du maïs sous pivot et ce, pour mieux

comprendre la cause de l'oscillation des rendements et aussi pour une meilleure analyse des images satellitaires. Cette enquête nous a permis d'élaborer une fiche technique basée sur les agriculteurs respectant l'itinéraire technique et réalisant de très bon rendement. Elle est résumée comme suit :

IV.2.1. Travail du sol

Dans cette première opération, nous avons enquêté sur le matériel utilisé pour la préparation du lit de semence, la durée de labour (jours/pivot) et la puissance des tracteurs utilisés. Les dimensions rudimentaires des outils utilisés ont permis d'expliquer une partie du retard dans la mise en place de la culture.

IV.2.2. Semis

La semence se trouve dans des sacs de 75000 à 95000 grains. Le semis se fait en grains /ha, avec une profondeur de 3cm. Le semis est effectué en lignes avec un semoir de précision (4 à 5 lignes).

IV.2.3. Irrigation

C'est l'opération la plus importante et la plus délicate durant toute la campagne. Nous avons fait le suivi de l'homogénéité de l'irrigation à travers les différents types d'asperseurs, les fuites d'eau le long de la conduite principale, la formation des ornières, le niveau statique de l'eau de forage. Le mode de la gestion de l'eau au niveau de la parcelle nous a permis d'expliquer une partie de la variabilité des rendements.

IV.2.4. Fertilisation

Les apports d'engrais pratiqués ont été enregistrés pour chaque agriculteur enquêté et des interviews ont été réalisées avec les fournisseurs et les prestataires de service dont deux ingénieurs agronomes.

IV.2.5. Désherbage

L'observation de cette opération, durant différents stades de développement, a pour objectif une meilleure interprétation des images satellitaires. Plusieurs visites des parcelles après la récolte ont été réalisées pour voir s'il y a vraiment une diminution de MH après la culture de maïs et même de donner une appréciation sur le nettoyage ou le salissement de parcelles.

IV.2.6. Récolte

Dans cette opération, nous avons jugé intéressant de noter la date de récolte, l'état de la culture (% H°, verse, mauvaise herbes), les pertes (machine ou verse), la location de la

moissonneuse batteuse, le transport et le stockage. Cette dernière opération est très importante après plusieurs mois de travail. Elle nous a permis d'observer les vrais problèmes de la logistique agricole dans le grand sud.

IV.3. Données fournies par les administrations locales

Elles sont issues d'enquêtes auprès des administrations en charge du développement rural et agricole comme l'union des agriculteurs de la wilaya d'Adrar, la direction des services agricoles, la chambre de l'Agriculture et l'Office National des Aliments de Bétail (ONAB) de la wilaya d'El-Bayadh (1000 km d'Adrar).

Les rendements déclarés par les agriculteurs sont comparés aux données collectées auprès de l'ONAB (Annexe 04). Elles contiennent essentiellement le nom du producteur, le nombre de pivots, la surface et la production en quintaux. Cette comparaison a permis de filtrer les données et éliminer les valeurs aberrantes de rendements. Cependant, les données disponibles à la direction des services agricoles (DSA) sont les productions et superficies totales emblavées par le maïs. D'autres données ont aussi été récupérées à la chambre de l'agriculture et particulièrement l'union des agriculteurs d'Adrar concernant la détermination des propriétaires des pivots sur le terrain et les problèmes qui entravent le développement de la céréaliculture et principalement le maïs.

PARTIE III

Résultats et discussion

I. Cartographie des superficies céréalières sous pivot

Introduction

Cette partie est consacrée à la présentation de tous les résultats que nous avons pu obtenir au fil des différentes étapes du travail. Evidemment, ces résultats seront accompagnés d'une discussion et seront présentés en volets ou aspects ; leur confrontation avec d'autres résultats obtenus dans des contextes similaires, permettrait d'appréhender la réalité de la GMV et particulièrement la production du maïs et du blé dans la région d'Adrar.

Dans le volet télédétection, nous essayerons de faire le point sur la qualité des informations recueillies à partir des images satellitaires et le degré de leur utilité, notamment, pour expliquer certains points de ce travail qui seraient liés aux spécificités naturelles de la zone d'étude. Les contraintes rencontrées lors de l'utilisation de cet outil y seront également soulignées. Les résultats de ce volet ont fait l'objet de publication d'un article dans « Algerian Journal of Environmental Science and Technology March edition. Vol.7. No1. (2021) ISSN : 2437-1114 www.aljest.org ». Le manuscrit publié est joint en annexe 7.

Au volet diagnostic socio-économique, l'accent sera, particulièrement, mis sur les l'analyse des interactions des composantes prépondérantes du milieu (homme, ressources en eau et en sol, végétal, climat, etc.). La discussion des résultats de l'enquête sera abordée de manière à montrer, d'une part, son intérêt pour avoir une bonne estimation des rendements, et d'autre part, l'appui qu'elle peut apporter, de par sa complémentarité, à l'outil de télédétection et GPS dans la prédiction des rendements des céréales dans la région d'Adrar.

I.1. Exploitation des images téléchargées

Au total, 21 Images Landsat8 couvrant une superficie de 124 465 km² ont été analysées afin d'identifier le nombre de pivots opérationnels et d'estimer les superficies emblavées pour les céréales entre 2013 et 2018 dans les différents périmètres agricoles de la wilaya d'Adrar. Pour un meilleur comptage du nombre de pivots opérationnels et l'estimation de la superficie, nous nous sommes basés sur la culture principale qui est le blé. Les données du nombre de pivots et de la superficie calculée de la culture céréalière (blé/maïs) sont représentées dans le tableau (21).

Tableau 21 : Nombre de Pivots détectés et superficies estimées de la culture céréalière (blé/maïs) dans la wilaya d'Adrar - 2013 à 2018.

		Communes	Zaouiet kounta	Sbaa /Tssabit	Timimoun	Fenoughil	Inzeghmir	Aoulef	Aougrou	Adrar	Total	
		Périmètre Agricole	Stah Azzi	Grara et Raya	Mguiden *	Baamer	Aïn El Feth	Med Boudhiaf	Zaouiet S Abdellah	Aéroport/ M'raguen		
		Superficie Attribuées (ha) APFA	18750	7559	30000	10533	4961	2026	12143	4014	59986 ha	
Nombre de pivots	blé	campagnes	2013/2014	51	26	0	23	15	1	9	4	129
			2014/2015	73	28	0	30	15	2	11	2	161
			2015/2016	76	31	0	35	16	6	12	2	178
			2016/2017	80	43	0	40	17	13	16	6	215
			2017/2018	78	66	56	50	21	24	21	6	322
			% **	24,22	20,50	17,39	15,53	6,52	7,45	6,52	1,86	100
	maïs	campagnes	2013/2014	15	9	0	16	2	0	0	3	45
			2014/2015	18	22	0	10	4	0	0	4	58
			2015/2016	26	3	0	15	3	0	0	0	47
			2016/2017	35	16	0	16	5	0	0	0	73
			2017/2018	61	25	0	26	10	11	0	2	135
Surfaces Irriguées (ha)	blé	campagnes	2013/2014	1124,95	645,69	0	590,77	319,34	28,38	283,93	126,86	3119,90
			2014/2015	1641,85	761,36	0	723,89	323,56	40,05	365,48	36,66	3892,85
			2015/2016	1897,22	867,79	0	804,64	347,80	52,22	357,75	141,80	4469,22
			2016/2017	2002,86	1244,98	0	947,29	384,74	344,15	445,89	146,84	5516,75
			2017/2018	2004,70	2104,23	2464	1301,02	551,23	599,48	593,43	151,09	9769,18
			% ***	10,69	27,84	8,21	12,35	11,11	29,59	4,89	3,76	
	% ****	20,52	21,54	25,22	13,32	5,64	6,14	6,07	1,55			
	maïs	campagnes	2013/2014	298,2	229,05	0	402,4	37,78	0	0	107,91	1075,34
			2014/2015	361,8	595,32	0	237,3	80,56	0	0	126,24	1401,22
			2015/2016	568,88	54,3	0	310,2	67,23	0	0	0	1000,61
			2016/2017	673,22	386,96	0	306,27	122,74	0	0	22,51	1511,7
2017/2018			1427,4	669,94	0	615,66	259,85	266,58	0	57,99	3297,42	

- * :Mguiden sa première campagne, la superficie attribuée prise selon la déclaration du MADR à Adrar (2017).
- ** : Pourcentage de pivots de chaque périmètre par rapport au nombre total de pivots pour la campagne 2017/2018.
- *** : Pourcentage de la superficie emblavée de chaque périmètre en 2018 par rapport à la superficie attribuée dans le cadre de programme APFA.
- **** : Pourcentage de la superficie de chaque périmètre par rapport à la superficie totale emblavée pour la campagne 2017/2018.
- 59986 ha : Superficie attribuée avant la création de nouveau périmètre de Mguiden (ferme Ennahdha).

Il ressort du tableau 24 que durant la période 2013 / 2018, les superficies irriguées du blé et du maïs, sous pivot, ont respectivement augmenté de 213,12% et 207%.

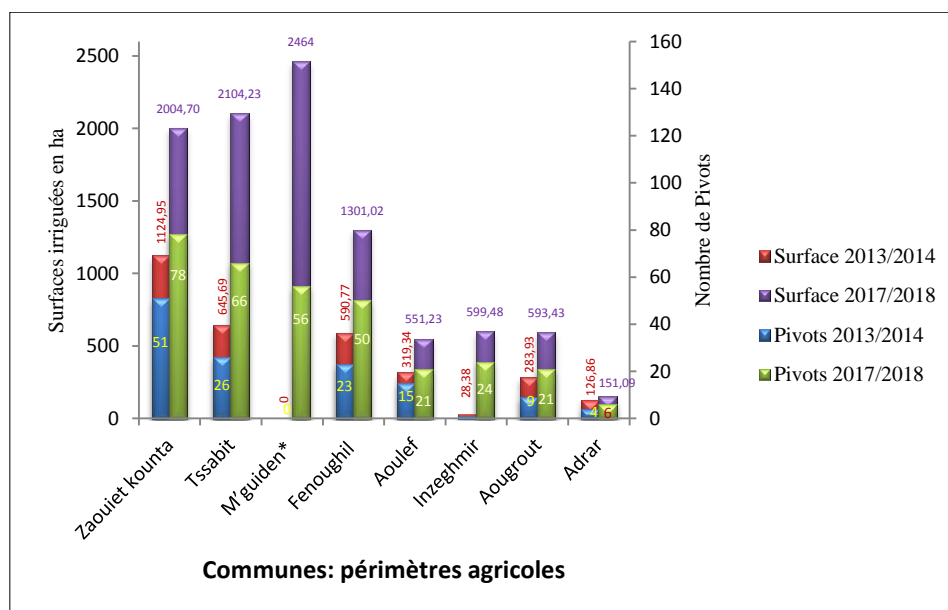


Figure 30: Evolution de la surface irriguée et nombre de pivots par ordre de classement, par périmètre agricole et par campagne en 2013 et 2018 –à Adrar

I.2. Cartographies de la culture de céréales sous pivot dans les différents périmètres

Grâce aux images satellitaires disponibles sur GEP, landsat8 et Sentinel2, nous avons pu localiser avec exactitude l'emplacement des pivots opérationnels et distinguer entre ceux emblavés par le maïs par rapport à ceux dédiés au blé. La carte de distribution géographique des pivots dans les différents périmètres de mise en valeur de la wilaya d'Adrar (figure 31) montre une forte concentration de ces machines d'irrigation, ce qui se traduit par un chevauchement de cercles sur la carte.

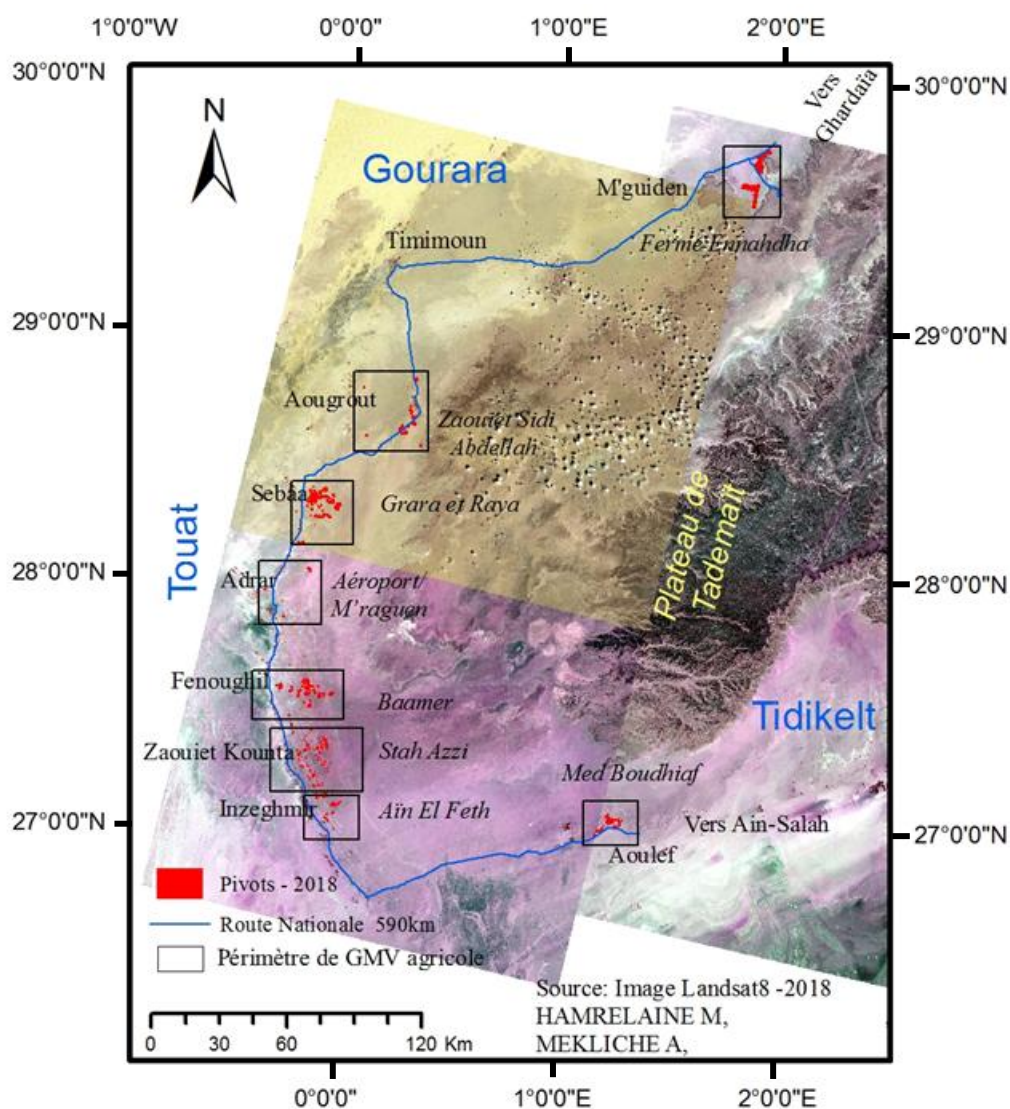


Figure 31 : Carte de localisation géographique des pivots dans les périmètres de la GMV agricole dans la wilaya d'Adrar (Touat-Gourara-Tidikelt). Hamrelaine, 2018

Les images satellitaires téléchargées durant la campagne 2017/2018 ont permis, non seulement, de cartographier les pivots opérationnels et d'estimer les superficies irriguées, mais aussi de cartographier tous les périmètres agricoles de la région d'étude. Ces périmètres recensés dans cette étude ont fait l'objet d'une présentation relatant, de manière plus ou moins exhaustive, le cadre de leur implantation et les conditions de leur mise en service.

I.2.1. Cartographie du périmètre de Zaouiet kounta et Inzeghmir

Ce périmètre appartenant à des autochtones est situé à 75 km au Sud de la ville d'Adrar. Une concentration importante est constatée dans la partie nord de ce périmètre (figure 32).

Nous pouvons aussi distinguer les superficies emblavés par le maïs et par le blé sous pivot.

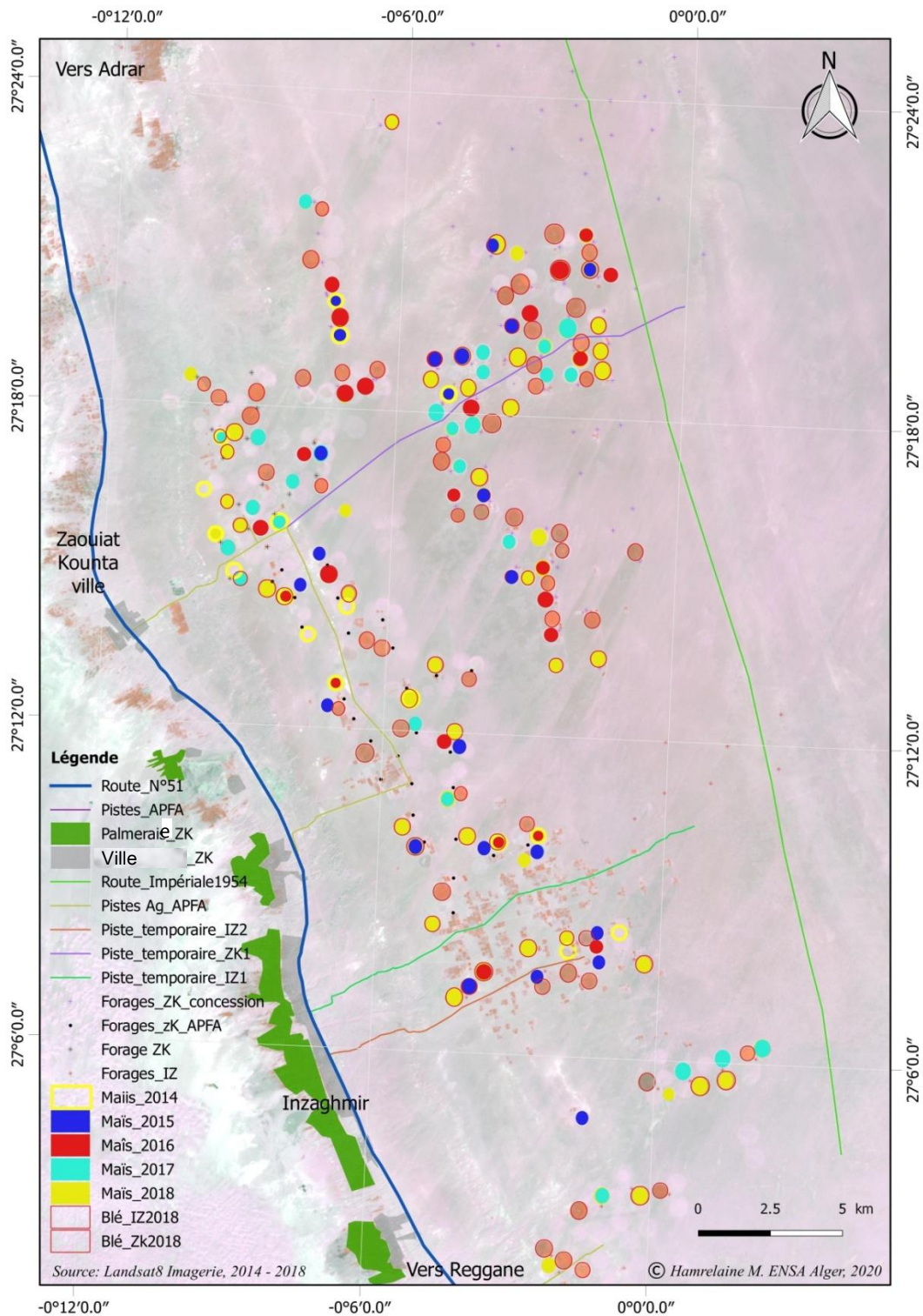


Figure 32 : Carte de Chronologie de la culture du maïs sous pivot à Zaouiet Kounta et Inzaghmir Landsat8 – Adrar – 2014 à 2018

I.2.2. Cartographie du périmètre de Tsabit (Grara et raya)

Ce périmètre est situé à 45 km au Nord de la ville d'Adrar. Il est dominé par des agriculteurs venant du nord pays (Alger, Tlemcen, Boumerdes et Tizi Ouzou). Le nombre de pivots y a considérablement augmenté ; ceci s'explique par l'opération de remise en valeur de plus de 600 ha ayant permis l'installation de 18 pivots dont 13 sont de 42 ha chacun (figure 33). Avec ses 66 pivots, ce périmètre représente environ 20,50% du nombre total.

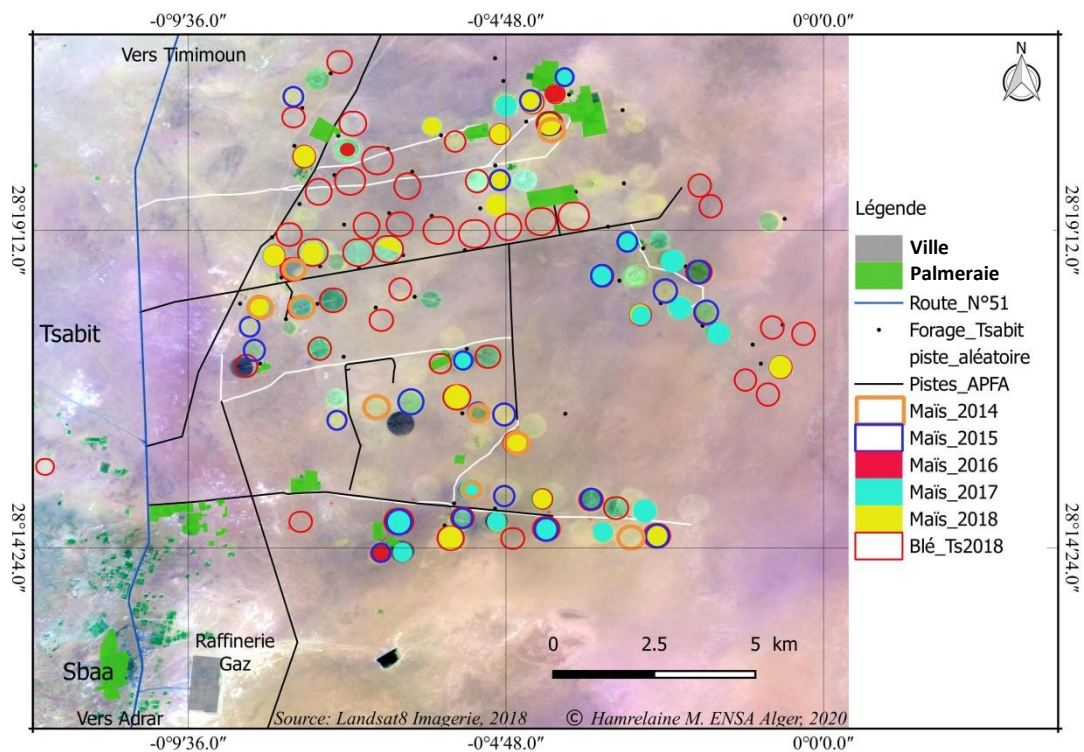


Figure 33 : Cartographie des Cultures du maïs et du blé sous pivot à Tsabit/Sbaa – Adrar – 2014 à 2018- Landsat8.

I.2.3. Cartographie du périmètre de Mguiden

Connu sous le nom du Projet «Ennahda», ce périmètre de Mguiden, à Timimoun a été nouvellement créée, à 365 km au nord de la ville d'Adrar et ce, dans le cadre d'un vaste projet d'investissement agricole pilote dont le coût s'élève à 21 Milliards de DA.

Ce périmètre s'étend sur une superficie de 30 000 hectares et utilise les eaux de la nappe du continentale intercalaire (CI) pour l'irrigation.

Si l'on se fie à l'étude technique de ce projet, il a été prévu de mettre en place, pas moins, de 450 pivots d'irrigation alimentés par 300 forages et d'un réseau d'irrigation goutte-à-goutte couvrant une superficie de 10 000 ha. Le lancement de la mise en culture a eu lieu durant la campagne 2017/2018 et l'investissement a été, principalement, orienté à la production du blé dur (50 %), du maïs (26 %) puis du soja, de la phoeniculture et en maraichage.

La mise en culture avec plus de 2400 ha sous 56 pivots de 44 ha chacun (figure 34), soit 17,39% du nombre total de pivot dans la wilaya, a démarrée en 2017/2018.

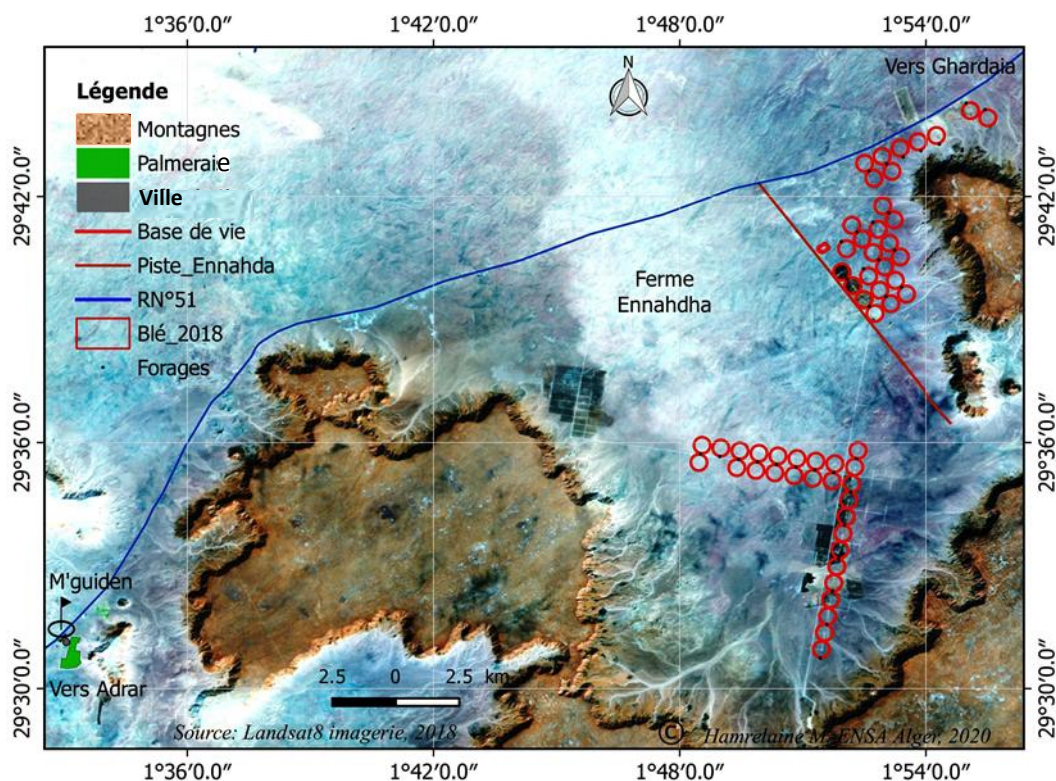


Figure 34: Répartition des pivots dans la ferme Ennahda à M'guiden – Landsat8-2018

I.2.4. Cartographie du périmètre de Fenoughil (Baamer)

Situé à 25 km au sud de la ville d'Adrar, le périmètre Fenoughil (Baamer) est l'un des plus importants sites agricoles où la production de maïs grains, par exemple, a atteint un record. Un rendement record de 99 q/ha a pu être enregistré en 2016/2017, selon l'ONAB de Bougtob (El-Bayadh). Une production de 3 372 quintaux pour une superficie de 34 ha a été obtenue. D'après l'enquête de terrain, c'est le seul périmètre où l'État, représenté par la coopérative céréalière et légumes secs (CCLS), possède une assiette de 500 ha avec 9 pivots opérationnels de 20 à 40 ha.

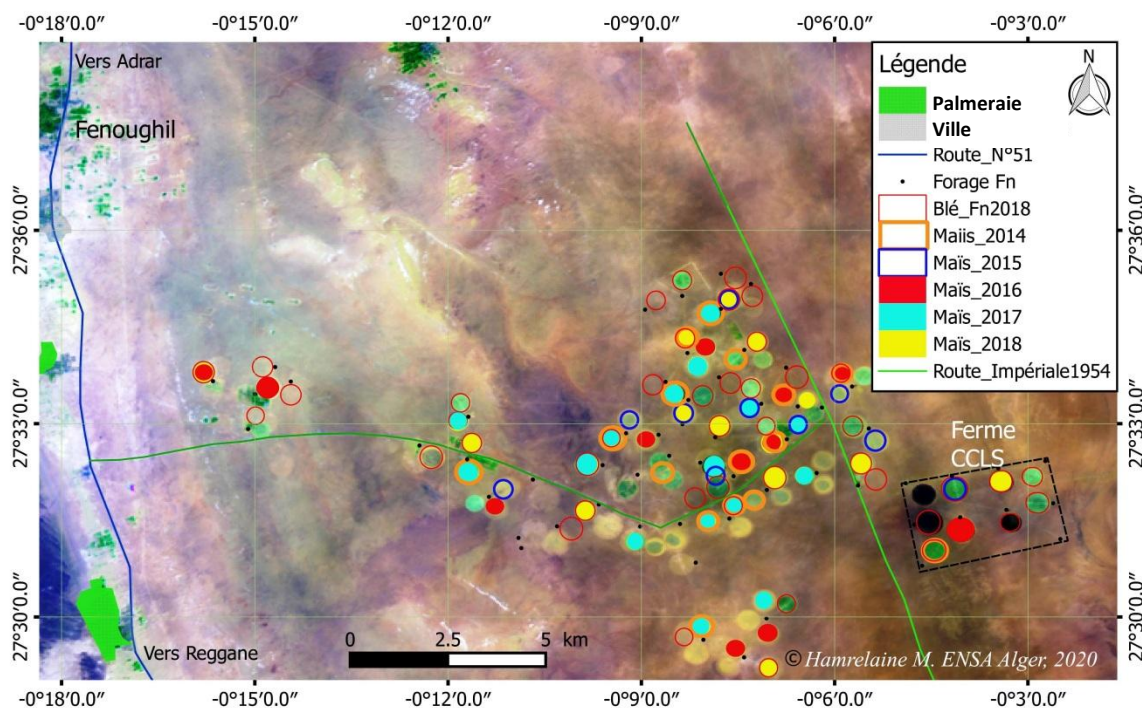


Figure 35 : Cartographie des Cultures du maïs et du blé sous pivot dans le périmètre Fenoughil - Adrar - Campagne 2014/2015/2016 – Landsat8

I.2.5. Cartographie du périmètre d'Aoulef (Med Boudiaf)

Ce périmètre d'irrigation d'Aoulef, baptisé Mohamed Boudiaf, est situé à 250 km du chef-lieu de la wilaya et au sud de In Salah. On y dénombre 24 pivots. Il a été observé que la culture de maïs n'y figure pas dans le plan de production ou n'est pas du tout développée.

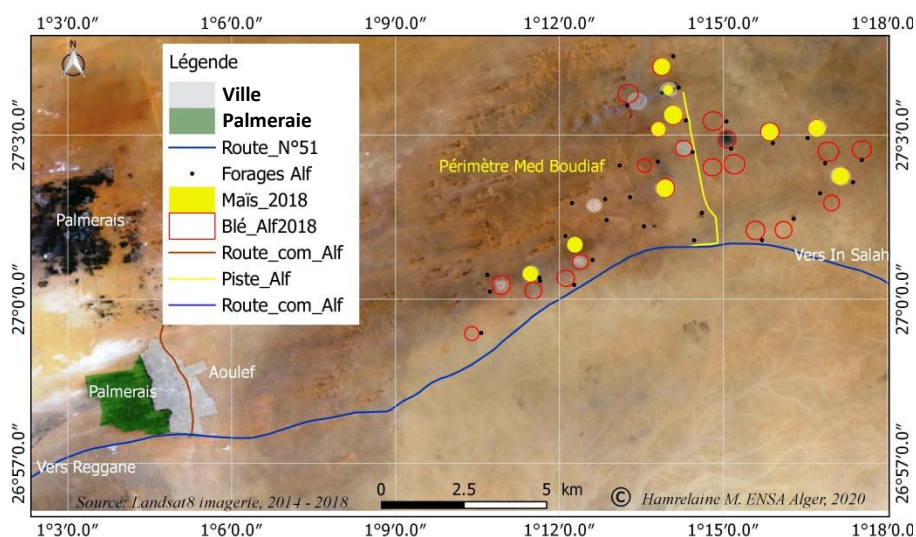


Figure 36 : Cartographie des Cultures du maïs et du blé sous pivot dans le périmètre d'Aoulef (Med Boudiaf) - Adrar - Landsat8

I.2.6. Cartographie du périmètre d'Aougrouit (Zaouiet Sidi Abdellah)

Ce périmètre est repéré à 120 km au Nord de la wilaya d'Adrar. Durant la campagne 2017/2018, on y a compté 21 pivots opérationnels ; ce qui représente 6,52% du nombre total

enregistré dans la wilaya.

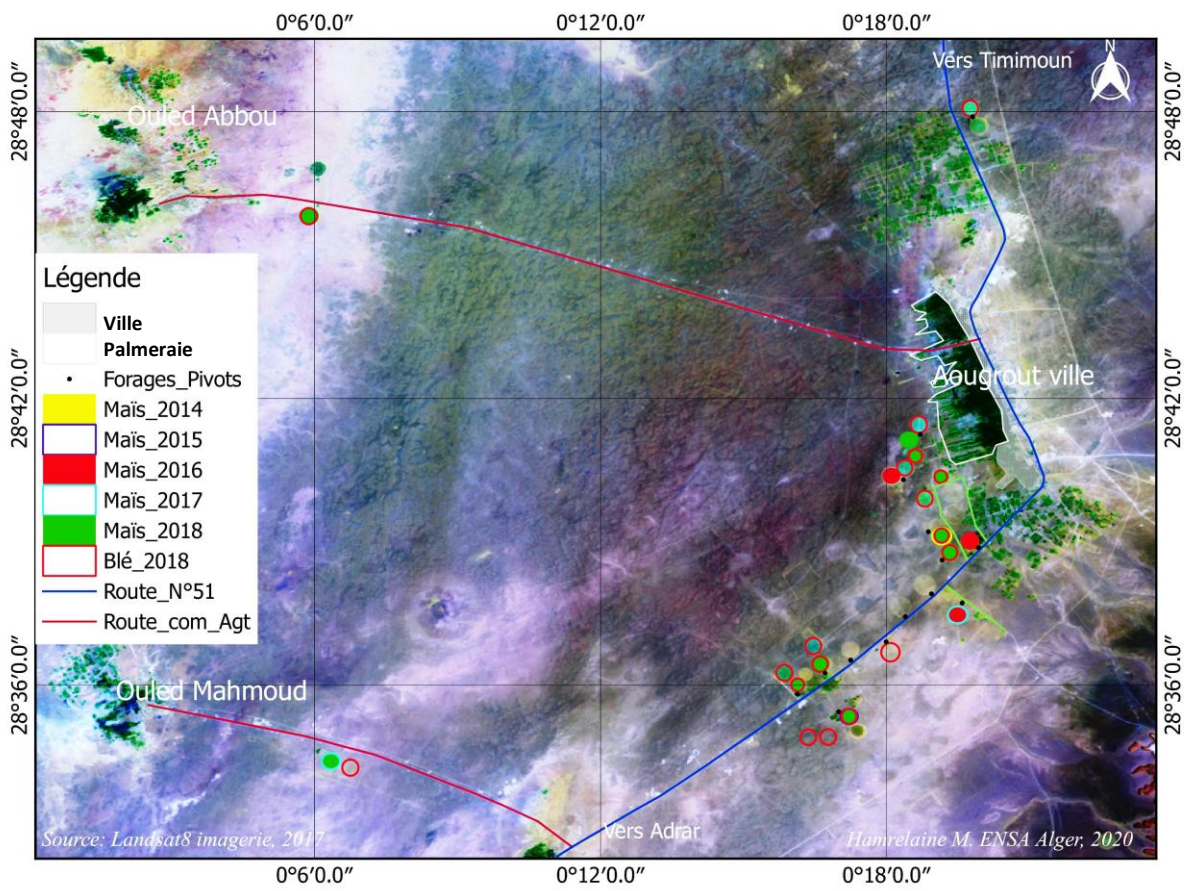


Figure 37 : Cartographie des cultures du maïs et du blé sous pivot pivots dans le périmètre d'Aougrou (Sidi Abdellah) - Adrar – 03/2018 Landsat8

I.2.7. Cartographie du périmètre d'Adrar

La plus faible concentration de périmètres irrigués a été constatée à Adrar-centre avec seulement 6 pivots. Pourtant la ville d'Adrar a été gratifiée d'un projet colossal, c'est celui du Complexe Agro-Alimentaire du Sud (CAAS) qui occupe le plus grand espace d'investissement agricole et qui met en œuvre d'énormes moyens, la gestion de ce site n'a, malheureusement, pas permis le développement la création de nouveaux espaces de production dans la ville et ses environs immédiats.

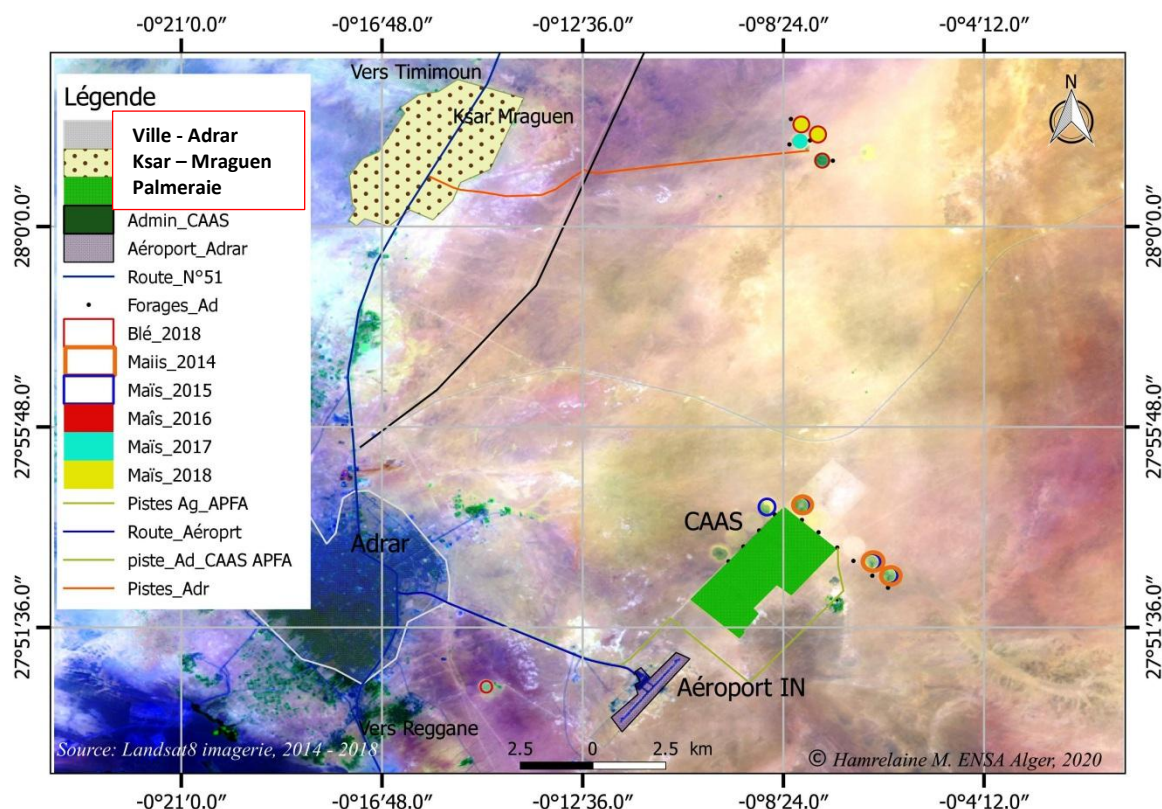


Figure 38 : Cartographie des cultures du maïs et du blé sous pivot dans le périmètre d'Adrar (Aéroport) - Adrar - 03/2018 Landsat8

I.3 Evolution de la superficie et du nombre de pivots par périmètre agricole

L'analyse des images satellitaires téléchargées a montré que le nombre de pivots (figure 39-a) est passé de 129 en 2013/2014 à 322 en 2017/2018 soit une augmentation de 149,61% tandis que la superficie irriguée (figure 39-b) estimée a presque doublé en l'espace de 5 campagnes ; elle a varié de 3119,90 ha, soit 5,20 % de la superficie attribuée, à environ 9769,18 ha (10,85 % de la superficie totale attribuée).

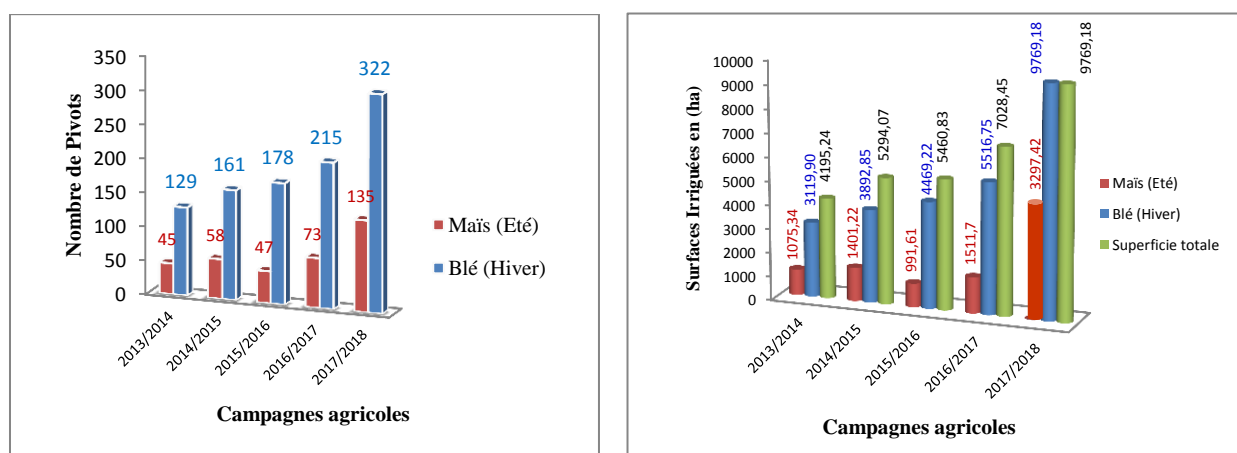


Figure 39: Nombre de pivots (a) et surfaces irriguées (b) par campagne de 2013 à 2018.

Tableau 22 : Comparaison entre les données estimées (télédétection) et observées

	Cultures	Campagnes	Données Estimées (Télédétectées)	Données observées (DSA/ ONAB)
Nombre de Pivots	Blé (DSA)	2013/2014	129	130
		2014/2015	161	150
		2017/2018	322	350
	Maïs (ONAB)	2013/2014	45	45
		2014/2015	58	63
		2015/2016	47	47
Surfaces Irriguées (ha)	Maïs (ONAB)	2013/2014	1075,34	1099
		2014/2015	1401,22	1458
		2015/2016	1000,61	1003

La lecture du tableau 22 et de la figure 40 permet de constater que pour les cultures de blé et du maïs, il y a une assez grande corrélation entre les données fournies par les institutions (DSA et ONAB) et celles estimée par télédétection.

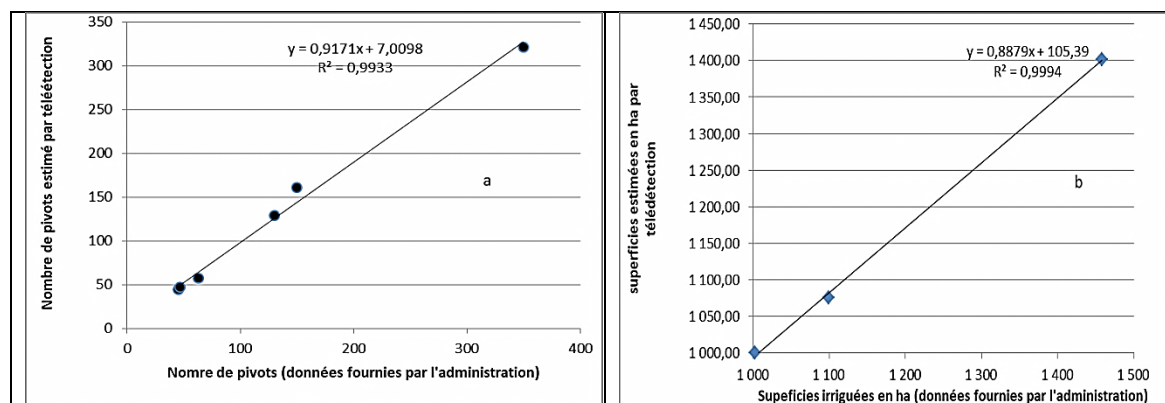


Figure 40: Courbes de corrélation entre les données estimées (télédétection) et observées (DSA/ ONAB) ; a) nombre pivots, b) surfaces emblavées

I.3.1. Evolution des superficies cultivées en maïs

A partir des données extraites des images satellitaires Landsat8 et Sentinel2 pour la période 2014-2018, nous avons pu constater que le nombre de pivots et les superficies consacrées au maïs ont triplé ; le nombre de pivots est ainsi passé de 45 (2013/2014) à 135 pivots (2017/2018) et la superficie correspondante a varié durant la même période, de 1 075,34 à 3 297,42 ha.

On note globalement que le nombre de rampes pivotantes dans les principales zones agricoles d'Adrar a nettement augmenté (figure 41). Même si ces zones ne sont pas au même niveau en termes de potentialités, il y a lieu d'affirmer que cette évolution traduit une dynamique d'investissement agricole bien soutenue. Et à titre indicatif, la zone de Zaouiet Kounta est considérée comme pionnière avec 61 pivots et une superficie de 1 427,4 ha en

2016. Ceci est dû à sa population qui a particulièrement réussi à développer le savoir-faire ancestral « agricole » qu'elle a acquis à travers le temps.

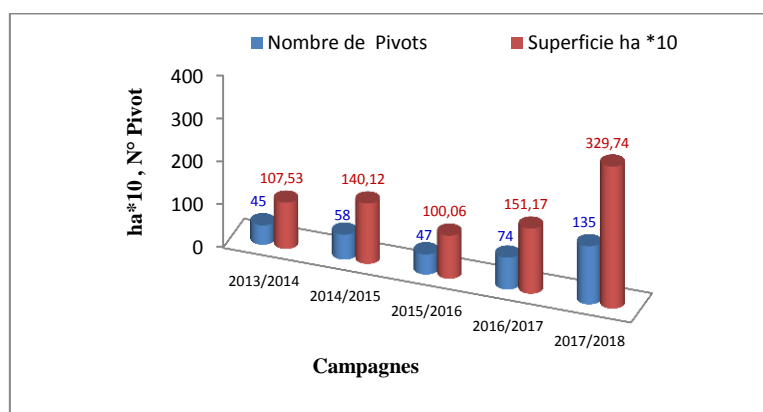


Figure 41 : Evolution de la superficie et du nombre de pivots.

En outre, une légère fluctuation a été observée dans le nombre de pivots durant les 4 campagnes de maïs. Cependant, la tendance générale indique une forte augmentation (figure 44) due, principalement, aux contrats signés entre les agriculteurs et l'office national de l'alimentation de bétail (ONAB). Le contrat prévoit l'achat de la production par l'ONAB à un prix attractif (4500 DA le quintal).

Notre enquête menée en 2016 /2017 a, cependant, révélé que cette stratégie a été vite abandonnée et le Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (MADR) a mis les producteurs de maïs directement en face des éleveurs pour négocier l'achat de leur production. Les agriculteurs ont ainsi opté pour se convertir au maïs fourrager (ensilage) au lieu du maïs grain pour parer au risque de l'écoulement de la production.

I.3.2. Surface moyenne irriguée par les pivots

L'exploitation des images satellitaires de différentes dates nous a permis de recenser des rampes pivotantes de différentes tailles. La plus petite superficie irriguée par cette machine a été de 10 ha et repérée à Tssabit et la plus grande a été de 44 ha à Mguiden . La superficie moyenne irriguée par pivots, entre 2013 et 2018, a été estimée à 26,22 ha pour le blé et à 22,52 ha pour le maïs (figure 42).

Ces tailles facilitent la maîtrise de l'irrigation. Car, dans la région d'Adrar, le contexte climatique est hyperaride, sec, se caractérisant également par de très fortes chaleurs, il serait quasiment impossible de concevoir une irrigation à l'aide de pivots de taille relativement grande. Au-delà de 30-40 ha, l'irrigation par pivot ne pourrait couvrir entièrement le cercle en été pour le maïs ; ce qui constitue une œuvre extrêmement délicate ou même une sérieuse limitation dans cette région.

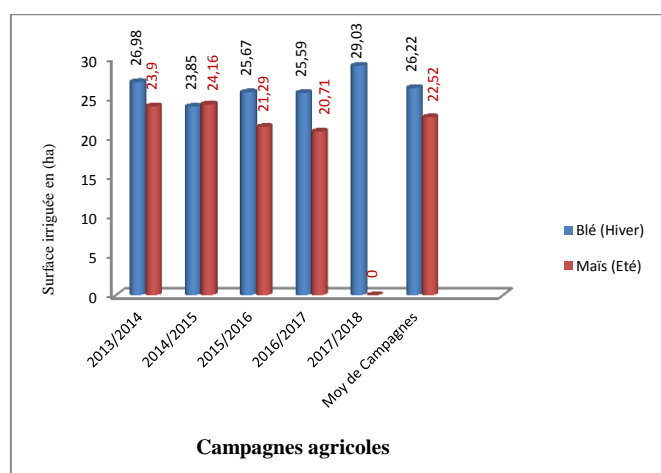


Figure 42: Surface moyenne d'un pivot par campagne agricole.

I.3.3 Conclusion

Après avoir présenté l'évolution des superficies et le nombre de pivots au cours des 5 campagnes, il est possible d'attribuer les augmentations qui ont été constatées à un bon nombre de facteurs qu'on peut résumer ci-dessous :

✓ Facteurs d'ordres techniques et liés au dispositif d'irrigation

- Disponibilité des rampes pivotantes de marque locale (société nationale Annabib de Bordj Bou Arréridj) et de marques étrangères (Valmont et Zimmatic d'origine Américaine et Otech et Irrifrance d'origine française). Le coût de ces machines est relativement accessible ; il oscille entre 4,7 et 6,5 millions de DA pour un pivot de 30 ha.
- Disponibilité de pièces de rechange et du service après-vente.

✓ Facteurs liés à la culture et à l'itinéraire technique

- Disponibilité des semences chez la CCLS et disponibilité des engrais et des produits phytosanitaires sur le marché national.
- Accompagnement et assistance technique : il s'agit du travail de proximité fourni par des ingénieurs consultants à titre privé.

✓ Facteurs ayant trait à la politique initiée par les pouvoirs publics

- Prix d'achat attractif pour le blé dur ; il a été fixé par l'État en juin 2008 à 4500 DA le quintal.
- Réduction du coût de l'énergie électrique de moitié en 2007.
- Facilitations accordées par l'État (MADR) pour favoriser le développement des zones irriguées : exemple du crédit sans intérêt « Rfig ».

I.4. Résultats de l'exploitation des images satellitaire GEP (Google Earth Pro)

I.4.1. Problème de chevauchement des images sur GEP

Les problèmes des images satellitaires issues de GE sont aléatoires dans le temps et dans l'espace. Il faut veiller de ne pas se tromper en navigant sur cette plate-forme. Dans la figure (43) deux dates différentes apparaissent sur la même image (écran) Google Earth. Les sorties réalisées sur le terrain et l'utilisation d'autres types d'image comme Landsat8 (figure 47) nous ont aidés à éviter ce type de problème.

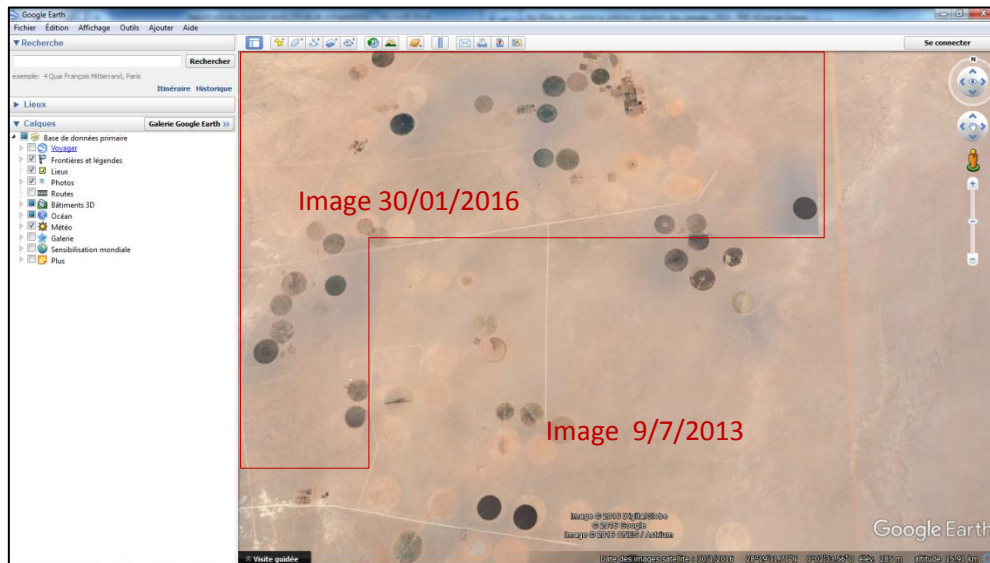


Figure 43 : Sur Google Earth (capture d'écran) deux dates sur la même image 9/7/2013 en bas et 30/01/2016 en haut)

Pour une bonne exploitation des images Google Earth, et afin d'éviter la superposition des images de dates différentes sur un même écran, il est primordial de recourir aux images Landsat8 et ce, pour confirmer la date de l'image recherchée. La figure 44 illustre la présence de deux images de dates différentes (2013 et 2016) sur l'écran. En réalité, sur la plateforme ou le serveur Earth Explorer de l'USGS, nous n'avons qu'une seule image, c'est celle de 2016 actualisée.

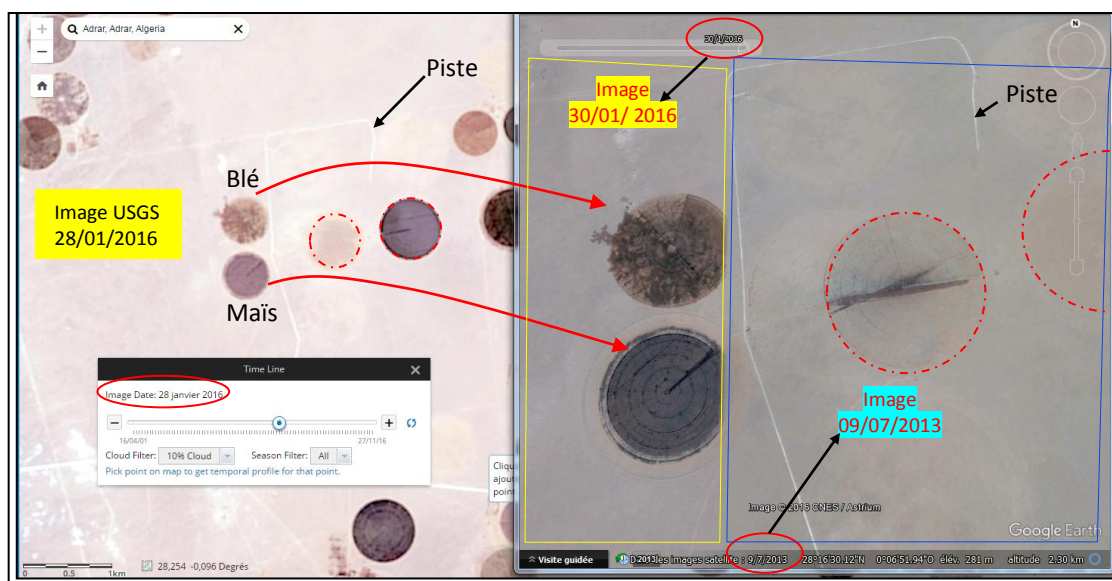


Figure 44 : Comparaison entre image landsat8 à gauche et image Google Earth à droite
Pivots maïs et blé : ferme TAMAZIRT à Tsabit

I.4.2 Réalisation de plan d'une exploitation

Les images à très haute résolution spatiale mises en ligne par Google Earth, sont souvent utilisées afin de numériser des polygones pour réaliser de simples plans. Dans la figure 45 nous avons pu tracer une esquisse pour la ferme agricole CCLS/OAIC située à Fenoughil (Baamer). Ce travail facilite le suivi et l'aménagement de la ferme.

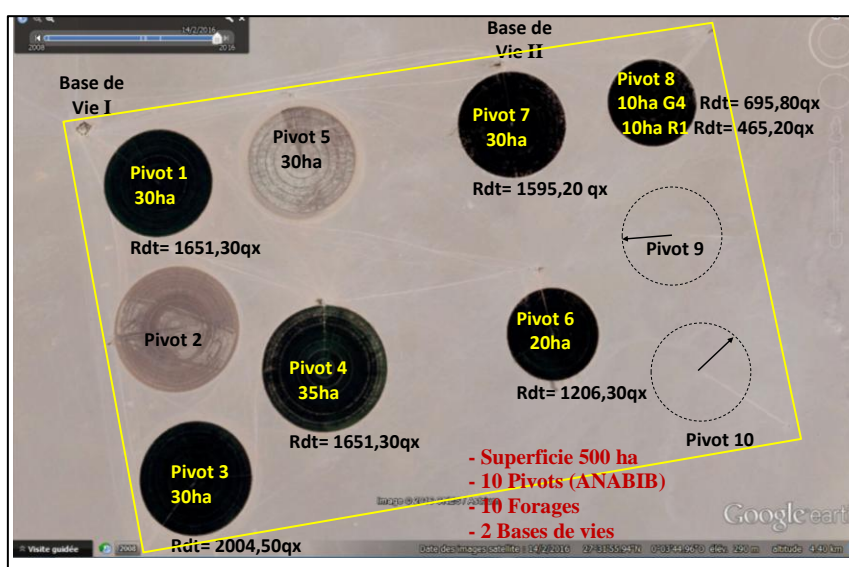


Figure 45: Tracé d'un plan de la ferme CCLS Adrar à Fenoughil sur GEP- campagne 2015/2016

I.4.3. Détection de l'état de pistes agricoles et accès à l'exploitation

L'analyse des images satellitaires de Google Earth montre que depuis le premier aménagement de mise en valeur (APFA), réalisé durant les années 90, aucune piste d'accès

n'a été réalisée (figure 46). C'est ce qui a été confirmé par notre enquête. Celle-ci a révélé que plus de 90 % des agriculteurs ont des difficultés pour accéder à leurs pivots. L'état de dégradation des pistes ne permet pas aux exploitants véhiculés de rouler à plus de 20 km/h. Cependant, pour les nouveaux concessionnaires de terrains, cette situation paraît encore plus grave à cause de l'absence totale de pistes aménagées à l'exception de celle apparaissant en bleu sur l'image Google Earth.

Cet état de fait contraint plusieurs agriculteurs à parcourir des distances de 40 km/jour en aller-retour sur des pistes et directions aléatoires.

L'éparpillement des sites réservés aux pivots sur une superficie de plus de 80 km² (cas de Zaouiet Kounta), est une autre contrainte qui rend difficile le suivi de la culture, la maintenance des équipements et le transport de la récolte.

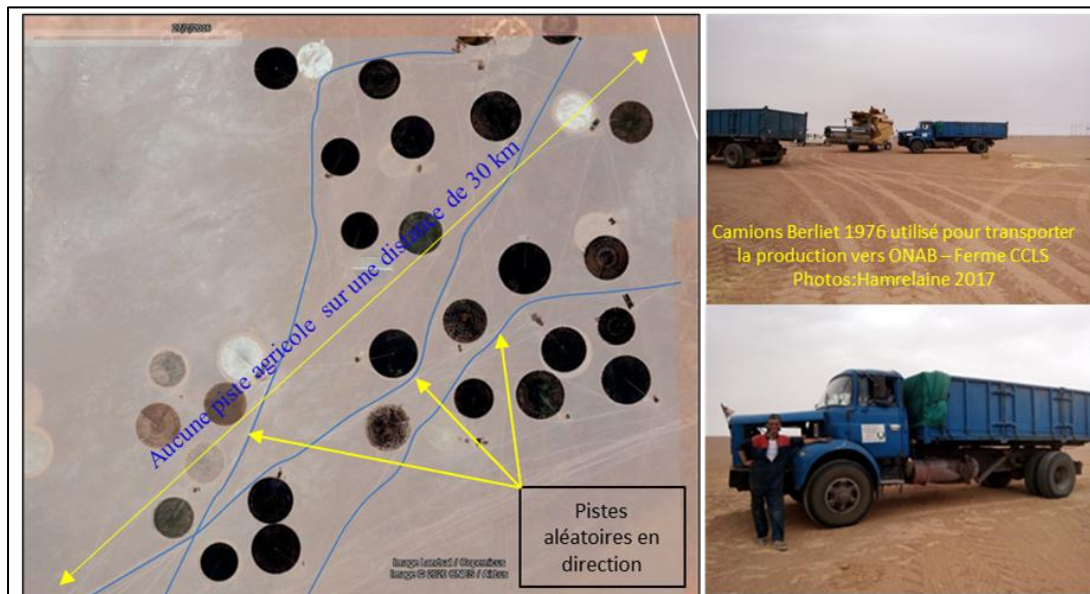


Figure 46: L'image montre l'absence de pistes Agricoles, mis à part celle en bleu - Périmètre de concession de Zaouiet kounta - Image Google earth 2016

I.4.4. Localisation des Forages qui alimentent les pivots

Les forages (points d'eau) et même les traces de tuyaux enterrés d'alimentation des pivots sont aisément détectables à partir des images Google Earth. Cette avantage technique n'est, cependant, pas offert par Landsat8 ni par Sentinel2.

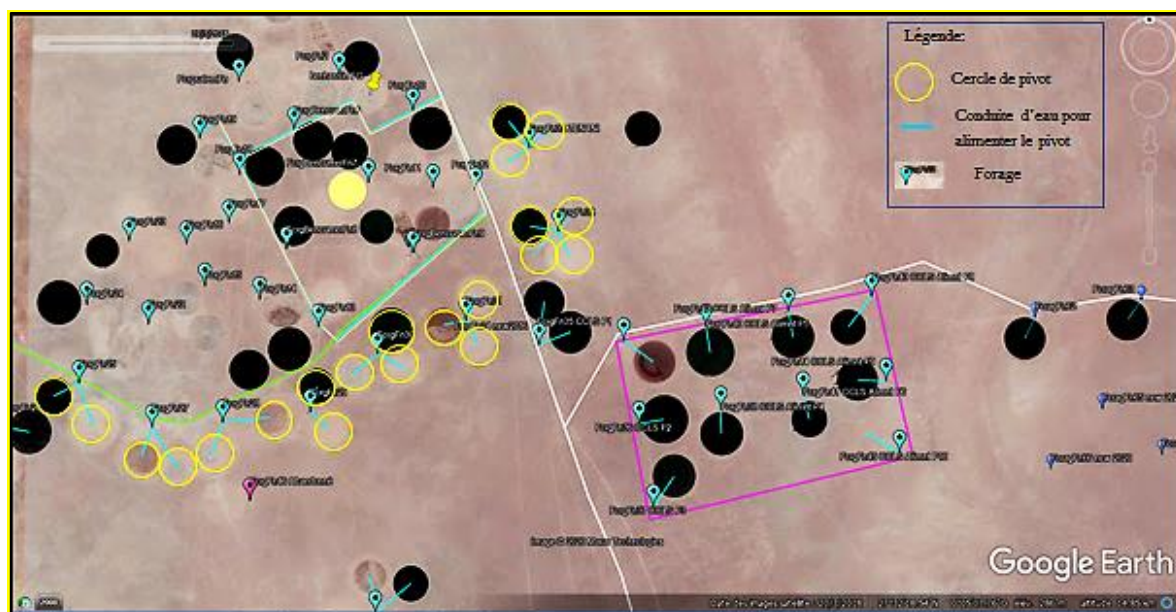


Figure 47: Localisation de forages dans le périmètre de Fenoughil - Image G Earth 2018.

Toujours à travers la série d'images GEP, nous avons pu expliquer les cercles de pivots qui apparaissent non cultivés. Kozmin (2010) les considère comme étant abandonnés.

À partir de l'analyse du diagnostic de l'exploitation réalisé sur le terrain, l'agriculteur peut envisager plusieurs façons pour garder la propriété de son terrain. Pour mieux expliciter cette situation, nous avons choisi le cas d'un agriculteur qui possède 100 ha et qui dispose d'un seul forage pour un pivot de 30 ha. Cette situation requiert deux explications possibles: **i)** soit, l'agriculteur n'a pas suffisamment de moyens (financiers et techniques) pour mettre en valeur la superficie restante (70 ha); ce qui l'oblige à déplacer le pivot chaque campagne juste à côté du premier cercle avec l'installation d'une nouvelle conduite raccordée au forage existant pour alimenter une nouvelle superficie de 30 ha. De cette manière et au bout de 5ans, il parvient à la mise en valeur des 100 ha attribués. Cependant, du point de vue juridique, l'agriculteur est confronté aux stipulations de la circulaire interministérielle n° 750 du 18 juillet 2018 portant assainissement du foncier agricole. Les stipulations de cette circulaire évoquent le recours de l'État à la récupération du terrain agricole non exploité si aucune action de mise en valeur n'est menée durant les 5 ans après son attribution. L'État peut procéder dans ce cas à une réattribution d'office selon la procédure en vigueur; **ii)** soit, l'agriculteur pratique la jachère pour nettoyer les parcelles envahies par les mauvaises herbes ou affectées par un taux de salinisation secondaire élevé (situation rare). Dans les deux cas de figures, l'exploitant a des arguments plausibles pour rester aussi longtemps bénéficiaire du terrain qui lui a été attribuée.

I.4.5. Détection de pratique agricole

Les Images Google Earth offrent une opportunité cruciale dans la détection des pratiques agricoles comme la préparation du sol, la pré-irrigation (faux semis) et la récolte (figure 48).

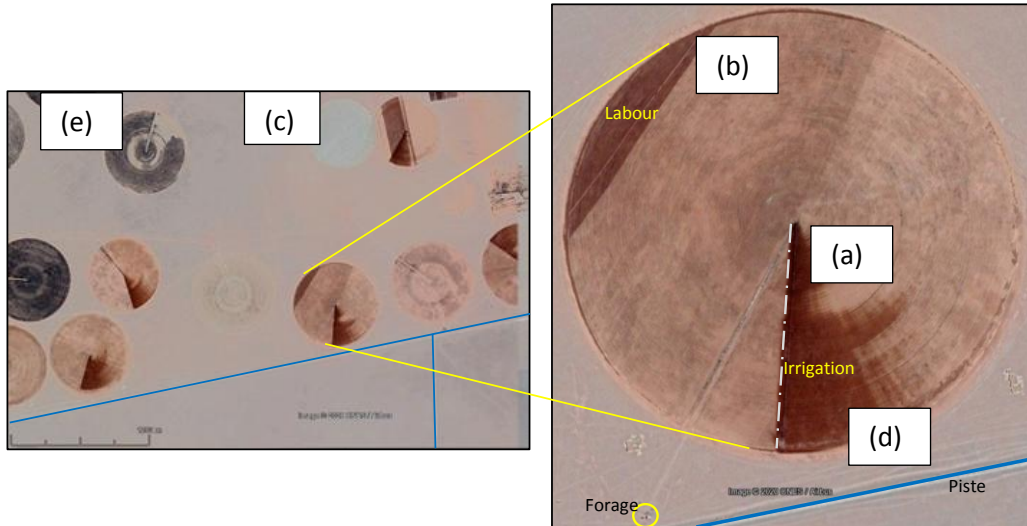


Figure 48 : Image GEP, détection des pratiques agricoles, des parcelles circulaires sous pivots : pré-irrigation (a), travail du sol (b), récolte (c) piste agricole (d) et des anciennes parcelles (e) - dans le Périmètre de Tsabit.

L'analyse poussée de cette image donne avec plus de précision la superficie et le nombre de travées de pivot jusqu'à pouvoir connaître la longueur de chaque travée.

I.4.6. Combinaison entre les images GEP et Landsat8

La complémentarité de l'information, entre la plate-forme GEP d'une part et les autres images satellitaires tels que landsat8 et sentinel2 d'autre part, facilite l'interprétation des pratiques agricole et le suivi de la culture. La combinaison de ces deux sources d'image ont permis de visualiser les choses suivantes :

a- Détection d'une opération de récolte du maïs

Images Landsat8 28/01/2016, Maïs
Difficulté de percevoir le démarrage de la récolte comme le montre l'image GE du 14/02/2016

- Les pivots en rouge (a) - la culture du blé
- un pivot en pleine récolte (80%) en haut à gauche
- l'image (b) - l'indice de végétation NDVI
- l'image (c) représente l'indice d'humidité

Images Google Earth THR du 14/02/2016, Maïs
- (d) Maïs au stade de senescence, le pivot du bas démarrage de la récolte, la moissonneuse batteuse est en plein chantier de moisson.

- (e) un pivot de maïs récolté, la production a été ramassé sur un bache pour être ensuite transporter et livré à l'ONAB.
- Les pivots en noir représentent la culture du Blé

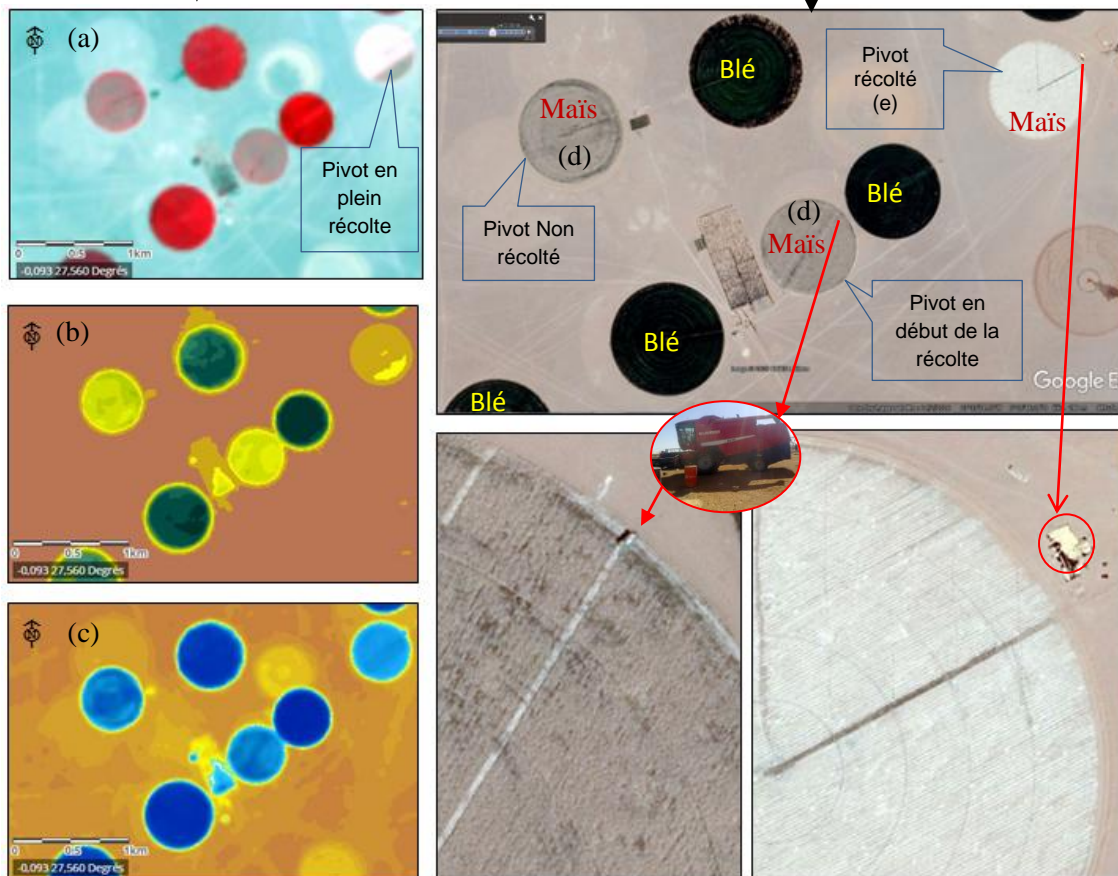


Figure 49 : Combinaison entre les images GEP et Landsat8 pour une meilleur interprétation. Ces images montrent clairement l'opération de récolte et elles permettent aussi de visualiser la moissonneuse batteuse (MB), le camion de transport et le maïs récolté stocké en plein air. Lorsqu'elles se présentent les images GEP facilitent l'interprétation des images issues de Landsat8 et ou sentinel2.

b. Détection de l'irrigation

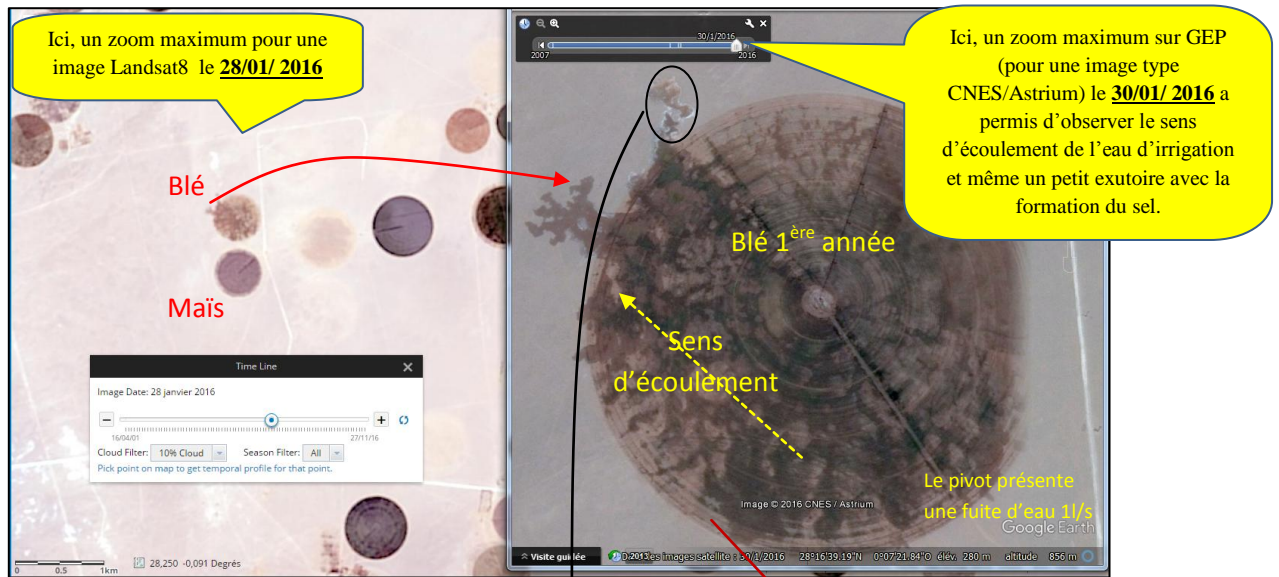


Figure 50 : Combinaison entre les images GEP et Landsat8 pour détecter l'irrigation
c. Images capturées sur le terrain (avec un Smart phone OPPO 5)



Figure 51: Champs du blé, les Espaces vides apparaissent dans l'image GEP avec l'exutoire et la formation des sels. Source : Photos Hamrelaine 7/04/2016



Figure 52 : Champs de maïs, les espaces vides dépourvus de maïs avec un excès d'eau d'irrigation. Source : Photos personnelle 24/10/2015

I.4.7. Classification des images, Google Earth, par photo-interprétation

Ce sont des images (figures 53, 54 et 55) enregistrées sur GEP sous format (type JPEG) leurs traitement sur Arcgis nous a permis d'estimer le taux de la superficie emblavée perdu ou non productive. Au total six classe ont pu être détecté d'une végétation dense jusqu'à la classe sol nu.

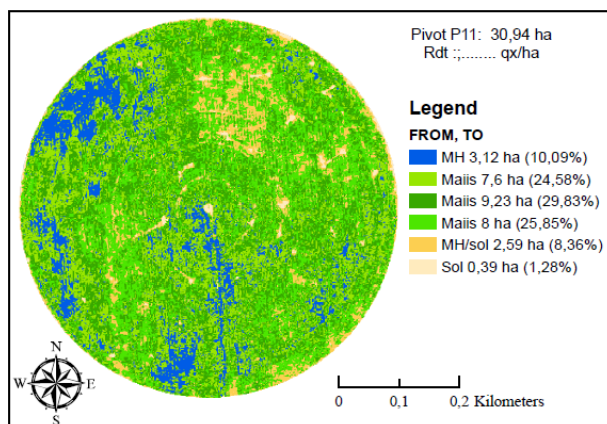


Figure 53 : Maïs Sous Pivot 11- DAAMECHE- Aéroport - Adrar – Campagne 2015/2016 - Image du 14/02/2016 Google Earth

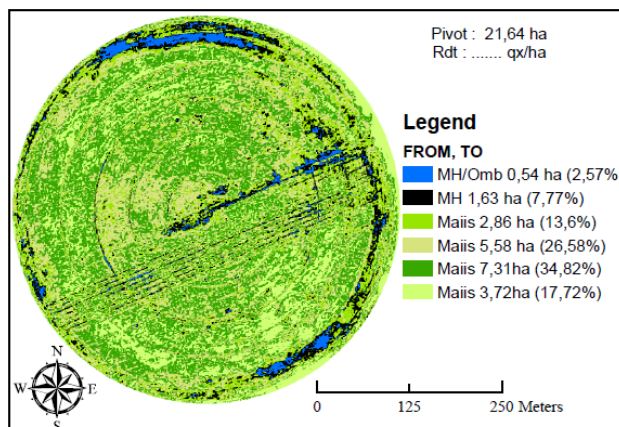


Figure 54: Maïs S/Pivot 2- BENOUMER 2- Fenoughil- Adrar - Campagne 2015/2016 - Image du 14/02/2016 Google Earth

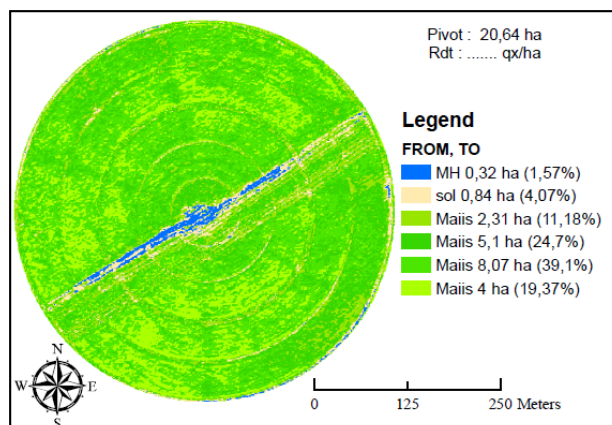


Figure 55: Maïs S/Pivot- OUALI- FN- Adrar - Campagne 2015/2016 - Image du 14/02/2016 Google Earth

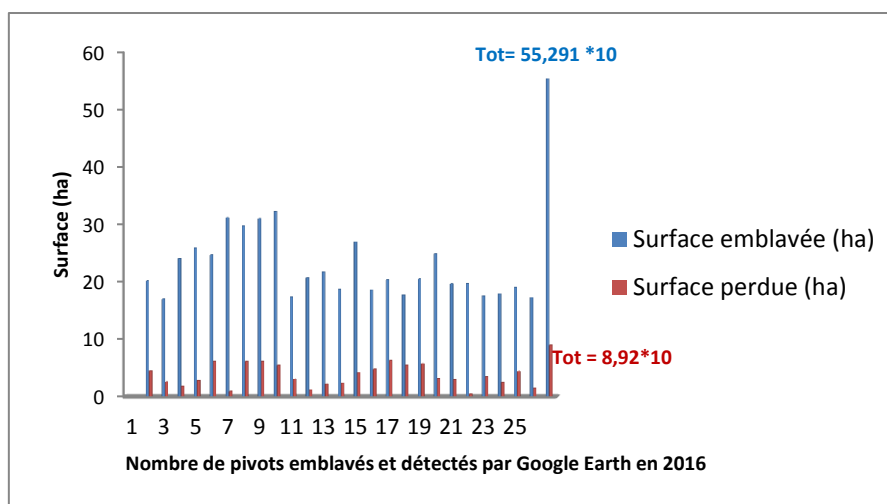


Figure 56: Surfaces emblavées perdues (non productive) par manque de levée
Le nombre de pivots que nous avons pu détecter par GEP durant les trois campagnes de suivi est de 25 Pivots emblavés (Annexe 6- tableau 1) de maïs pour la campagne (2014/2015) répartis dans les différents périmètres pour une superficie de 552,91 ha dont 89,22 ha représentant une surface marquée par une absence de maïs et classée comme non productive (perdue) soit 16% de la surface détectée (figure 56).

I.5. L'exploitation des images satellite Landsat8 et sentinel2

I.5.1. Détection de quelques pratiques agricoles

I.5.1.1 Détection de travail du sol

La détection des parcelles venant juste d'être labourées, semées ou encore irriguées représente une information utile dans la gestion de la GMV et dans l'estimation du rendement qui sera décrit plus loin. La figure 57 montre une carte permettant de distinguer ces différentes opérations sur le périmètre de Tsabit/Sbaa.

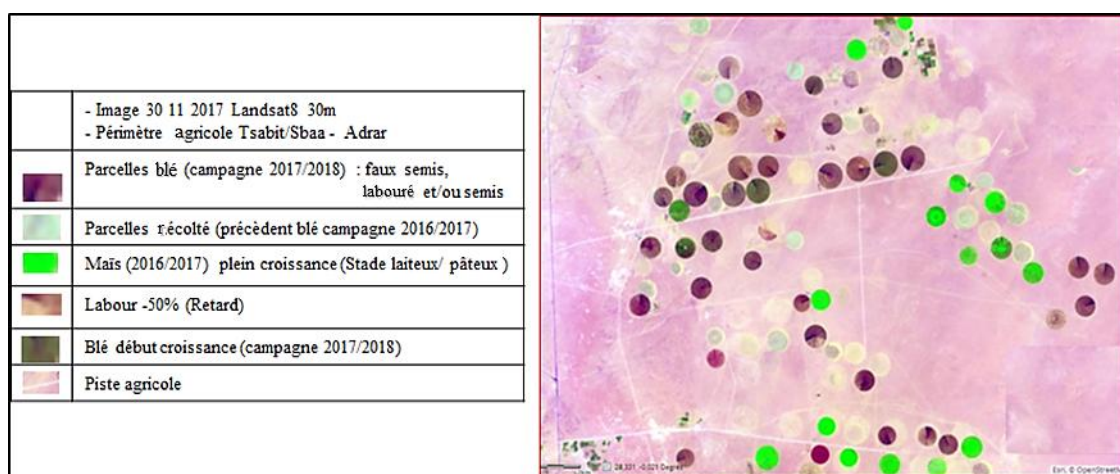


Figure 57: Exemple montrant la cartographie des zones de céréales récoltées, labourées ou pas encore récoltées sur une image Landsat8 30/11/2017, résolution 30m: (a) Composition colorée (Proche IR/Rouge/Vert)

L'image de la figure 57 a été obtenue à partir de l'image Landsat8 de 30/11/2017. Elle résulte de l'analyse de la composition colorée réalisée à partir des réflectances dans la bande spectrale du vert. L'état de surfaces durant différentes opérations agricoles peuvent être distingués en utilisant les signatures spectrales. Selon le calendrier du système de culture suivi dans la région, les signatures spectrales des différents états de surface se distinguent nettement, en particulier les labours montrent des valeurs de réflectances beaucoup plus faibles que des sols venant d'être semés car le labour tend à augmenter la rugosité de la surface, et l'humidité de surface apparaît plus importante qu'un sol non travaillé. Ces deux facteurs ont pour effet d'abaisser la réflectance. A l'inverse, un sol venant d'être semé a subi un travail de préparation du lit de semence caractérisé par une rugosité plus faible, la surface tend alors à s'assécher, les réflectances sont donc légèrement plus élevées pour une même texture de sol qu'un sol fraîchement labouré. L'image permet même d'identifier les pivots irrigués des non irrigués.

1.5.1.2 Détection de la rotation ou de l'assolement de culture

La détection de rotation ou d'assolement entre les parcelles de pivots emblavées de blé ou de maïs est facilement repérable en utilisant la composition colorée. L'exemple de la ferme CCLS (figure 58) à Fenouhail illustre très bien cette opération de rotation.

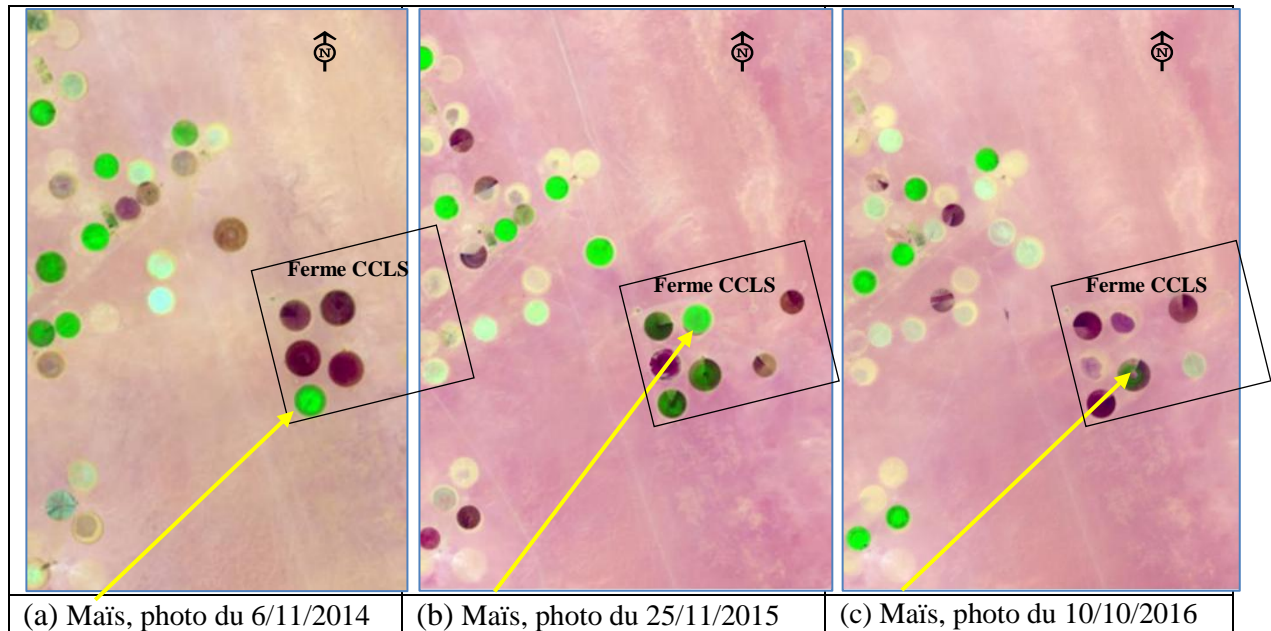


Figure 58: Trois campagnes de maïs, exemple ferme CCLS à Fenouhail.

I.5.1.3 Détection du problème de levée (terrain/image)

Le traitement d'images, par combinaison des bandes, a permis de réaliser une chronologie de suivi d'un pivot emblavé du maïs au niveau de la ferme de la CCLS. Dans cette chronologie (tableau 23), l'Agriculture (l'aspect de la végétation) est issue de la combinaison de trois bandes Bleu (B2), proche infrarouge (B5) et la courte infrarouge 1 (B6). Dans l'image, le vert représente une végétation vigoureuse et saine. Les zones peu végétalisées et dénudées apparaissent brunes et mauves.

L'indice d'humidité par différence normalisée (moisture index) est le produit de B6 et B7 (courte infrarouge 2) qui estime les niveaux d'humidité dans la végétation. La série des images présentées dans le tableau 26 montrent des zones humides et d'autres zones de végétation avec des niveaux élevés d'humidité apparaissent en bleu tandis que les sols nus (déserts) apparaissent de bronzage à brun. C'est qu'à partir du 10/10/2016 que nous pouvons observer clairement la souffrance du maïs sous pivot dans sa partie Nord/Est (stressé). Un constat est présenté en bas dans le volet diagnostique. Cependant, une nette amélioration de la couverture totale du pivot est présentée en 29/12/2016. A partir du stade de la sénescence le contraste de couleur est en nette diminution. Concernant les indices de végétation on remarque une nette présentation de la végétation pour l'indice de végétation amélioré (EVI) par rapport à l'NDVI. L'EVI est un indice de végétation "optimisé" conçu pour améliorer le signal de végétation avec une sensibilité améliorée dans les régions à forte biomasse comme le montre l'image du 29/12/2016. En revanche, cet indice permet une surveillance améliorée de la végétation grâce à un découplage du signal de fond de la couverture végétale et une réduction des influences atmosphériques.

Tableau 23 : Chronologie de développement d'un pivot du maïs du semis à la récolte
ferme CCLS - Pivot N°4 : date de semis le 01/08/2016

Indices (selon la combinaison des bandes)	Date de l'image							
	23/08/2016 22 Jours	08/09/2016 38 J	10/10/2016 68 J	29/12/2016 118J	14/01/2017 132 J	30/01/2017 148J	15/02/2017 163 J	03/03/2017 181J
<u>Agriculture</u> B2 Bleu B5 Proche infrarouge B6 Courte onde infrarouge 1								
<u>Humidité</u> B6 Courte onde infrarouge 1 B7 Courte onde infrarouge 2								
<u>NDVI</u> B4 Rouge B5 Proche infrarouge								
<u>EVI</u> B2 Bleu B4 Rouge B5 Proche infrarouge								
	Irigation Stade émergence	Stade émergence 2 feuilles	Irigation Stade 4-6 feuilles	Irigation Maturation	Arrêt d'irigation	Arrêt d'irigation	Début de récolte	Fin de Récolte

1.5.1.4 Détection de la récolte via Landsat8

La détection de parcelle en début de la récolte, en pleine récoltée ou récolté avec des résolutions d'image 10 m ou 30 m est possible. La figure 59 montre un exemple de détection de moisson du maïs sous deux pivots en pleine récolte à Fenoughil. Cependant, il est impossible de détecter la moissonneuse batteuse ou la production ramassée comme il a été observé ou détecté par les images Google Earth. A travers ces images, nous avons la possibilité de distinguer les différentes opérations dans un temps de moins de 16 jours.

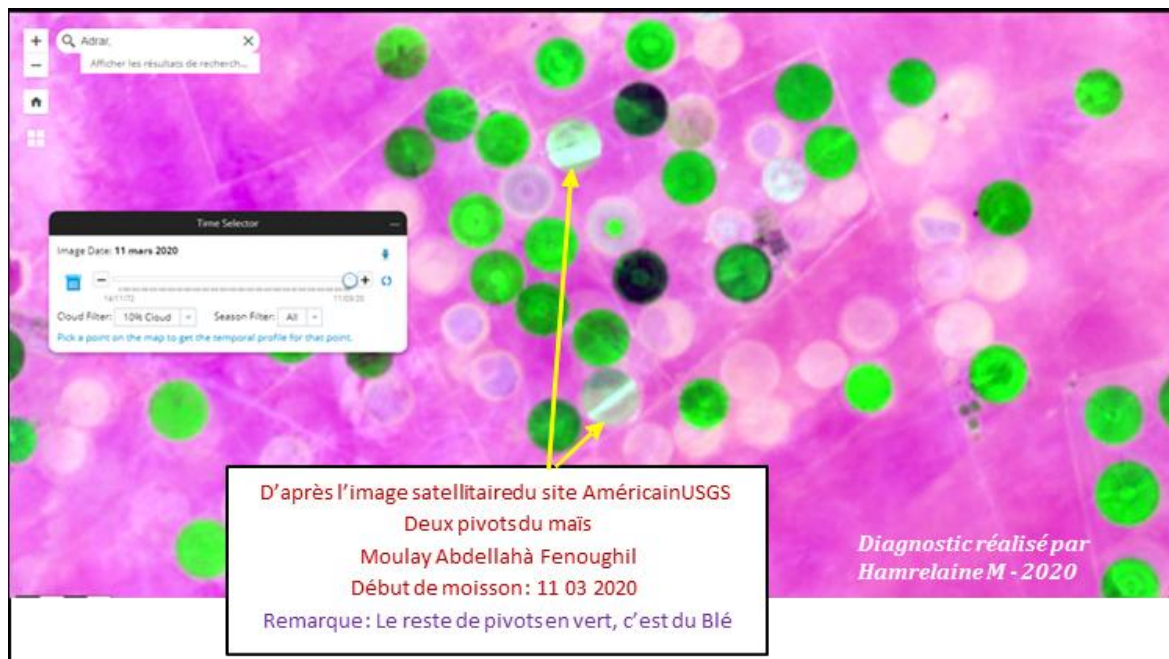


Figure 59: détection du début de la moisson du maïs sous deux pivots à Fenoughil, image Landsat 8 du 11/03/2020

1.5.2. Calcul des indices de végétation et l'estimation de rendement

Les images Landsat8 et Sentinel2 nous a permis de calculer les indices de végétation (NDVI et EVI) et d'élaborer les modèles d'estimation du rendement. Grâce aux conditions atmosphériques de la zone d'étude souvent caractérisée par un ciel clair et dégagé de tout obstacle, les images obtenues sont nettes et ne nécessitent aucun traitement préalable. Cet avantage a permis d'avoir des estimations précises de rendement et très proches de la réalité.

Conclusion :

Pour la télédétection, notre analyse a, essentiellement, porté sur l'interprétation des images satellitaires issues de différents capteurs tels que Google Earth pro, Landsat8 et Sentinel2. Ces images ont été exploitées pour cartographier la répartition spatiales de pivots emblavés de céréales (blé et maïs) dans les différents périmètres de la wilaya d'Adrar et même pour le suivi des pratiques agricoles depuis la pré-irrigation, le labour et l'irrigation jusqu'au stade récolte. En fonction de ces résultats, il est possible d'arriver à mieux suivre le calendrier du système de culture dans cette région saharienne. Parce que, il est nettement facile de distinguer les différents états de surface du sol et même d'identifier les pivots qui sont en cours de fonctionnement et de distinguer, avec assez de précision, les surfaces irriguées de celles qui ne le sont pas et de différencier entre la culture du maïs de celle du blé.

Aussi, ce volet a permis l'identification des pivots aptes pour les calculs des indices de végétation (NDVI et EVI) et pour la réalisation des modèles d'estimation de rendement.

II. Modèles d'estimation du Rendement

II.1. Estimation du rendement

II.1.1. Calculs de l'Indice de Végétation par Différence Normalisée (NDVI)

Les résultats obtenus par l'NDVI (Annexe 2a) indiquent que les parcelles cultivées n'ont pas une densité de végétation homogène. Des parties de sol nu ou de très faible végétation ont été détectées.

Tableau 24 : Valeurs des indices de végétation selon les classes d'NDVI.

Ensemble de végétation	Végétation dense			Végétation clairsemée			Végétation faible	
	2	3	4	5	6	7	8	9
Classes	2	3	4	5	6	7	8	9
Valeur NDVI	0,8 à 0,9	0,7 à 0,8	0,6 à 0,7	0,5 à 0,6	0,4 à 0,5	0,3 à 0,4	0,2 à 0,3	0,1 à 0,2
ST %	0,09	24,66	35,17	15,79	9,72	6,20	4,40	3,53

Pour cet indice, la classe 1 caractérisée par la plus forte densité (NDVI \approx 1) n'est pas détectée. C'est la classe 4 ayant NDVI entre 0,6 et 0,7 (tableau 24) qui présente une grande partie de la superficie emblavée. De même, un nombre important de pivots ne présentent pas la classe 2 où l'NDVI varie 0,8 à 0,9 (figure 60). Une forte densité de végétation comme celle appartenant à la classe 1 ou à la classe 2 pourrait être un indicateur d'infestation du sol par les adventices.

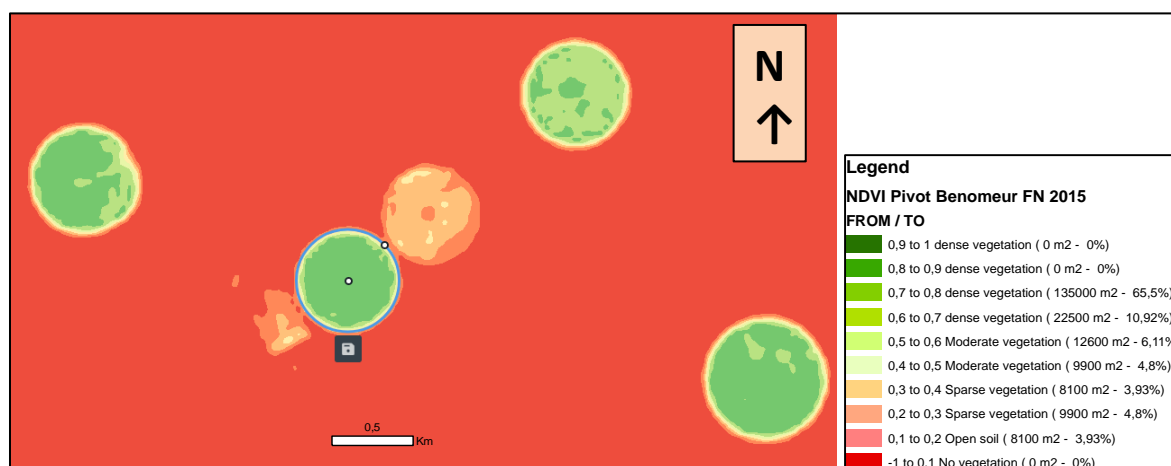


Figure 60 : Exemple de différentes classes de NDVI d'un pivot de maïs situé dans le périmètre de Fenoughil selon les valeurs des indices de végétations, les surfaces et le taux de chaque classe.

II.1.2. Calculs de l'Indice de végétation amélioré EVI

L'indice de végétation amélioré EVI (Annexe 2b) selon les classes a donné les valeurs indiquées dans le tableau (25).

Tableau 25: Valeurs des indices de végétation selon les classes d'EVI

Etat de végétation	Végétation dense			Végétation clairsemée		Sol nu
Classes	1	2	3	4	5	6
Valeur d'EVI	0,8 à 1	0,6 à 0,8	0,3 à 0,6	0,2 à 0,3	0,1 à 0,2	0 à 0,1
Superficie totale %	31,95	31,01	27,72	4,92	4,12	0,29

Trois classes ont montré un EVI < 0. Il s'agit de la classe 7 à EVI allant de 0 à -0,3 correspondant à l'eau ou un sol nu ainsi que deux autres classes (classes 8 et 9) à EVI variant, respectivement de -0,3 à -0,6 et de -0,6 à -1 indiquant la présence de la neige. De même, la représentation des classes diffère d'un pivot à un autre. Un bon pivot est celui où la classe 1 est représentée par une très grande superficie, tandis que les classes à $EVI \leq 0,1$ sont inexistantes (figure 61).

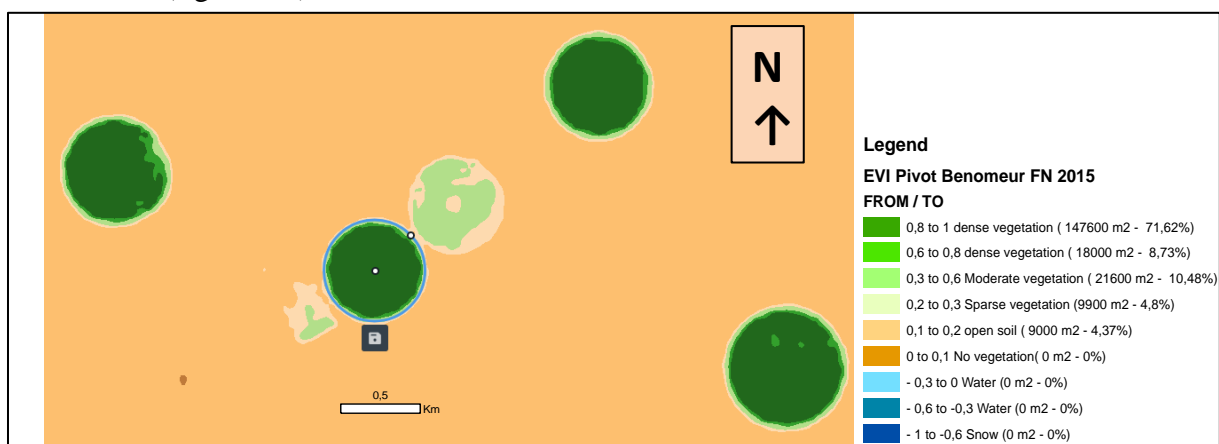


Figure 61: Exemple de différentes classes d'EVI d'un Pivot de maïs situé dans le périmètre de Fenouhnil selon les valeurs des indices de végétation, les surfaces et le taux de chaque classe.

Dans l'ensemble, à travers les résultats obtenus, les 6 classes sont bien représentées. La classe 2 est la plus vaste avec une superficie globale de 31,01 % suivi de la classe 1, avec un taux de la superficie de l'ordre de 27,72 %. Le sol nu est aussi représenté mais avec un taux plus faible qui ne dépasse guère 0,29 % par rapport à la superficie totale.

II.2. Modèles d'estimation des rendements

II.2.1. Modèle d'estimation des rendements par le NDVI

Le résultat d'implémentation de la régression robuste sur le logiciel MATLAB a donné les valeurs suivantes pour les deux coefficients de régression $\beta_1 = 61,49$ et $\beta_2 = 20,81$. La constante $C = 1,149$. Donc, l'équation d'estimation de rendement (Rdt) est de la forme suivante :

$$\mathbf{Rdt}_{\text{NDVI}} = 61,49 \text{ NDVI}_1 + 20,81 \text{ NDVI}_2 + 1,149 \quad (6)$$

II.2.2. Modèle d'estimation de rendement par l'EVI

Dans ce cas, le modèle est construit par trois variables indépendantes EVI_1 , EVI_2 et EVI_3 . Le résultat d'implémentation de la régression robuste sur MATLAB a donné les valeurs suivantes pour les trois coefficients de régression $\beta_1 = 66,03$, $\beta_2 = 34,54$ et $\beta_3 = 20,44$. La constante $C = 4,79$. Donc, l'équation d'estimation de rendement est de la forme suivante :

$$\mathbf{Rdt}_{\text{EVI}} = 66,03 \text{ EVI}_1 + 34,54 \text{ EVI}_2 + 20,44 \text{ EVI}_3 + 4,79 \quad (7)$$

II.2.3. Critères de performance

Il est évident que le modèle construit par l'utilisation d'EVI est plus performant que celui construit par l'utilisation des indices d'NDVI (Tableau 26) car l'erreur relative MARE (17,30 %) est nettement inférieure à celle obtenue en utilisant l'NDVI (20,35 %).

Tableau 26: Critères de performance des modèles selon les deux types d'indices de végétation.

Indice de végétation		r	RMSE (q/ha)	MAE (q/ha)	MARE %
NDVI	RR	0,71	8,30	7,17	20,33
	RM	0,71	8,30	7,17	20,35
EVI	RR	0,77	7,44	5,99	17,21
	RM	0,77	7,45	6,00	17,30

RR : Régression Robuste, RM: Régression Linéaire Multiple

Dans les deux cas, l'utilisation de la régression robuste donne des résultats légèrement meilleures que ceux de la régression linéaire multiple.

II.2.4. Paramètres statistiques

Les paramètres statistiques des rendements observés et les rendements estimés par les deux indices sont présentés dans le tableau 27. Il a été constaté que les paramètres des rendements estimés sont généralement plus proches les uns des autres par rapport aux rendements observés. Cependant, les paramètres des rendements estimés par les indices EVI sont légèrement plus proches que ceux des rendements estimés par les indices NDVI.

Tableau 27: Comparaison des paramètres statistiques des rendements estimés par les deux types d'indices de végétation.

Paramètres	Rendements q/ha		
	observés	estimés /EVI	estimés /NDVI
Moyenne	41,78	41,77	41,78
MIN	6,95	10,50	10,23
MAX	68,89	65,23	57,80
Ecartype	15,68	13,76	13,25
Médiane	40,92	44,12	43,82

La comparaison graphique entre les rendements observés et les rendements estimés, par les types d'indices de végétation NDVI (figure 62) et EVI (figure 63), montre que

généralement les deux graphiques prennent les mêmes allures. Néanmoins, la série de points des rendements estimés par les indices EVI est plus proches de la série de points des rendements estimés par les indices NDVI.

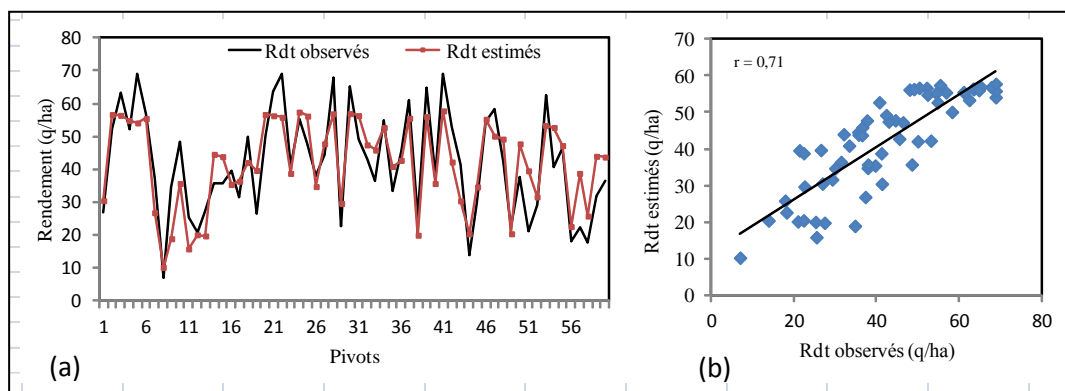


Figure 62 : Comparaison graphique (a) et régression linéaire (b) entre les rendements estimés par les indices NDVI et les rendements observés.

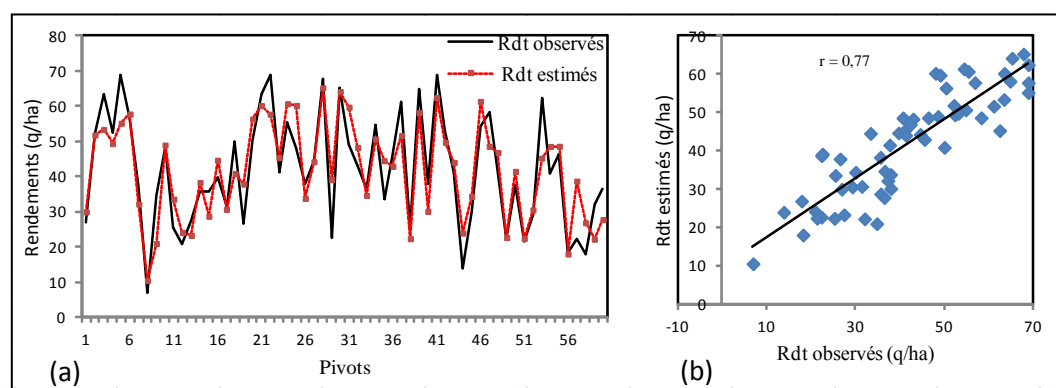


Figure 63: Comparaison graphique (a) et régression linéaire (b) entre les rendements estimés par les indices EVI et les rendements observés..

De même, la liaison entre les rendements estimés par les indices EVI ($r = 0,77$) est légèrement plus élevée par rapport à celle estimée par les indices NDVI ($r = 0,71$). La valeur de R^2 obtenue en utilisant NDVI est plus proche de celle obtenue ($r = 0,7$) par **Lillian et Lin (2018)**. Ces deux valeurs sont inférieures à $r = 0,77$ obtenues dans la présente étude en utilisant les indices de végétation EVI. D'après les résultats obtenus, l'utilisation des indices de végétation NDVI et EVI permettent de prédire le rendement du maïs dans la région d'Adrar avec une bonne précision, sans faire appel à beaucoup de traitement et d'ajustement de l'image. Ceci est dû à la visibilité du ciel pendant la période de prise de photos aériennes. De plus, les valeurs des indices EVI et NDVI durant 65 à 80 jours après la date de semis donnent de bonnes estimations des indices de la végétation qui reflètent les rendements attendus. Cette période correspond aux périodes de floraison et de remplissage du grain de maïs dans la région d'étude. Cet intervalle (de jour) est lié, **PROBABLEMENT**, au cycle de la

variété (précoce / tardif). Ces valeurs coïncident avec le moment de prédiction du rendement en Amérique centrale qui est environ de 65 à 75 jours après la date de semis en utilisant les mêmes indices de végétations que ceux utilisés par **Bolton (2013)**. Cette cohérence peut être due à la même longueur de la saison de croissance et au stade tardif du remplissage du grain dans notre région (wilaya d'Adrar). Les chercheurs s'accordent généralement pour dire que la période optimale de prévision du maïs s'étend de la floraison au développement de l'épi, soit 50 et 70 jours après la date de semis pour **Wang (2014)**. Le maximum de l'EVI peut aller jusqu'à 90 jours après le semis selon Chen (2006). Cette période correspond à la formation de soies et au développement des épis, ce qui est en accord avec un certain nombre d'études du rendement de maïs (**Omoyo, 2015** et **Wang, 2014**). Dans cette étude, l'EVI a montré une aptitude prédictive élevée dans l'estimation du rendement du maïs par rapport à l'NDVI. Le même constat a été signalé par **Son et Zhang (2014)**.

II.2.5. Amélioration des performances des modèles

La précision des modèles aurait pu être meilleure si un certain nombre de contraintes ont été surmontées : le matériel de moisson - battage inadapté provoque beaucoup de pertes à la récolte, elles pourraient atteindre dans certains cas 20 à 40 % de la récolte totale. Le non-respect du taux d'humidité à la récolte provoque des pertes de la production. L'infestation des champs de maïs par les adventices est une source importante d'erreur d'imagerie, elle limite aussi l'obtention d'un bon rendement.

III. Diagnostic socio-économique et technique

Introduction

Le diagnostic socio-économique est une enquête qui s'appuie sur la composante socio-économique pour appréhender le fonctionnement des exploitations et ses interactions avec le milieu naturel et l'environnement socio-économique de la zone d'étude. Cette méthode de diagnostic vise également à établir une relation avec l'approche de télédétection pour l'estimation du rendement du maïs.

III. 1. Diagnostic socio-économique

Le diagnostic socio-économique a révélé une diversité dans la composante humaine qui travaille dans les exploitations étudiées. Les multiples visites effectuées dans ces sites agricoles ont montré que dans la plupart du temps, ce sont des jeunes et membres de la famille qui interviennent dans les différentes opérations que requière la gestion agricole.

Le manque d'expérience laisse penser que ces jeunes interrogés n'ont pas pu nous livrer des informations assez précises.

III.1.1. Diagnostic sociologique

III.1.1.1. Classe d'âge

Dans l'ensemble, 3 périmètres ont été visités et l'âge moyen des 41 chefs d'exploitations qui y ont été approchés est de 50 ans soit 51,3 %. L'âge moyen minimum est de 27 ans et a été enregistré à Zaouiet K/Inzagmir et le maximum a été de 70 ans et concerne le site Fenoughil (figure 64).

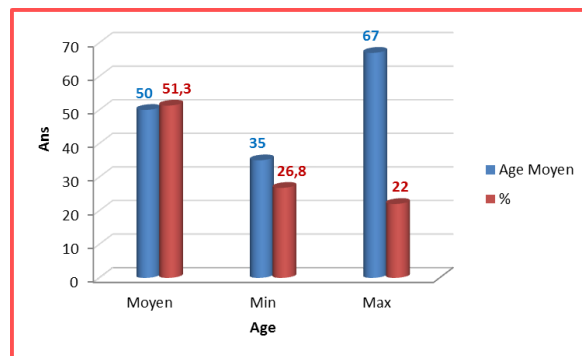


Figure 64: Age moyen des chefs d'exploitations dans trois périmètres.

Différentes classes d'âge ont été distinguées et plus du quart des exploitants (26 %) présente un âge inférieur à 40 ans ; ceci justifie l'engouement des jeunes et l'intérêt qu'ils portent aux céréales et aux projets de grandes mises en valeur. Tandis que la pratique de la céréaliculture sous pivot est dominée à 22 % par des exploitants expérimentés et dont l'âge dépasse les 60 ans.

III.1.1.2. Formation en agriculture

Si la formation scientifique est fondamentale au même titre que les recyclages et mises à niveau dans le domaine technique, il paraît que la majorité du personnel gérant les exploitations agricoles (85,4 %) et ayant bénéficié de l'aide de l'état (APFA et PNDA), ne présente pas de qualifications (diplômes) ni de savoir et technicité en agriculture, notamment pour la production de céréales en milieu saharien comme Adrar. Pourtant, dans cette région, il y a deux instituts (ITMAS de Timimoun et INSFP d'Adrar) dont la vocation est orientée vers l'agriculture saharienne et dont les efforts sont très louables. En effet, le reste des agriculteurs (14,6%) ont pu suivre des formations et sont par conséquent diplômés (figure 65).

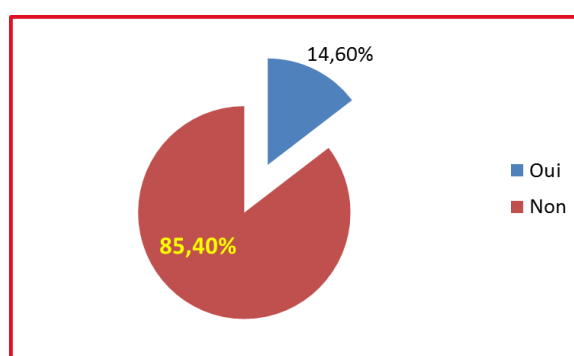


Figure 65 : Taux des chefs des exploitations ayant une formation en agriculture

III.1.1.3. Contraintes de la main d'œuvres (MO)

La MO dans les grands périmètres de mise en valeur (figure 66) constitue un handicap majeur pour gérer la campagne agricole. La plupart des exploitations compte sur la MO familiale (28,8 %). Même si l'agriculture saharienne a subi des mutations importantes apportées particulièrement par les programmes APFA de 1991 et PNDA de 2000, le problème de la MO est resté jusqu'à ce jour une préoccupation prioritaire des exploitants. En période d'impérieuse nécessité et en vue de résorber au moins partiellement le manque en MO, les chefs d'exploitations font appel à des ouvriers saisonniers qu'on peut estimer à 8 %. L'emploi de cette catégorie de MO saisonnière intervient généralement dans des périodes bien précises telles que la récolte (ramassage des épis tombés par terre à cause de la verse). La mobilité des ouvriers saisonniers et leur transport jusqu'aux sites agricoles est une difficulté de taille.

Pour la catégorie de MO appelée familiale, la contrainte de transport et d'accessibilité à la zone d'activité est partiellement surmontée grâce aux moyens et équipements mis en œuvre par les membres de la famille. La MO familiale est apparemment un modèle de la bonne organisation, car il permet de faire fonctionner l'exploitation sans entrave aucune. En

anticipant sur les problèmes et contraintes, les membres de la famille sont, par exemple, capables de prendre en charge la totalité des opérations dans une GEP à 7 pivots cultivés.

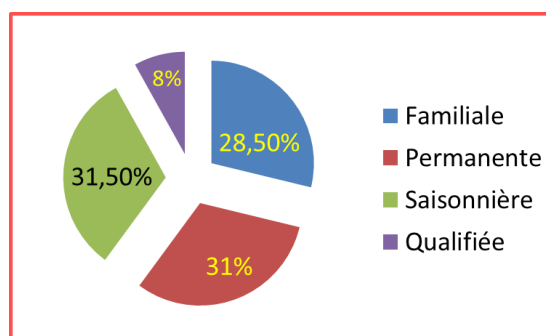


Figure 66: Taux de différentes catégories de main d'œuvre par périmètre

Il est, en effet, important de souligner que le mode de gestion à distance est adopté par près de 30% des chefs d'exploitations ; ce qui agrandit le risque à ce que l'agriculteur ne soit pas disponible sur le champ et du coup, il pourra rater le moment où son intervention sur terrain serait plus que recommandée.

III.1.2. Diagnostic économique

III.1.2.1. Esprit d'investir chez les agriculteurs

Il n'y a qu'environ 38,1 % des agriculteurs qui manifestent de l'intérêt vis-à-vis de l'investissement et qui ont l'intention de développer leur exploitations (Tableau 28) ; sinon l'esprit d'investir est complètement absent chez plus de 60 % des agriculteurs. Les chefs d'exploitations non désireux de se lancer dans des opérations d'investissement invoquent des raisons qui, en réalité, méritent d'être soulevées et prises en charge par les pouvoirs publics.

Les principales raisons de ce désintérêt à réaliser un investissement agricole est dû :

- ✓ à l'absence de programmes spécifiques d'aménagement de pistes (travaux de réhabilitation et d'ouvertures de nouvelles routes menant jusqu'aux nouvelles concessions) ;
- ✓ au problème lié à l'écoulement de la production ; en l'absence d'une politique de gestion de la production, l'agriculteur est livré à lui-même ;
- ✓ au manque de vulgarisation et à l'absence d'esprit de coopération et de mutualisation des moyens entre agriculteurs ;
- ✓ à la mauvaise gestion de contrats de performance dans ces régions (entre ONAB et agriculteurs) ;

- ✓ à la non-appropriation de l'exploitation agricole, d'où le désengagement de l'exploitant de tout le processus d'investissement agricole.
- ✓ à l'aridité du climat et l'éloignement qui risquent de compromettre leur volonté d'investir.

Tableau 28 : Investissement dans le futur dans le maïs

Esprit d'investir	Nombre d'exploitants	% Observé
Oui	16	38,1
Non	25	61,9
Total	41	100

La région d'étude est riche en terrain plat et en eau mais dont l'éloignement et l'aridité compliquent sérieusement les investissements.

III.1.2.2. Coût de la production du maïs dans la région d'étude

Les charges préconisées pour un pivot et le seuil de rentabilité de celui-ci diffèrent d'une année à une autre, en fonction des besoins de la culture et en fonction de la fluctuation du prix des intrants. A titre d'exemple, pour un pivot de 30 ha appartenant à la CCLS, les charges engagées pour deux campagnes se présentent comme suit (tableau 29) :

Tableau 29: Les charges estimées d'un pivot de 30 ha pour deux campagnes CCLS.

Opérations	Charges estimées (DA)	
	Campagnes	
	2014/2015	2015/2016
Production q	996,8	1 215,4
Besoins Pivot 30 ha de maïs CCLS	Coût en DA	
semences	353 701,47	471 601,97
Fertilisation	1 394 400,00	1 627 995,00
Traitement	48 000,00	96 835,00
Energie Elect	305 329,52	553 224,28
Récolte	118 500,00	255 000,00
MO, Ass, IRG, Trans et divers	1 342 372,48	1 212 309,03
Total DA	3 562 303,47	4 216 965,28

Il semble qu'avec l'abattement de 25% (selon Sonelgaz) dont bénéficient les agriculteurs du grand sud sur l'énergie électrique, le prix de vente de 4 500 DA/q ne peut, à lui seul, être une mesure incitative pour l'augmentation du rendement des céréales. Car, le seuil de rentabilité qui a été constaté pour les 2 campagnes 2014/2015 et 2015/2016, est respectivement de 26,4 et de 31,23 q/ha ; ce qui reste loin du niveau qui pourrait être escompté.

Dans des conditions presque comparables à celles d'Adrar, les ingénieurs de l'ITGC de Oued smar (Alger) en collaboration avec les maïsiculteurs d'El Menéa (wilaya de Ghardaïa) ont pu élaborer, en 2017, une fiche technique pour déterminer le seuil de rentabilité du maïs dans cette région saharienne. Pour un pivot de 30 ha en location, ce seuil a été, en

réalité, de l'ordre de 40 q/ha pour des frais de location du matériel agricole se chiffrant à 5.391.631,2 DA soit 179 721,04 DA/ha.

III.1.2.3. Commercialisation

L'écoulement et la livraison de la production de blé dans la wilaya d'Adrar sont réalisés par la CCLS. Cependant, pour le maïs, moyennant un contrat signé avec l'agriculteur en début de campagne, l'ONAB achète la production à un prix variant entre 2 000 et 4 500 DA/q. Cet organisme achemine le produit sur une distance de 1000 km pour le livrer dans la région de Bougtob (wilaya d'El Bayadh).

Pour l'ensilage, le produit est stocké sous forme de balles de 700 à 1000 kg et c'est l'agriculteur qui cherche et un conditionneur (enrubanneuse) et l'acquéreur de ces balles de fourrage. Souvent, ce sont les laiteries qui achètent l'ensilage, au niveau des champs, à des prix fluctuant entre 5 et 8 et parfois même 12 DA/kg. Il est à noter que les pouvoirs publics (MADR) subventionnent le transport de cet aliment des régions du sud vers le nord du pays à raison de 3 DA/kg.

III.1.2.4. Développement et durabilité de la culture de maïs

Plus de 80 % des agriculteurs sont optimistes et croient au développement de la culture du maïs dans leur région et pensent que sa réussite est une chose possible, mais, elle dépendra impérativement de leur capacité à s'organiser et à lancer une coopération réfléchie et opérationnelle entre eux (tableau 30). Ils conditionnent également la durabilité de la culture par la création de points de stockage et de transformation dans la région d'Adrar. Tandis que, 95 % des agriculteurs jugent que la politique de l'état doit s'éloigner des décisions qui perturberaient l'investissement et susciterait la réticence des exploitants. .

Tableau 30: La durabilité de la culture du maïs selon les 41 exploitants enquêtés

Durabilité de la culture du maïs	Nombre d'exploitants	% observé
Disparaître Agriculteurs abandonnent la culture du maïs	12	29,3
Travailler en coopération	33	80,5
Pensent à la transformation	34	82,9
Perturbé par l'instabilité des décisions de la tutelle (MADR)	39	95,1
Autres	6	14,6
Total	41	

III.1.2.5. Problème d'accès à l'exploitation

D'après les analyses de l'enquête (Figure 67) 58,5 % des agriculteurs du périmètre de Zaouiet Kounta /Inzeghmir trouvent une grande difficulté pour accéder à leurs pivots, 29,4 % à Fenoughil et 11,8 % à Tsabit. Ce sont des taux élevés par rapport à l'immensité des superficies de périmètres qui nécessite l'actualisation du programme de mise en valeur des

terres par les concessions adopté en 1998, et le lancement d'une opération de réhabilitation des anciennes pistes et la création d'autres.

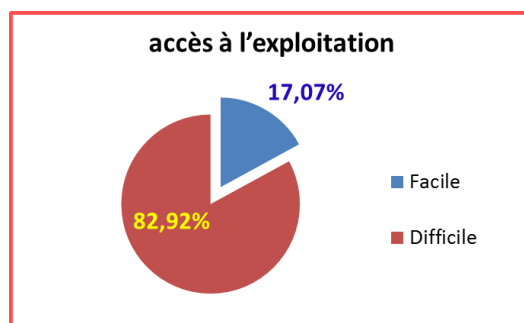


Figure 67: Taux de difficulté d'accès à l'exploitation dans les périmètres de GMV selon les déclarations des agriculteurs et d'après notre constat durant l'enquête.

Discussion de résultats:

Les résultats de ce volet ont été satisfaisants et ont mis en exergue l'intérêt que revêt l'utilisation des outils de télédétection pour cartographier et suivre les pratiques agricoles en région agricole saharienne. Cependant, ces outils utilisent des images provenant de Google Earth Pro (GEP) dont la disponibilité est aléatoire, aussi bien dans l'espace que dans le temps.

Dans le cas de notre étude, 2 images ont été exploitées et leur utilisation a été profitable. Grâce à ces images, la majorité des opérations agricoles, sous pivots, ont pu être visualisées et même interprétées. Il y a, en effet, un inconvénient technique propre à la plateforme qui fournit ces images, c'est la superposition des images sur le même écran avec des dates différentes. Ce problème a été contourné par le recours aux images landsat8.

En outre, les images landsat8 et/ou Sentinel2 nous ont permis une détection de certaines pratiques, mais avec une faible résolution spatiale et avec une résolution temporelle intéressante (inférieure à 16 jours).

La combinaison de ces trois sources d'images nous a été extrêmement utile dans la cartographie des périmètres agricoles et dans l'estimation des rendements, pour seulement 3 campagnes (2013-2016), par le calcul des indices de végétations.

Le rôle des images satellitaires dans la géolocalisation des emplacements exacts des pivots de maïs par rapport à ceux du blé, a été incontournable et d'une précision très avancée. Au total, 21 Images Landsat8 couvrant une superficie de 124465 km² ont été analysées et ont permis d'identifier et même de dénombrer les pivots opérationnels et d'estimer les superficies emblavées.

La culture du blé a été choisie dans l'étude de la répartition spatiale des pivots, parce que cette culture est largement pratiquée par les agriculteurs possédant un pivot en fonctionnement.

Les résultats de l'estimation de l'évolution de la surface emblavée pour les cultures du blé et du maïs durant la période 2013-2018 a révélé une augmentation de 213,12 % pour le blé et 207% pour le maïs.

En se servant des images satellitaires, nous avons pu constater que le nombre de pivots qui étaient effectivement engagés pour la production du blé et du maïs a considérablement augmenté durant les campagnes de 2013/2014 - 2017/2018 ; cette augmentation a été de l'ordre de 149,61 %. La surface irriguée a également augmentée, durant la même période, de façon nettement remarquable et est arrivée à 10,85 % de la superficie totale attribuée.

Pour ce qui est de la culture du maïs, le nombre de pivots et la surface qui lui ont été consacrées ont triplé en cinq années.

Les causes qui ont rendu possible l'extension des superficies cultivées en maïs sont multiples ; nous y évoquons principalement les contrats signés entre les agriculteurs et l'ONAB. Plusieurs autres facteurs tels que la disponibilité des intrants et certains équipements sur le marché national et la présence de l'assistance technico-scientifique, ont pu attirer les agriculteurs vers cette culture. La politique de l'état, à travers la bonification accordée en matière d'énergie électrique, l'application d'un tarif d'achat de la production incitatif, a encouragé cet investissement et soutenu l'implantation des pivots.

Au fil de l'interprétation des images satellitaire, nous avons pu apporter des précisions d'importance cruciale et des constats extrêmement frappants sur divers aspects liés à la culture du maïs sous pivot. Cela étant, en plus de la détection de certaines pratiques agricoles, et du nombre de pivots en activité, l'exploitation des images satellitaires GEP nous a permis d'estimer, précisément, une superficie de 89,22 ha non productive pour la campagne 2014-2015 ; elle est répartie entre les différents périmètres de 552,9 ha. Cette superficie qui été identifiée comme improductive a, pourtant, été raccordée à l'énergie (électricité et carburant), alimentée en eau et de surcroît, fertilisée et traitée par les produits phytosanitaires. Cette situation pourrait être évitée et un montant important pourrait, en conséquence, être épargné dans cette opération.

Les signatures spectrales obtenues lors de l'analyse de l'état de surface nous ont utilement renseignées sur l'état des parcelles ; la détection de celles venant tout juste d'être labourées, semées ou irriguées, est une information particulièrement intéressante dans la gestion de la GMV et même dans l'estimation des rendements.

Diagnostic technique

III.2. Diagnostics techniques

III.2.1 Le travail du sol

Dans ce diagnostic, il sera question de présenter les techniques et modes de travail du sol ainsi que les équipements et le matériel qui sont utilisés.

Dans la zone d'étude, la texture du sol est sableuse. Le travail du sol est réalisé par l'utilisation de deux types d'outils (figure 68) pour la préparation du lit de semence.



Figure 68: chisel (a) ; cultivateur à dents (b) ; cover crop (c); d- Agenda indiquant la profondeur de travail du sol. Source: photos personnelles 20/10/2015 (CCLS)

Il a été remarqué que les exploitations agricoles de la région d'étude sont sous équipées en matériel agricole adéquat (taille réduite ; faible dimension par rapport à la superficie emblavée) et souvent la pièce de rechange n'est pas disponible. Ceci a engendré une mauvaise préparation du sol (figure 69) et des retards dans les opérations culturales.



Figure 69: Sol mal préparé – cultivateur à dent – Photo personnelle : Aougrou - 2016

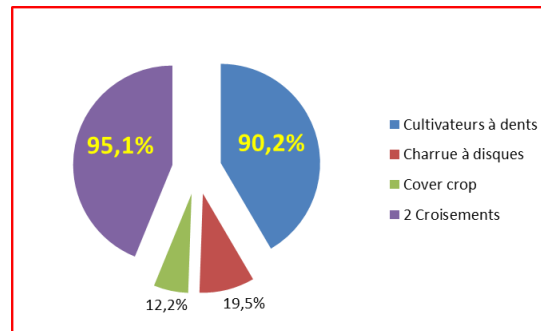


Figure 70: Taux d'utilisation de différents types d'outils pour le travail du sol.

On attribue souvent aux sols sahariens un degré d'abrasivité élevé qui tend à user surtout le matériel aratoire. Cette usure contraint les agriculteurs à remettre en état leurs matériels et machines à des coûts onéreux. L'exemple du cultivateur à dents (Figure 70) utilisé par plus de 90 % d'agriculteurs est édifiant. Les dents de cet outil doivent normalement être remplacées après le travail d'une surface de sol moyenne de 50 hectares.

Notre enquête sur le matériel aratoire nous a permis de constater que les outils de travail du sol (à disques ou à dents) subissent une usure extrêmement rapide à cause de la qualité physique du sol. Il a été aussi remarqué que le manque de tracteurs de grande puissance empêche l'augmentation des largeurs de travail du sol et les combinaisons des outils selon la taille de l'exploitation. La location du matériel revient malheureusement chère et alourdit davantage les dépenses des exploitants.

III.2.2. Analyse du sol, salinité et contrôle de fertilité

Parmi les caractères pédologiques les plus frappants dans la région d'Adrar, il y a la salinité. Deux principaux problèmes sont prépondérants que ce soit dans les périmètres de GMV ou ailleurs, le phénomène de salinité et le manque flagrant constaté en analyses du sol. Notre enquête a montré que 85,4 % d'agriculteurs ne pratiquent aucune analyse pédologique pour leurs sites (figure 71) ; tandis que le reste des exploitants ne procèdent au contrôle de fertilité du sol qu'une seule fois tous les 7 ou 10 ans. Ce qui rend les apports de fertilisants une opération peu judicieuse ou même aléatoire.

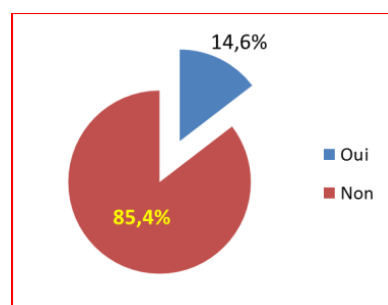


Figure 71: Taux d'agriculteurs qui font l'analyse du sol

Les résultats de l'enquête (Figure 72) montrent que l'effet de la salinité secondaire est mineur. Plus de 65 % d'agriculteurs estiment que la surface affectée par l'accumulation saline ne dépasse pas 2 ha de la surface totale balayée par le pivot (20 à 30ha). La surface affectée par les sels reste relativement faible ; elle varie de 2-3 ha pour une catégorie de 22 % d'exploitants.

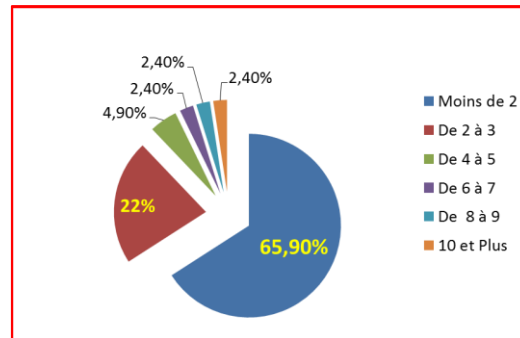


Figure 72: Surface (ha) touchée par la salinité estimée par les agriculteurs.

III.2.3. Le Semis

Le semis se fait à l'aide de semoirs. Nous avons constaté que seulement 15 % d'agriculteurs possèdent des semoirs et que 78 % d'entre eux n'en possèdent pas et ils ont recours à la location (Annexe 6 tableau 2) à un prix de 4500 DA/heure. La durée du semis peut aller jusqu'à 2 jours ; ce qui donne lieu à 20 heures de travail sous pivot de 20 ha. Cette opération est liée à la puissance du tracteur et le type de semoir utilisé (figure s 73).



Figures 73: Semoir monograin 6 rangs à Tsabit (privé).
Source : photos personnelles 2015 - Tsabit

III.2.3.1. Les dates de semis et incidence sur le calendrier culturel

Dans les périmètres de GMV, le maïs est semé en conditions d'extrême chaleur (45 °c). Selon les agriculteurs, la date de semis s'étale sur toute la période allant du début août jusqu'à la fin de ce mois ; elle peut même avoir lieu au début juillet (Figure 74). La date de semis est laissée au choix des agriculteurs dont, par exemple, 34,1% préfèrent semer à la mi-août, plus de 31% le pratiquent juste au début d'août et 22% le font à la fin du mois d'août. Il est à noter que la précocité de la variété y est totalement méconnue et la somme des températures exigées par la variété (fiche technique), est complètement négligée par les agriculteurs. C'est pourquoi, il est recommandé de bien connaître ces paramètres afin de déterminer avec précision la date de semis du maïs.

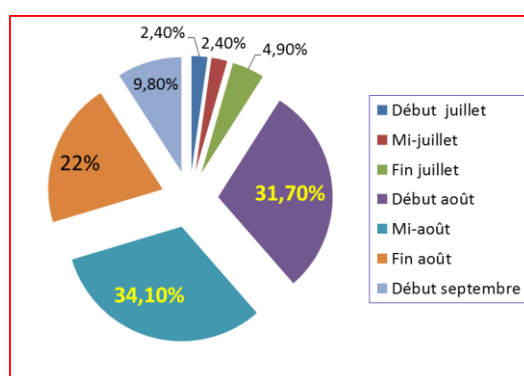


Figure 74: dates de semis du maïs dans les différents périmètres de GMV.

Tout retard dans le semis ou la préparation des sols peut faire basculer le calendrier culturel et compromettre la culture suivante qui est le blé. En effet, le pivot doit être déplacé du champ de maïs pour préparer la campagne de blé. Le résultat de ce retard oblige 85 % (d'après l'enquête) des agriculteurs à déplacer leurs pivots.

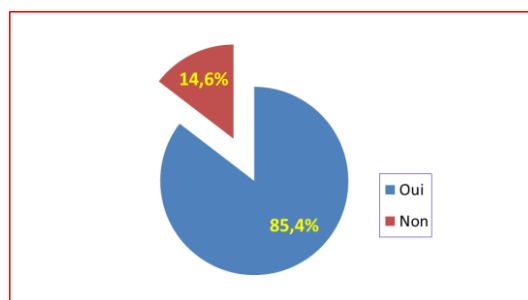


Figure 75: Taux d'agriculteurs faisant le déplacement de leurs pivots

Le chevauchement des dates de semis du blé et de la récolte du maïs est fréquemment enregistré à cause, notamment, de l'absence de machines destinées à la récolte de maïs ou parce que la variété cultivée serait tardive. Le déplacement du pivot est une solution récurrente, mais elle occasionne énormément de désagréments à l'agriculteur.

Les reste des agriculteurs auraient peut-être bien évité ce déplacement parce qu'ils ont pu récolter le maïs avant les dates de semis du blé ou ils possèdent d'autres pivots entièrement réservés au blé. Les images issues de Google Earth illustrent manifestement cette opération de déplacement à travers les cercles de pivots.

III.2.3.2. La densité de semis

La densité de semis varie d'un agriculteur à l'autre en fonction de la nature du sol (la présence de cailloux, de rongeurs...). La majorité (58,5%) des agriculteurs appliquent une densité de semis (Figure 76) inférieur à 80 000 grains/ha. Plus de 9 % appliquent une densité de 90 000 à 100 000 grains/ha.

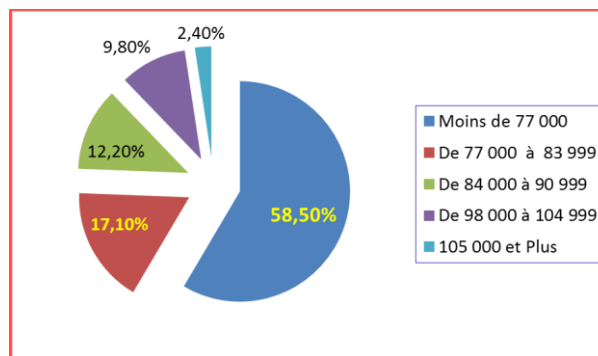


Figure 76: Densités de semis du maïs (grains/ha)

III.2.4. Variétés cultivées : exigences et performance

Nous avons remarqué, au terme de notre enquête que c'est la variété RENTI (Caussade France) et Hytech Hybrid 2066 égyptienne qui sont les plus cultivées dans la région d'étude Adrar (Annexe 6 - tableaux 3). La variété RANTI présente des atouts d'adaptation considérables au milieu saharien. Ses principales caractéristiques sont énumérées comme suit :

- une tige courte qui lui confère une résistance au vent,
- une faible densité de feuillage lui permettant de consommer moins d'eau,
- presque 40 à 50 % de la culture peut porter deux épis par pied de 14 rangs et 38 à 40 grains par ligne,
- les épis sont plus bas d'où le centre de gravité plus proche au sol qui lui permet une bonne stabilité de la tige et peut résister à la verse.

Plusieurs autres variétés telles que Panam, Scandi , Crasy, Panam Pelarco et Codilac dont l'itinéraire technique et les opérations culturales ont été plus ou moins respectés par les agriculteurs à Adrar, ont été performantes du point de vue de leurs résultats et elles s'avèrent d'un intérêt agronomique incontestable.

Nous rappelons que durant les 3 campagnes 2013/2014 ; 2014/2015 et 2015/2016, d'autres variétés ont été cultivées dans les périmètres agricoles d'Adrar et leurs caractéristiques essentielles sont synthétisées dans l'Annexe 6 tableau (4).

Concernant les rendements de certaines variétés, il y a un fait remarquable qui est digne d'être évoqué. Dans la ferme COPEDA situé à Tsabit, la variété précoce Ranti a été installée en août 2014 sur un précédent blé et a pu donner un rendement de 58 q/ha. En 2015, la variété à cycle long Hytech Hybrid 2066 - Egypte) a été semée fin juillet sur un précédent de blé et a pu donner un rendement satisfaisant (69 q/ha).



Figure 77: Dimensions d'un épi variété Ranti - Source : photos personnelles 2015 - Ferme CCLS -

Cependant, nos statistiques montrent un faible rendement moyen de céréales (blé/maïs) enregistré durant toutes les campagnes. Les raisons de ces mauvais rendements résultent, dans la plupart des cas, d'un itinéraire technique insuffisamment maîtrisé et de la mauvaise gestion de la fertilisation (manque de fumure de fond, fumure très tardive ou en faible quantité), absence d'analyses du sol, d'un semis inadéquat (date et pratique), une irrigation mal conduite et un entretien insuffisant de la culture. A ces raisons, nous ajoutons également la gestion « à distance » pratiquée par certains exploitants de leurs exploitations.

III.2.5. Phénomène de manque à la levée

Le risque de manque de levée du maïs a touché 90 % de pivots emblavés. Ceci peut être imputé aux raisons suivantes :

i) Le vent : son effet déterre la semence. Ce facteur est donc déterminant de la profondeur de semis. D'après nos observations sur le terrain, ce risque surgit en plein été et coïncide avec l'époque de semis (juillet/août) et intervient généralement sur des sols sableux complètement désagrégés, poussiéreux et très sensible à l'érosion éolienne. Une frange d'agriculteurs

(19,71%) estime qu'en plus de la faible profondeur de semis (3 cm), le vent est l'agent responsable de ce manque de levée. L'absence de brise-vents est capable d'amplifier l'influence des vents qui soufflent violemment en août et septembre pour causer des dégâts importants, notamment, sur les cultures exposées à la direction des vents dominants (figure 77).

Par ailleurs, notre constat permet de relever que lorsque le semis est effectué à 4-5 cm, il y a environ 15 à 20 % de grains qui peuvent être déterrés. Notre observation, est en effet, similaire, au résultat mentionné par **Aït Houssa (2008)**.

On pense qu'en vue de respecter les objectifs de densité prévue, il serait préférable de revenir à une replantation à la main comme cela a été pratiqué par 40 % d'agriculteurs. Il y a seulement 10 % d'agriculteurs qui optent pour une plantation à la machine.

ii) l'irrigation, la gestion de l'eau et les sels : malgré le fait que 40,83% des agriculteurs accusent la machine (Figure 78) d'avoir un effet néfaste sur la levée, il semble que c'est l'excès d'eau qui génère l'asphyxie en causant ainsi la mort des grains. Ces conditions d'asphyxie sont, à notre avis, à attribuer au mauvais réglage du pivot. Cette hypothèse est, à notre sens, assez évidente pour expliquer le problème de manque à la levée.

D'autres (14%) accusent le manque d'eau, le même pourcentage accuse l'accumulation de sel. Un pourcentage très réduit ont accusé la qualité de la semence et les rongeurs.

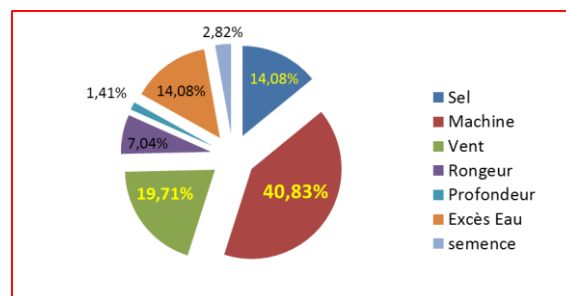


Figure 78: Résultats de l'enquête sur le manque à la levée

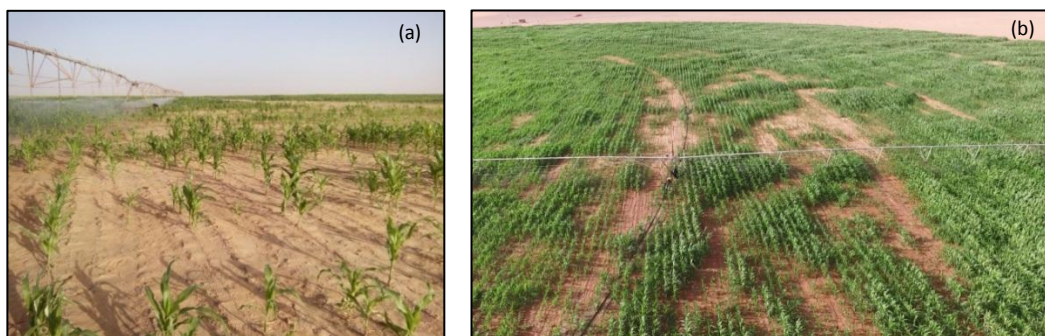


Figure 79 : Manque de levée du maïs sous pivot :
a- Fenoughil 21/10/2016 ; b- Zaouiet Kounta 12 /11 /2016 avec un Drone.

iii) La vitesse du tracteur : C'est un autre paramètre qui doit être respecté pour avoir une bonne levée du maïs. Nous avons remarqué que les vitesses de 4 et 6 km/h sont, respectivement, appliquées pour les semoirs à socs et les semoirs à disques. Le semoir doit être positionné entre 7 et 8 grains/seconde. Passée de 6 à 9 km/h, cette vitesse peut générer une perte dépassant les 1000 grains/ha. Le constat de manque de levée a été extrêmement utile au point qu'il nous a permis d'analyser, au mieux, les images satellitaires que ce soient sur Google Earth, Landsat8 ou sentinel2.

III.2.6 Diagnostic exhaustif de la Machine d'irrigation - le pivot

III.2.6.1. Fuites d'eau

L'origine de l'eau d'irrigation est la nappe phréatique albienne qui demeure la principale et unique source d'eau pour la production agricole dans la région d'étude. Les équipements puissants de pompage mobilisent d'importants volumes d'eau par des pompes immergées de 45 à 55 CV à commande électrique. Un forage dans une grande exploitation à Fenouhail débite 50 l/s, soit 180 000 litres pompés par heure. Le diagnostic sur le terrain montre plus 43,9 % de pivots visités présentent une fuite d'eau (figure 80). Les cas enregistrés méritent d'être signalés car ils traduisent un énorme gaspillage de la ressource très peu renouvelable qui est l'eau.

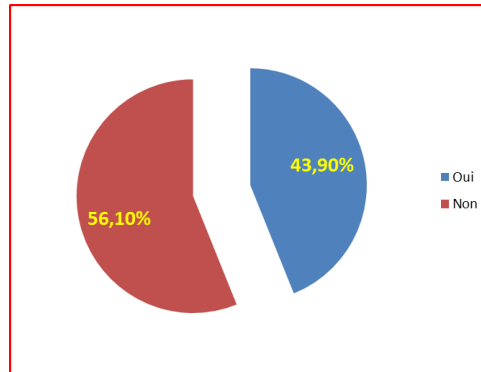


Figure 80 : Taux de présence de fuites d'eau sur les pivots.

L'ampleur de ces pertes est alarmante dès lors qu'elle se poursuit sur une durée de 2 mois d'irrigation sans arrêt à un débit de 1 à 3 l/s. Ce constat est, en tous cas, commun à beaucoup de périmètre irrigués. Presque la quasi-totalité (99 %) des forages visités ne sont pas munis d'un compteur de débit d'eau. La gratuité de l'eau justifie sa consommation immodérée ou le gaspillage à outrance par les agriculteurs de la région d'étude.

III.2.6.2. Problème des ornières

Les ornières se forment sur le passage de roues (Tableau 31) 68,3 % de pivots sont touchés par ce problème. Pour éviter ce problème c.à.d. éviter de projeter de l'eau dans le

sillon de passage des roues des asperseurs à secteur de 180 degrés fixés sur les deux côtés de la tour ou des supports utilisés pour déporter les arroseurs à l'arrière des roues et garder le chemin de roulement sec (figure 81) peuvent être utilisés.

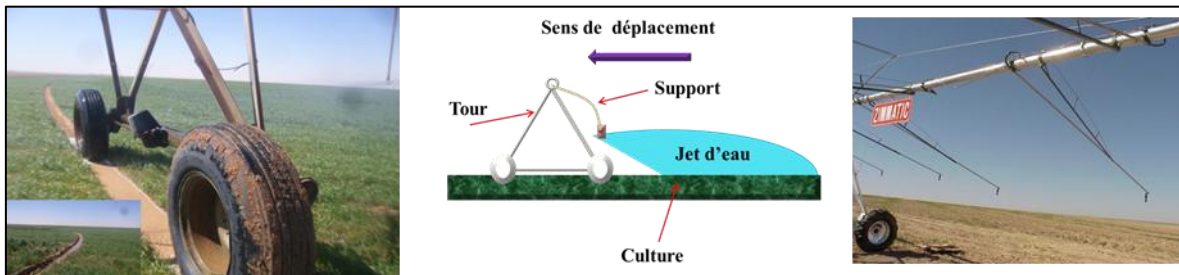


Figure 81: intervention sur le pivot pour éviter la formation des ornières

Tableau 31: taux de formation d'ornières sur le passage des roues du pivot.

Etat des pivots / Ornières	Nombre d'exploitations	% Observé
Oui	28	68,3
30 à 40 cm de Profondeur	25	61,0
Travées intérieurs	25	61,0
Non	13	31,7
Total	41	

III.2.6.3. pannes fréquentes sur le pivot

L'enquête montre que le taux de pannes sur la machine (figure 82) est occasionné surtout aux niveaux des roues (61 %), des cardans (53,7 %) et de la chaîne cinématique réducteurs (48,8 %).

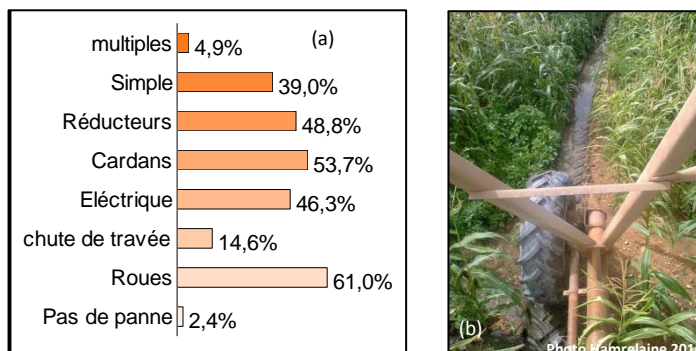


Figure 82 : (a)-Taux de pannes fréquentes sur les pivots. (b) Un cardan en mouvement bloqué par les plants de maïs

III. 2.7 Besoins en eau

Les besoins en eau estimés par **Kerroumi (2016)** qui sont autour de 9 000 m³/ha/100 jours dans le cas de pivot au grand sud sont largement dépassés (**Boucedra, 2010**). D'après notre estimation, les apports en eau pour la culture du maïs, peuvent atteindre 1 200 voire les 1 350 mm/cycle. L'état et le plan de busage jouent un rôle très important dans la détermination des besoins en eau de la culture. Alors que les agriculteurs ne contrôlent pas le débit délivré par les asperseurs et dans la majorité des pivots, le contrôle et la répartition de l'eau sont effectués de manière approximative. L'apport des doses requises par la culture durant les stades critiques ne sont donc plus maîtrisées. Ce qui induit aussi une grande hétérogénéité de levée et compromet le développement optimal de la culture.



Figure 83: Un champ de maïs mal irrigué – gaspillage d'eau. Photos : Hamrelaine 2015 -Tsabit

La figure 83 montre clairement que les intensités pluviométriques délivrées au niveau de la dernière travée sont supérieures à la capacité d'un sol sablonneux qui est de 50 mm/h max (Roose, 1993). Cette situation ne donne qu'une idée de la qualité de la distribution et ne doit pas empêcher une observation stricte de la courbe de distribution et du fonctionnement des asperseurs.

III.2.7.1 Exemple de réglage au niveau de l'organe d'aspersion du Pivot

Selon le diagnostic réalisé sur le terrain à la ferme de la CCLS sise à Fenoughil le 14/09/2016 pour le pivot N° 4 (figure 45 en haut) semé le 01/08/2016, nous avons constaté un retard de levée pour 70 % de la surface du Pivot (image dans le Tableau 26) avec un dessèchement après la levée de 25 % de la surface. Cet état de fait peut être due à un semis profond de plus de 7cm suite à une erreur de réglage de semoir et aussi à la dominance des vents de sable (chauds) qui ont frappé la partie nord du pivot durant le mois d'Août. Pour y remédier et rattraper la quantité d'eau perdue (évalué ou transporté) par le vent, nous avons proposé les mesures techniques suivantes (figure 84):

a- Réglage des buses d'arrosage pour les deux dernières travées avec suppression des buses de la 1^{ère} travée.

b- Réduction de la vitesse d'avancement du pivot à 40 % au niveau de la moitié la plus stressée (nord du pivot), pour augmenter la capacité de rétention en eau du sol. Cette action permet à la culture de reprendre rapidement sa croissance et d'être à un niveau relativement homogène sur toute la surface emblavée.



Figure 84: Une intervention en plein irrigation pour diminuer le débit sur la travée centrale en assurant les besoins en eau pour la dernière travée du pivot.

Source : photos personnelles 2015 – ferme CCLS

III.2.7.2 Planning d'irrigation par le pivot

Pour le maïs, l'irrigation dépend de la précocité de la variété et de la date de semis. Cette dernière a lieu, en général, dès la préparation du sol (début août) et prend fin vers la fin du mois de décembre. Les besoins en eau augmentent, au fur et à mesure, de la croissance des plantes ; le pompage de l'eau dure 24/24 heures durant les premiers 45 jours. La vitesse du pivot varie en fonction des stades repères de la culture ; elle est à 80% durant la croissance de 50 % durant la reproduction.

Pour la culture d'hiver (blé), le pompage de l'eau est arrêté par les agriculteurs pendant les heures (17h00 jusqu'à 21h00) où la consommation électrique atteint son apogée et ce, afin de réduire le coût de l'électricité.

Il n'en est pas de même pour la culture du maïs (culture d'été) où l'on a enregistré une irrigation « non-stop » avec une cadence 24/24 heures durant 3 mois (Tableau 32).

Tableau 32: Planning d'irrigation par campagne pour le maïs (culture d'été)

Mois	Fréquences	Temps d'irrigation en heures	Vitesse de déplacement en %
Août	S.A	24/24	80
Septembre	S.A	24/24	80
octobre	S.A	24/24	50
Novembre	S.A	24/24	50
décembre	1/2	18	50
Janvier	Arrêt	30j	
Février	Récolte		

Enquête de terrain (Hamrelaine, 2015)

1/2 : 3 irrigations par semaine ou une fois tous les deux jours

S.A : irrigation sans arrêt.

% : par rapport à 60 secondes affichées sur la minuterie du pivot.

A titre d'information, nous avons constaté durant notre enquête que, pour alimenter un pivot de 30 ha, le débit de la pompe est de 40 l/s ce qui équivaut 144 m³ /h et 3456 m³ / 24h. Ce planning est adopté par 82 % des agriculteurs, tandis que d'autres fixent la vitesse du pivot à 80 % pour tout le cycle de développement et 5 % des agriculteurs le fixe à 50 %.

III.2.7.3. Irrigation et topographie du terrain

L'homogénéité topographique des parcelles est un des problèmes techniques qui agit sur la gestion des cultures et par-delà sur le rendement. Souvent, les terrains ne sont pas topographiquement uniformes ; il y a très peu d'agriculteurs qui procèdent à des nivellements de leurs terrains pour les aplanir.

Les sols non aplanis peuvent présenter deux situations préjudiciables aussi bien aux cultures qu'à la gestion des périmètres irrigués :

- soit des cuvettes favorables à la création des conditions asphyxiantes (accumulation de l'eau) et entravant ainsi le développement vertical des racines. Cette situation engendre aussi l'apparition de mauvaises herbes et leur propagation sur une bonne partie du pivot ;
- soit des bosses (légères élévations du sol) sous pivot favorisant le ruissellement de l'eau et la formation des efflorescences salines après évaporation. L'accumulation de sels solubles est un aspect qui peut conduire à la dégradation de la qualité des sols des sites agricoles si des mesures de lessivage ne seraient pas envisagées.

L'utilisation de l'image satellitaire (figure 85) a permis d'observer la forme topographique d'une parcelle sous pivot, à Zaouiet Kounta, à travers les courbes de niveaux (MNT). Dans cette situation, l'utilisation de régulateurs de pression est fortement recommandée.

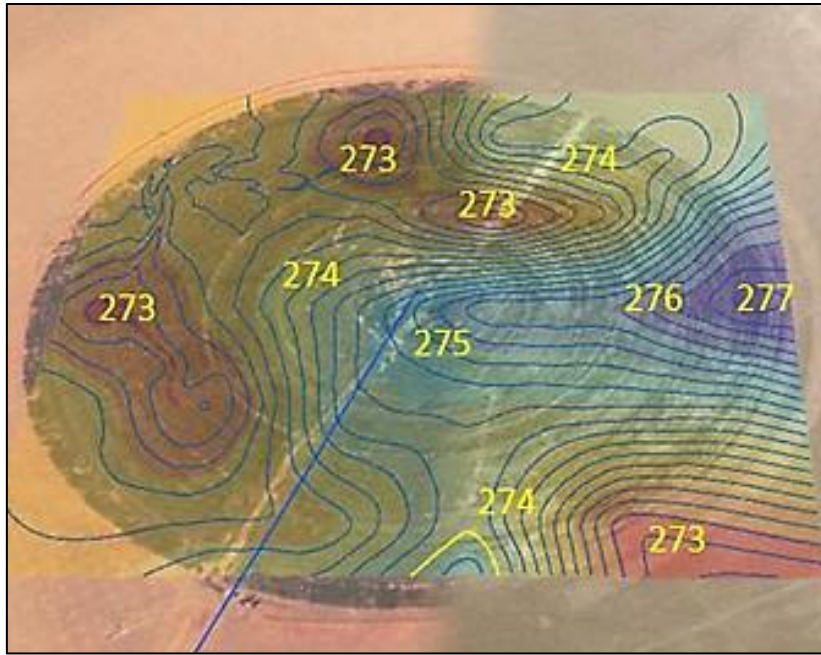


Figure 85: Topographie d'un Pivot de 20 ha à Zaouiet Kounta

III.2.7.4. Le niveau statique de forages

Dans les périmètres de grande mise en valeur le niveau statique moyen de l'eau de forage dans les différents périmètres oscille entre 15 et 31m (figure 86). Il y a 26,8 % de forages qui ont un niveau de 16 à 19 m et le même pourcentage est enregistré pour des niveaux variant entre 20 à 23 m (Annexe 6-Tableau 5).

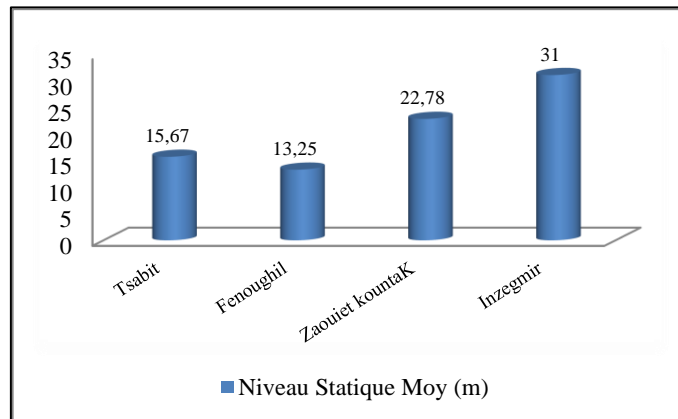


Figure 86: Niveau statique, moyen, de forages par périmètre

III.2.7.5. Débits de forages

Tous les forages visités assurent les besoins en eau d'un pivot de 30 ha (Figure 87). La majorité des forages (63,4%) délivrent, au moins, un débit entre 42 et 47 l/s et un seul forage délivre moins de 36 l/s.

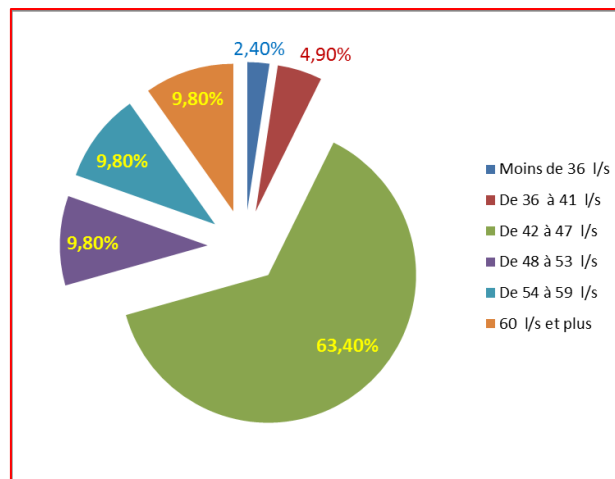


Figure 87: Débit des forages dans les grandes mises en valeur.

III.2.8. La fertilisation

Nous avons essayé de consacrer toute une fiche technique à ce volet important de la culture des céréales. L'élaboration de cette fiche technique a été principalement basée sur les principaux fertilisants apportés dans la région par seulement les agriculteurs ayant réalisé des rendements acceptables (> à 48 q/ha). Ces apports sont les engrais de fond (NPK) et de couverture.

III.2.8.1. Engrais de fond NPK

L'azote est le facteur principal de la croissance des plantes et du rendement des cultures. Il favorise l'augmentation de la densité foliaire des couverts végétaux. Il tend à prolonger la durée du fonctionnement des organes verts; à retarder la sénescence et la maturation (Falisse et Lambert, 1994). Dans les périmètres de grande mise en valeur, la fertilisation pratiquée est basée exclusivement sur des apports en engrais chimiques (Figure 88).

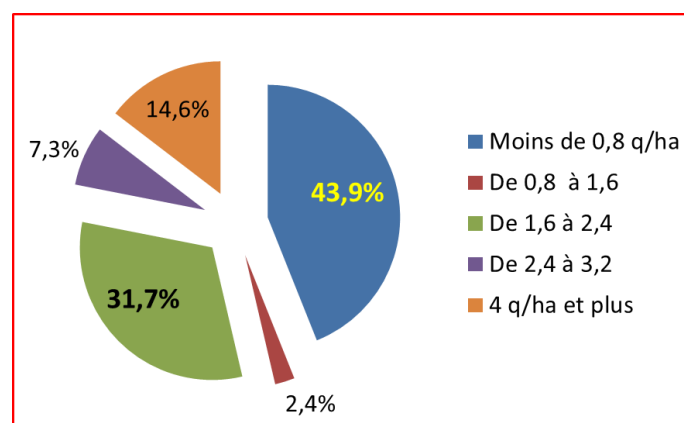


Figure 88: Engrais du fond (q/ha)

Une fertilisation non raisonnée a été constatée chez 43,9 % d'agriculteurs appliquent moins de 0,8 q/ha des engrais de fonds comme le TSP ou le MAP et 31,7 % appliquent un apport de 1,6 à 2,4 q/ha. Ces deux formes d'apports ont un taux très élevé et ont pour conséquence la diminution du niveau de la production. Nous avons remarqué qu'il y a moins de 15 % d'agriculteurs qui apportent plus de 4 q/ha aux cultures. Ceci explique, évidemment, la différence de rendements constatés dans les périmètres étudiés.

Le diagnostic de fertilité des sols est un aspect qui doit être suivi en permanence pour améliorer le potentiel de fertilité des sols et le maintenir constamment à un niveau souhaitable.

III.2.8.2. Engrais de couverture

Les engrais de couverture (urée) sont épandus 30 à 45 jours après le semis avec une dose de 100 kg/ha.

Moyenne = 3.22 ; médiane = 3.00 ; min = 1 max = 5

Les normes : 85 % de reste de quantité calculé au départ (5 q/ha)

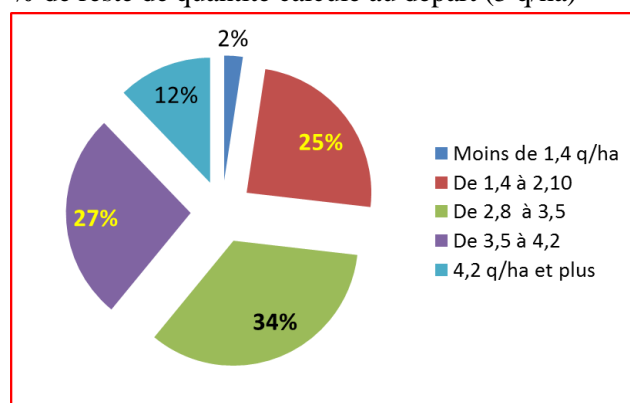


Figure 89: Engrais de couverture (q/ha)

III.2.8.3. Le problème de blocage des engrais dans le sol

Un autre fait a particulièrement attiré notre attention, c'est le phénomène de blocage des « engrais » ou des éléments fertilisants que les agriculteurs ont soulevé et qu'ils en incriminent le rôle du sol. Et de l'avis de 80 % des agriculteurs, ce problème rend difficile voire impossible, l'absorption racinaires de certains bioéléments, ceci causerait la chute des rendements. Pour parer à cette forme de « blocage », 35 % d'agriculteurs utilisent des biostimulants tels que l'acide humique, pour améliorer l'efficacité d'absorption des nutriments par le système racinaire (Figure 90). La dose utilisée dépend de la notice du produit et en général, deux applications sont, respectivement, à prévoir aux stades 4-6 feuilles et 10 feuilles.

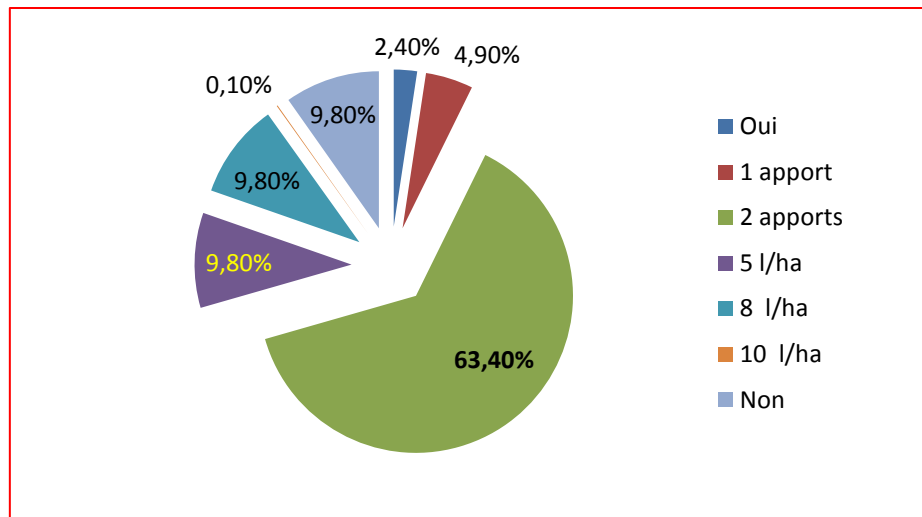


Figure 90: Utilisation des biostimulants (acide humique) sur la culture de maïs

Ce procédé, par lequel les agriculteurs croient savoir améliorer l'assimilation des éléments minéraux par les cultures, est admis par 30 % d'agriculteurs de la région d'étude. Ceux-là utilisent l'acide humique avec une fréquence de 2 apports de 10 l/ha chacun. Selon ce même groupe d'agriculteurs, ce mode d'emploi, leur a été bénéfique, parce qu'il les a aidés à réaliser des rendements acceptables.

Dans l'hypothèse où ces bio-stimulants auraient véritablement contribué à l'amélioration de la production du blé et du maïs, ceci peut être expliqué, selon **Brown et Sebastian (2015)**, par le fait que les acides humiques auraient un effet manifeste sur les conditions chimiques du sol, plus précisément, au niveau de la rhizosphère, sur la réduction du stress abiotique de la culture et sur l'amélioration de l'efficacité de prélèvement des nutriments (**Brown et Saa, 2015**). Ces substances organiques pourraient avoir un rôle majeur dans la rétention et la mobilité des éléments minéraux et, par conséquent, dans la biodisponibilité de ces éléments au bénéfice des plantes et des micro-organismes (**Dangleterre, 2007 in Tahiri et al., 2014**).

III.2.9. Mauvaises herbes (MH) : constat, types de MH et lutte

Dans la région d'étude, la prolifération des mauvaises herbes est un sérieux problème ; elle a été accentuée par la pratique de la monoculture blé/blé et par l'absence d'une lutte intégrée ; c'est ce que juge plus de 92 % d'agriculteurs (Figure 91). Ces mauvaises herbes sont souvent apportées avec la semence de blé mal nettoyée et qui serait parfois disséminée par le vent.

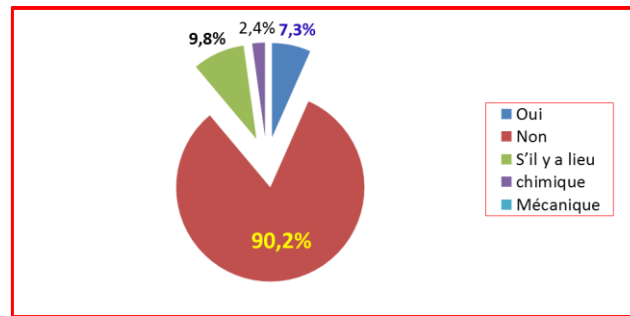


Figure 91: Taux des agriculteurs pratiquant la lutte contre les MH

Certains agriculteurs de la région d'étude ont une attitude peu soucieuse du danger que peuvent constituer certaines de leurs actions à l'égard de la propagation des mauvaises herbes (figure 91). Le déplacement du pivot est une « erreur de gestion » qui pourrait favoriser l'envahissement des cultures par les MH et compliquerait le suivi des cultures.

Parmi les espèces les plus répandues dans les périmètres visités, il y a des graminées telles que le brome, le Phalaris, le ray-grass, le vulpin et la folle-avoine et des dicotylédones comme le chénopode, la moutarde et la ravenelle.

Pour ce qui est de la lutte contre les MH, nous avons bien apprécié la présence des techniciens et ingénieurs agronomes dans la région d'étude qui, dans le cadre de leurs multiples missions, portent conseils aux agriculteurs et les orientent pour surmonter leurs difficultés. Quelques-uns de ces ingénieurs travaillent pour leurs propres comptes et interviennent à la demande pour aider les exploitants, non seulement, à parer certains problèmes « conjoncturels », mais également, à les initier aux nouvelles techniques qui garantiraient leur réussite, la durabilité de leur investissement et le confort économique. S'agissant, par exemple, des MH, des stratégies de lutte sont souvent proposées aux agriculteurs ; et un des plans le plus largement proposé par les bureaux de conseils agronomiques c'est celui qui consiste en :

- i) la réalisation d'une 1^{ère} lutte de désherbage mécanique par un faux semis suivi d'un disquage après irrigation ;
- ii) une 2^{ème} opération qui requiert l'utilisation d'un désherbant chimique total.

En dépit de la « disponibilité » de l'assistance technique, nous avons remarqué que dans les périmètres irrigués, compte tenu de leur comportement vis-à-vis du conseil agronomique, il y a 2 types d'agriculteurs :

- i) un type qui préfère ne pas faire appel à cette assistance, dans la mesure où l'accès au savoir-faire peut être obtenu gratuitement ; il suffit, dans ce cas, d'avoir des « ouvriers qualifiés » ou de consulter des pairs dans des sites agricoles voisins ;

- ii) un type qui n'adhère que de manière très faible aux démarches techniques qui leurs sont offertes. L'argument de cette réticence, cache en vérité une appréhension de ne pas avoir des résultats probants sur leurs cultures.

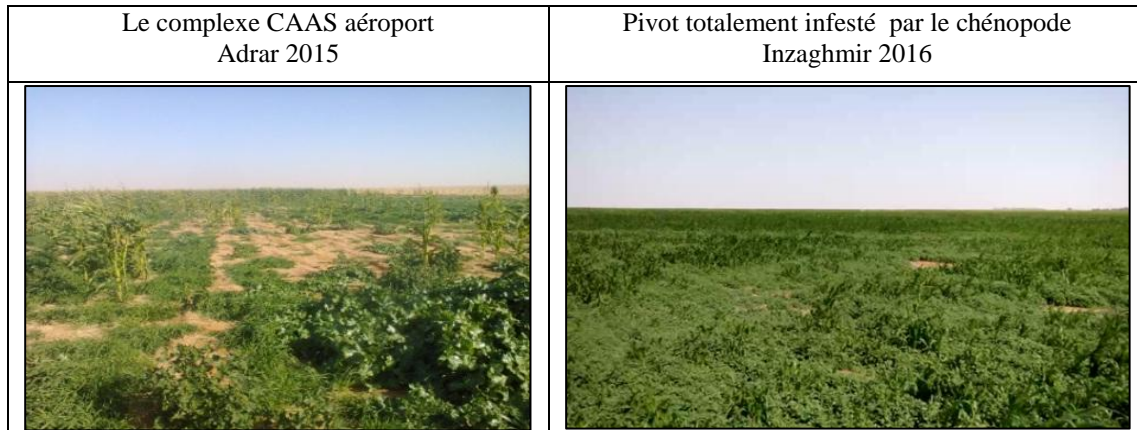


Figure 92 : différents champs de maïs sous pivot infestés par les MH et spécialement par le chénopode. Photo : Hamrelaine 2015- 2016

Nous tenons à présenter, dans le cadre de notre diagnostic sur les MH, l'expérience d'un agriculteur approché à Inzaghmir (l'exploitation Chikh Elhassan) qui a mis en application le désherbant chimique contre le chénopode. L'opération n'a pas été concluante selon cet agriculteur ; et les raisons de cette inefficacité du produit pourraient être les suivantes :

- i) mauvais réglage du matériel de traitement, ii) choix inopportun du stade de lutte, iii) et la dose appliquée a été mal déterminée.

Certes l'infestation des champs des périmètres irrigués par les MH ne présente pas la même ampleur, mais le risque de prolifération reste posé. Nous estimons que les raisons de cette prolifération sont multiples, mais, elles peuvent être principalement dues à la mauvaise qualité de la semence de blé qui a été acquise sur le marché ces dernières années. Cette semence n'a pas été indemne de graines de MH et il semblerait qu'elle contenait des graines de brome et de chénopode. La pratique de la monoculture (blé/blé) aurait favorisé la contamination des champs exploités et ceux avoisinants. Ce qui pousse certains agriculteurs à déplacer leurs pivots (image GEP) et chercher des espaces « sains » à mettre en culture.

La culture du maïs, dans ces conditions, peut être considérée comme une culture nettoyante. Le désherbage mécanique ou chimique de la culture est fortement préconisé durant les premiers stades du développement, même si on reconnaît qu'au stade 8-10 feuilles, le feuillage du maïs empêche la pénétration de la lumière utilisée par les adventices pour se développer.

Pour ce qui est de l'estimation du rendement en présence de MH, grâce à nos observations, nous avons pu localiser toutes les parcelles (pivots) qui présentent un degré d'envahissement élevé (+10% de la surface couverte par le pivot) ; ces surfaces sont éliminées du traitement d'image. Ce qui nous donnera une meilleure précision au modèle d'estimation du rendement à travers les images satellitaires.



Figure 93 : Pré irrigation pour lutter contre les MH – cas du brome (ferme CCLS)
Source : Photo personnelle - 2016

III.2.10. Appel aux spécialistes

L'enquête montre que 40,5 % d'agriculteurs font appel aux spécialistes (figure 94) pour améliorer leurs rendements. Le maïs est une culture exigeante et son stade critique compte les premiers 45 jours de son cycle de développement du semis jusqu'à la fertilisation avec une irrigation continue (24h/24h).

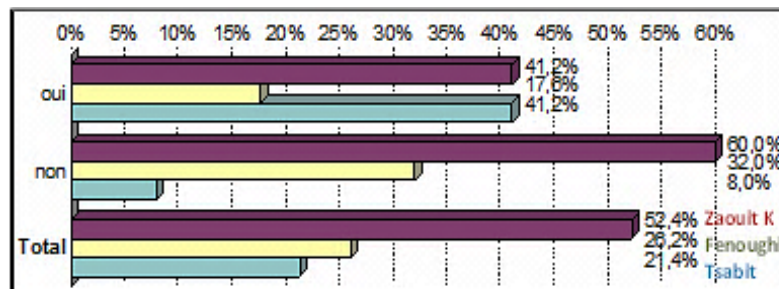


Figure 94: Taux d'agriculteurs ayant fait appels aux spécialistes.

Le personnel spécialiste en agronomie et disposant d'un niveau de qualification appréciable dans la région d'étude, est représenté par deux ingénieurs qui, eux-mêmes, sont des représentants des entreprises spécialisées dans la vente d'engrais (Timac Alger et Profert Bejaïa) et activant depuis 2015 dans le domaine des céréales et maraîchage. Ces ingénieurs ont pu, à travers leur modeste expérience, développer un savoir-faire et établir un réseau important avec le collectif des agriculteurs d'Adrar. D'ailleurs, une dizaine parmi ces paysans se disent satisfaits de la prestation de ces 2 agronomes. Et pour preuve, leurs rendements ont été augmentés parce qu'ils ont mis en application le bon itinéraire technique qui leur était proposé.

III. 2.11. La récolte

La récolte au niveau de la majorité des pivots (Figure 95) s'effectuent entre les mois de février (51,2 %) et Mars (34,1 %). Ce retard est, essentiellement, dû à l'utilisation de variétés semi-tardives à tardives, au manque de matériel (MB et camions) et à un manque cruel dans l'organisation (encadrement peu qualifié et mauvaise gestion) de la filière maïs.

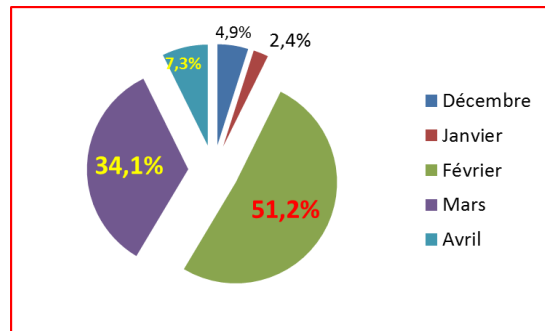


Figure 95: Différentes dates de récolte du maïs

L'examen des images satellitaires obtenues sur différentes plateformes (GEP, Landsat8 et Sentinel2) nous a aidés à détecter, avec précision, les pivots déjà récoltés, ceux en voie de récolte et les pivots non encore récoltés (voir plus haut figure 60).

a- Pertes à la récolte: causes et conséquences sur le rendement

Nous avons constaté que tout retard causé par le manque de machines de type MB, se solde inévitablement par des pertes à la récolte par la verse et l'égrenage des épis. L'avènement des vents à la mi-février soulève le sable et occasionne également des pertes à la récolte. Nous avons assisté à une verse qui a frappé plusieurs pivots de maïs. Ce phénomène a contraint les agriculteurs à effectuer un ramassage manuel du produit récolté (figure 96).

Le battage se fait à poste fixe, c'est-à-dire, des ouvriers doivent impérativement transporter les épis de maïs dans des sacs de 40 kg jusqu'à la MB.

La chute de l'humidité au stade de sénescence est une autre cause qui peut affaiblir la tige. Etant alourdie par la charge de l'épi, la tige s'incline et se rapproche du sol et à l'occasion d'un moindre vent, l'épi serait facilement mis au sol. La quantité de production perdue à cause de la chute de l'humidité est estimée entre 20 et 40 %. Le taux d'humidité fixé par les services de l'ONAB à 20 %, est un critère important pour qu'une récolte soit admissible à la livraison. Il y a dans cette région, peu d'agriculteurs qui respectent formellement cette norme et évitent, ainsi, le rejet de leur produit par cet établissement.



Figure 96 : la verse dans un champ de maïs : (a) machine en pleine moisson ; (b) ramassages des épis à la main ; (c) un épi brisé par les roues de la MB - Photos personnelles du 12/03/2016 -Tsabit



Figure 97 : la production de maïs ramassé à la main dans des remorques de tracteur en attendant le battage à poste fixe. Photos personnelles du 18/04/2016 Fenoughil
b- L'ONAB, la CCLS et les maïsiculteurs

La gestion des dossiers des investisseurs ou producteurs de maïs est du ressort de l'ONAB ; cet organisme n'a pas pu jouer son rôle et a désigné la chambre d'agriculture pour en assurer le rôle de coordinateur.

Faute de moyens techniques et logistiques lourds (véhicules 4x4) et de personnel, ce dernier organisme n'a pas pu assurer la coordination et suivre les opérations inhérentes à cet investissement.

Les maïsiculteurs de la région d'étude se sont, donc, retrouvés sans interlocuteur « public » ; ce qui les a confrontés à diverses formes de difficultés notamment lors de l'écoulement de leur production. Durant la campagne agricole 2016/2017, les maïsiculteurs ont opté pour le maïs fourrager (ensilage) au lieu du maïs grain pour éviter le risque de l'écoulement de la production. L'ONAB leur proposa alors des prix d'achat dérisoires (2000 DA/q) ; une polémique a été donc provoquée entre les différentes parties (agriculteurs, MADR et l'Union Générale des Agriculteurs Algériens) pour trouver une issue à cette situation. Néanmoins, les revers de la filière maïs sont multiples et sa prise en charge a, semble-t-il, été délaissée.

En ce qui concerne le planning des moissons, 80 % de la superficie récoltée est assurée par le parc de la CCLS d'Adrar. Tant que c'est la CCLS qui s'occupe de la moisson récolte, elle prépare cette campagne à l'amont (programmation et location du matériel et machines) et ce, en fonction des dates de maturité de la récolte.

Cependant, en l'absence de parc moderne dédié spécialement au machinisme agricole, dans les périmètres irrigués, les maïsiculteurs continueront encore à endurer pour développer leur filière.

III.2.12. Evolution des rendements observés sur le terrain

Bien que les rendements moyens soient presque semblables pour les trois zones et les trois campagnes, des fluctuations d'une zone à une autre et d'une campagne à une autre sont enregistrées. Ces fluctuations sont probablement dues aux variations des conditions climatiques et édaphiques, mais aussi aux non respects de la date de semis. La zone de Zaouiet Kounta a enregistré le rendement le plus élevé avec 39,13 q/ha suivi par la zone de Tssabit avec 38,13 q/ha (Figure 98).

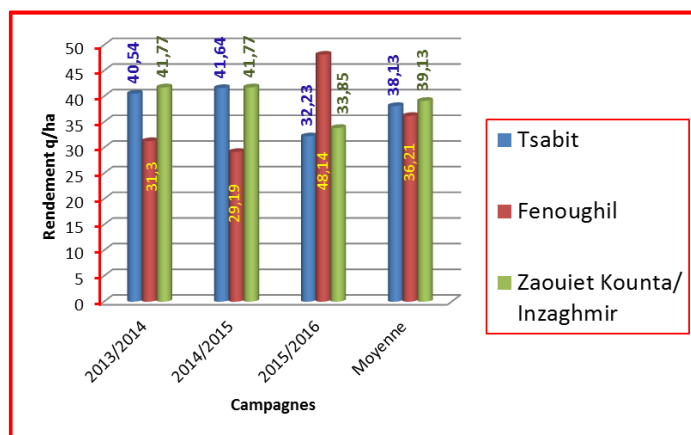


Figure 98 : Rendement moyen q/ha par périmètre agricole pendant les trois campagnes.

Globalement, ces rendements sont relativement faibles par rapport aux potentialités de la zone. Parce qu'un pic record de 99 q/ha y a été déjà enregistré durant la campagne 2016/2017. Ce rendement a été obtenu sur une surface de 34 ha situé dans la zone de Fenoughil. La production y a été de 3 372 q. Cette faiblesse des rendements résulte, dans la plupart des cas, de l'application d'un itinéraire technique inapproprié, du faible apport d'engrais et de l'envahissement des cultures par les adventices.

III. 2.13. Présentation du mode de conduite de la culture du maïs

L'exemple qui sera donné dans ce travail est celui de la ferme CCLS à Fenoughil. Il peut servir d'exemple pilote dès lors qu'il dispose de moyens techniques et d'un ingénieur agronome qui s'occupe de tout le suivi de la culture des céréales. Cet ingénieur est un professionnel qui ne laisse aucun paramètre au hasard ; toutes les actions sont notées, au quotidien, dans un registre (Tableau 33). Ce qui lui permet d'anticiper les problèmes et de superviser la progression des opérations (préparation du sol, semis, fertilisation, etc.) de façon continue. C'est de lui que dépendent toutes les actions et travaux liés à la conduite de la culture dans les 8 pivots que compte la ferme. Par son omniprésence sur le terrain, cet ingénieur a pu acquérir une maîtrise en réalisant des performances de

production ; il est peut être un modèle concret de réussite pour ceux qui sont encore sceptiques à l'égard du développement.

Tableau 33: Mode de suivi d'un Pivot (N°5) 30 ha ; campagne 2014/2015 – variété RENTI

N°	Opérations	Date		Observation
		Début	fin	
01	Travail du sol primaire	23/05/15	28/05/15	Cover crop10/20
02	Travail du sol secondaire	09/06/15	15/06/15	Cover crop10/20
03	Pivot : Rabaissement Buse	14/06/15	14/06/15	Tablette
04	Epannage TSP 46	17/06/15	20/06/15	2q/ha
05	Hersage	20/06/15	24/06/15	Herse
06	Semis	27/07/15	29/07/15	80000 Gr/ha
07	Irrigation	27/07/15		
08	Fertilisation azoté	17/08/15 13/09/15	12/09/15	2q/ha/24h 3q/ha/24h
09	Diagnostic vers blanc	21/09/15		
10	Traitement insecticide préventif	24/09/15	25/09/15	Karaté 0,5L /ha 15 l/pivot
11	Traitement insecticide curatif	11/10/15	12/10/15	Karaté 0,5L /ha 15 litre/pivot
12	Fin fertilisation azote	23/10/15		Dose totale 5qx/ha
13	Fin réglage vitesse pivot	24/10/15		
14	Arrêt irrigation périodique	7/11/15	8/11/15	
15	Reprise irrigation	9/11/15	10/11/15	
16	Arrêt total	11/11/15		Maturation
17	Récolte	20/12/15		1200 q (42q/ha)

III.2.14. Elaboration de la fiche technique de la culture du maïs

En se basant sur les différents diagnostics réalisés, nous avons constaté qu'il reste des lacunes relatives à la conduite de la culture de maïs. Nous essayons de les compléter par de nouvelles informations tirées des résultats de cette thèse. La présente fiche technique est un document qui vise à aider et préparer les acteurs et opérateurs dans le domaine de l'agriculture saharienne à ce challenge consistant en la promotion de la culture du maïs. Au-delà de cet objectif, ce document pourra aussi aider les agriculteurs, les professionnels et scientifiques à appréhender les questions délicates du dossier « maïs » et à contribuer au développement durable dans la région du sud et à la sécurité alimentaire.

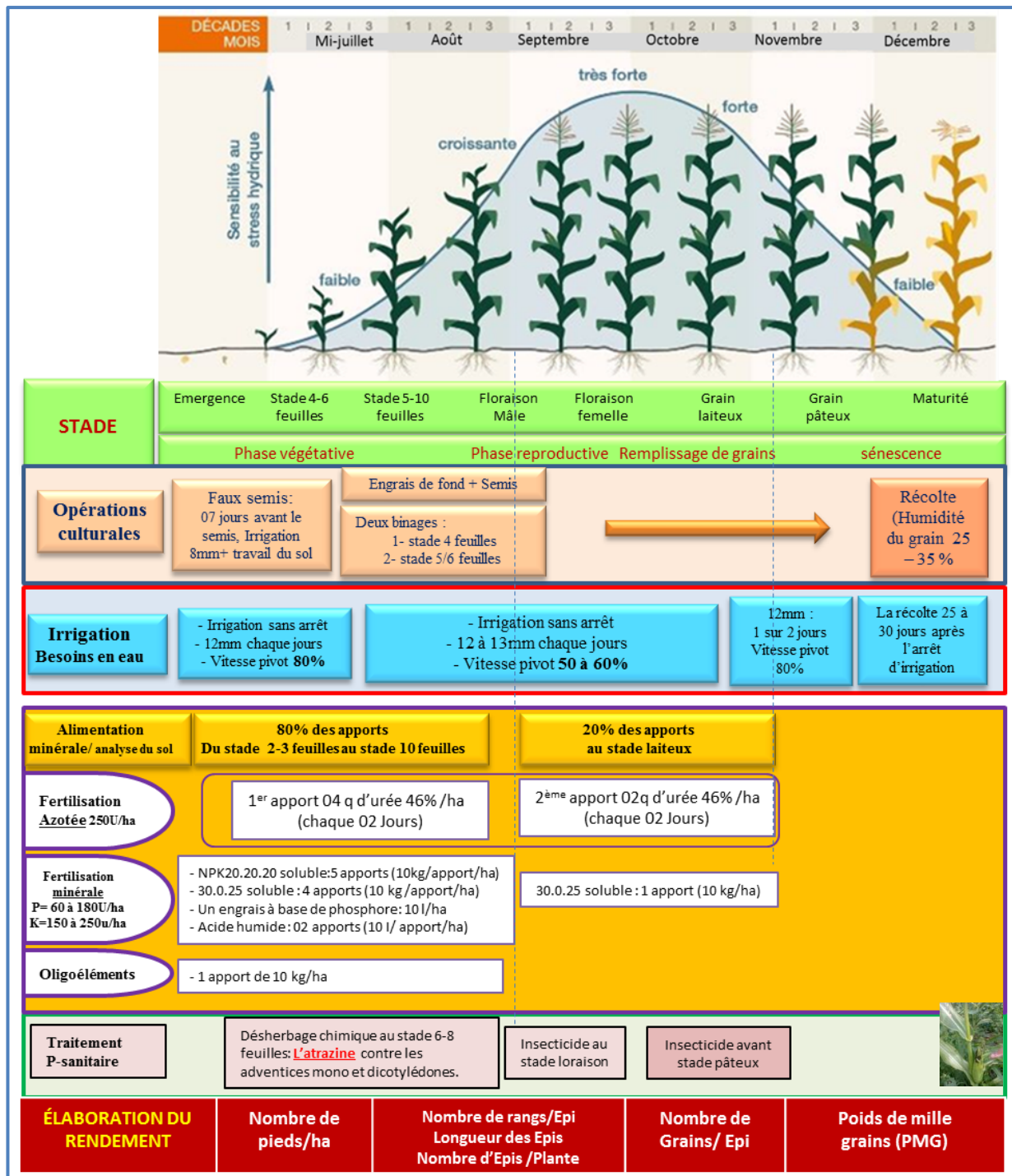


Figure 99 : Fiche technique de la culture du maïs suivi par la ferme de CCLS élaborée par Téberbi et Hamrelaine en 2017/2018.

Le maïs est une plante à développement rapide et exigeante en éléments nutritifs. La phase d'absorption la plus intense commence 10 jours avant la floraison mâle et se termine 25 jours après celle-ci. Au cours de cette période, le maïs absorbe les 3/4 des éléments nutritifs dont il aura besoin.

✓ Fumure de fond P et K

Pour la fumure de fond, 2/3 sont apportés avant ou au labour et 1/3 au moment des façons superficielles.

✓ Fumure azotée N

- 1/3 est apporté au semis
- les 2/3 au stade 4 à 5 feuilles

Selon les normes, les besoins de la culture du maïs (ITGC, 2017) pour le NPK (selon le rendement souhaité), la culture reçoit au total les doses suivantes :

- Azote (N) : 200 à 250 U/ha = 5 q d'urée,
- Phosphore (P₂O₅) : 150 à 200 U/ha = 3 à 4 q de TSP ou de MAP,
- Potasse (K₂O) : 80 à 110 U/ha.

A la place de TSP, le MAP (12 52 0) contient de l'azote ammoniacal qui participe à l'acidification des sols et à donner, au démarrage de la culture, l'azote nécessaire à une bonne levée.

Concernant la fumure d'entretien

C'est une fumure dont l'objectif est de compenser les exportations des cultures et les pertes diverses afin de maintenir la fertilité du sol à son optimum en éléments fertilisants (Derbali, 2011), elle est apportée chaque année.

- La fumure d'entretien n'est calculée que pour le phosphore et l'azote,
- pour le potassium et le magnésium leur teneur dans le sol est très élevée ajoutant à cela la richesse de l'eau d'irrigation en ces éléments, c'est pourquoi la fumure d'entretien pour ces éléments ne sera appliquée qu'après trois années de mise en culture et après analyses de contrôle.

La fumure d'entretien est calculée pour un maximum de rendement par hectare à cause des spécificités de la région, en tenant compte des pertes par les plantes et par le sol, à savoir la :

- rétrogradation du phosphore dans un milieu calcaire,
- le lessivage par les eaux d'irrigation fréquente de l'azote
- et sa volatilisation sous climat aride.

Discussion des résultats:

Cette enquête avait vocation à présenter une analyse critique du contexte socioéconomique, agronomique et technique dans lequel évoluent les cultures de maïs et même du blé dans la région d'Adrar. A travers ce volet, nous avons aussi pu mettre en lumière le fonctionnement des exploitations agricoles ; identifier les moyens techniques, le matériel et le savoir-faire scientifique mis en œuvre par les agriculteurs. Dans ce volet, nous avons également abordé les interactions que peut avoir la culture de maïs dans les différents périmètres de la GMV avec les différentes composantes de l'environnement

Les principales insuffisances déterminées par l'enquête sont :

- La plupart des agriculteurs (85,4%) ayant investi en céréaliculture ne disposent pas de niveau adéquat en grandes cultures pour maîtriser leur itinéraire technique.
- La gestion et le suivi de la culture à distance (30 % des exploitants),
- L'absence d'organisation chez les producteurs de maïs et céréales en général, est une contrainte qui laisse présager l'absence de cohésion et de coopération entre eux ; le manque en matière de mutualisation des moyens et échange d'expérience est donc abyssal.
- La chambre d'agriculture, l'ONAB et la CCLS sont, en principe, des partenaires qui devraient assurer la jonction entre ces agriculteurs activant dans cette filière et l'état ; malheureusement, ces organismes n'ont pas assumé convenablement leurs missions d'accompagnement (conseils, mise en exécution de facilitations, etc.) des pouvoirs publics.

Les directives de l'état -mises en application par l'ONAB- doivent, au contraire, être un facteur qui créerait la stabilité et la confiance dans les périmètres irrigués pour promouvoir la culture du maïs dans cette région.

- l'installation d'une station de l'ITGC est primordiale pour accompagner les agriculteurs dans une région dite difficile.
- L'inaccessibilité aux différents périmètres est une des difficultés de taille dont se plaint la majorité (60 %) des agriculteurs. Les machines agricoles et les moyens de transports sont névralgiques pour la gestion de cette filière.

Du point de vue technique, l'état de fertilité des sols et le phénomène de salinisation (secondaire) qui, jusque-là est spatialement limitée (2 ha sur une superficie cultivée de 20 ha) chez 65 % d'exploitants.

- Les outils de travail du sol sont souvent à disques et à dents (travail du sol simplifié).
- La méconnaissance de la précocité des variétés pose le problème de la détermination de la date de semis et peut se répercuter sur la période de récolte. Pour un semis intervenant en fin Juillet ou à mi-Août, la récolte se réalise vers la fin décembre/fin janvier. Cependant, les semis trop tardifs (fin août/début septembre) engendrent un retard dans les dates de récoltes qui s'étalent jusqu'au mois de mars.
- Le manque de levée du maïs qui a été observé a été attribué à l'effet du vent (19,71 % d'agriculteurs) et au mauvais réglage ou à un excès de vitesse lors du semis, à l'asphyxie par l'excès d'eau (10 % d'agriculteurs). Cependant, le mauvais réglage du pivot est vraisemblablement une hypothèse plausible.
- Concernant les variétés cultivées et qui ont été largement appréciées pour leur performance par les maïsiculteurs sont, globalement, les hybrides High tec-6625, Colonia, à cycle long et Ranti, à cycle court.

- La fertilisation minérale du maïs est un des segments qui n'est pas maîtrisé par plusieurs agriculteurs activant dans les différents sites de la GMV. Il y a, cependant, des agriculteurs qui ont pu réaliser des rendements importants en respectant les fiches techniques et les orientations fournies par les fournisseurs et les ingénieurs prestataires de service de suivi de la culture.

En ce qui concerne la gestion de l'irrigation, l'eau est servie gratuitement et provient des forages et aucun compteur n'y est installé. Les forages visités ont, tous, la capacité de couvrir les besoins en eau d'un pivot de 30 ha. Dans le cas d'apparition de fuites fortuites, l'ouvrier ne pourra plus arrêter l'irrigation pour apporter une réparation au niveau du système, car tout arrêt du pivot est hautement risqué, parce qu'il peut avoir lieu à des moments où la culture serait à des stades critiques.

- Le gaspillage de l'eau suite aux fuites récurrentes est préoccupant. Cette situation touche 43 % des pivots visités. Ceci traduit l'absence d'entretien du réseau tout entier ou de la machine.

- L'excès d'eau sur le passage des roues des pivots provoque la formation d'ornières (68 % des cas observés), engendrent un freinage d'avancement de la tour et la détérioration de la chaîne cinématique (cardan et/ou réducteurs).

- Les besoins en eau de la culture du maïs dans les périmètres de GMV peuvent atteindre 1350 mm/cycle. L'état et le plan de busage des asperseurs de pivot jouent un rôle très important dans leur détermination avec précision. D'autant plus, qu'une méconnaissance des doses requises, aux stades repères de la culture, a été constatée.

- Le problème de topographie agit directement sur la qualité des rendements des céréales ; les parcelles se caractérisant par la présence de cuvettes marquées par l'accumulation d'eau provoquent l'asphyxie et la pourriture des grains. La présence de bosses favorise le ruissellement de l'eau et sous l'effet de l'évaporation, se forment les sels (risque de salinité secondaire) ; ceux-ci, doivent être éliminés par lessivage. Le nivellement de terrain, dans certain cas, est une opération qui techniquement permet d'avoir des parcelles relatives planes et même, l'installation des régulateurs de pression, sur asperseurs, est fortement conseillée.

Aussi, faut-il préciser que quel que soit le type d'intrant (semences, fertilisants et produits phytosanitaires), son action est étroitement dépendante de la qualité de l'irrigation.

Nous avons pu noter que la mauvaise qualité des semences de blé, la pratique de la monoculture blé/blé ont particulièrement suscité notre attention au niveau des GMV, parce qu'elles sont responsables de la prolifération des mauvaises herbes. La culture du maïs, dans ces conditions, peut être considérée comme une culture nettoyante.

- Concernant les moissons, la majorité des pivots sont récoltés entre les mois de février (51,2 %) et mars (34,1 %). Ce retard est, essentiellement, dû à l'utilisation de variétés semi tardives à tardives, au manque de matériel (moissonneuses batteuses et camions), ce qui engendre des pertes à la récolte (20 et 40 % de la production) et ce à cause de la verse et de l'égrenage des épis. Ce retard oblige 85 % des agriculteurs, pratiquant la culture du maïs, à déplacer leurs pivots de la parcelle emblavée en maïs pour irriguer la culture du blé de la nouvelle campagne agricole. Enfin, l'absence cruelle d'un parc moderne « de machinisme agricole », dans chaque périmètre, pénalise les agriculteurs et entrave le développement de la grande culture.

**Conclusion Générale
et
perspectives**

Conclusion générale

Le travail qui a été conduit dans le cadre de cette thèse a apporté de nouvelles connaissances qui ont permis d'appréhender les divers aspects liés à la conduite de la culture du maïs sous pivot et les céréales en général dans le sud algérien, plus particulièrement, dans la région d'Adrar. L'amélioration des rendements, la durabilité des investissements et le développement dans cette filière ont été des soucis majeurs, non seulement des agriculteurs, mais également des pouvoirs publics.

De par leur nature, les résultats de cette thèse, ont été scindés, en 3 principaux volets. Le premier volet est consacré à la cartographie pour connaître la répartition spatiale des pivots et pouvoir évaluer les superficies mises en valeur durant trois campagnes. Le deuxième volet a porté sur l'estimation des rendements par le calcul des indices de végétation NDVI et EVI. Enfin, le troisième volet, a été réservé à la réalisation d'une enquête sur le terrain et l'élaboration d'un diagnostic.

Dans le volet relatif à l'apport de l'imagerie satellitaires, nous concluons que l'exploitation des images Landsat8 et sentinel2 a été décisive en raison de deux avantages majeurs. Le premier avantage tient aux conditions atmosphériques physiographiques favorables de la région (clarté du ciel et absence d'obstacles) ; l'image ne requiert aucun traitement préalable. Le second avantage réside en l'utilisation d'une seule image par campagne pour obtenir des estimations de rendements s'approchant beaucoup de la réalité.

En fonction de ces résultats, il est possible d'arriver à mieux suivre le calendrier du système de culture dans cette région saharienne. Parce que, il est nettement facile de distinguer les différents états de surface du sol et même d'identifier les pivots qui sont en cours de fonctionnement et de distinguer, avec assez de précision, les surfaces irriguées de celles qui ne le sont pas et de différencier entre la culture du maïs de celle du blé.

Au second volet, ce sont les résultats de l'estimation des rendements qui ont été obtenus à partir des modèles d'estimation basés sur le calcul des indices de végétation.

- L'équation d'estimation du rendement (Rdt_{NDVI}) est sous la forme suivante :

$$Rdt_{NDVI} = 61,49 NDVI_1 + 20,81 NDVI_2 + 1,149$$

- l'équation d'estimation du rendement (Rdt_{EVI}) s'établit donc comme suit :

$$Rdt_{EVI} = 66,03 EVI_1 + 34,54 EVI_2 + 20,44 EVI_3 + 4,79$$

La performance des 2 modèles a été évaluée en se référant à des critères bien définis. Il en est ressorti que le modèle utilisant les indices EVI est plus performant, en comparaison avec le précédent modèle. L'erreur relative (MARE = 17,30 %) est, par conséquent, nettement inférieure à celle obtenue lors de l'utilisation de l'NDVI.

Nous constatons que, pour l'estimation des rendements, la régression robuste présente un léger avantage par rapport à la régression linéaire multiple.

Nous avons, par ailleurs, constaté que les paramètres statistiques des rendements estimés et ceux des rendements observés, sont généralement, plus proches les uns des autres. Un constat analogue a été dégagé après comparaison des rendements estimés par les indices EVI et ceux estimés par les indices NDVI. Ainsi, la liaison entre les rendements estimés par l'indice EVI ($r = 0,77$) est légèrement plus élevée que celle réalisée avec NDVI ($r = 0,71$).

Au final, nos résultats obtenus par l'utilisation des indices de végétation NDVI et EVI offrent la possibilité de faire des prédictions sur le rendement du maïs dans la région d'Adrar

avec une précision satisfaisante et ce, sans qu'il y ait à recourir à l'ajustement de l'image. Car, les valeurs des indices EVI et NDVI qui peuvent être obtenus sur les 65 à 80 jours après le semis, sont acceptables et qu'elles peuvent traduire les rendements attendus. Cette période correspond, généralement, à la floraison et au remplissage du grain du maïs dans la région d'étude.

Ce présent travail a pu mettre en évidence une aptitude prédictive de l'EVI plus élevée par rapport à NDVI, dans l'estimation du rendement du maïs ; ce qui a été confirmée par plusieurs résultats obtenus dans le monde.

Pour ce qui est de la précision des modèles de prédiction du rendement, et dans le contexte de notre étude, elle est tributaire des contraintes suivantes : **i)** le retard de la période de récolte qui engendre des pertes allant de 20 à 40 % de la récolte, suite au dépassement du taux d'humidité des grains (<10%) ; ce qui expose l'épi à l'égrenage et la verse de la culture. **ii)** l'infestation des cultures de maïs par les adventices est une source importante d'erreur d'imagerie, elle entraîne une surestimation des rendements.

On définitive nos modèles d'ER peuvent être améliorer en introduisant d'autres variables (paramètres) telles que l'effet: du sol , les besoins en eau, T° de surface....

Le troisième volet a porté sur l'enquête de terrain afin d'établir un réel diagnostic sur la situation socio-économique et technique qui prévaut dans la région d'étude. Ses résultats ont permis d'analyser les problèmes qui entravent l'amélioration de la production des céréales et plus précisément du maïs. Aussi, les résultats de cette méthode ont été confrontés à ceux obtenus par l'approche reposant sur les modèles d'estimation des rendements.

Nous jugeons que sans ce diagnostic nous n'aurions probablement pas l'opportunité de bien connaître le schéma selon lequel peut fonctionner, un environnement agricole ou un pivot (périmètre irrigué et système de cultures) en zone saharienne. L'apport de ce volet a été conséquent dans la mesure où il nous a renseignés sur les raisons pertinentes de la faiblesse des rendements du maïs sous pivot et les perspectives de réussite de la céréaliculture et du développement de la filière du maïs dans le grand sud algérien. Ce diagnostic a apporté des informations précieuses quant aux problèmes et lacunes qui sont communs à la quasi-totalité des agriculteurs. Ces problèmes parfois sont liés aux conditions naturelles (climat et qualité des sols), liés aux intrants ou autres facteurs (façons culturales et moyens techniques utilisés). - En ce qui concerne l'aspect relatif aux fluctuations des rendements que la présente étude a révélée, il y a lieu de noter que :

i) Bien que les rendements moyens soient presque semblables pour les trois zones et les trois campagnes, des fluctuations d'une campagne à une autre et d'une zone à une autre sont enregistrées. La zone de Zaouiet Kounta a obtenu le rendement moyen le plus élevé avec 39,13 q/ha.

ii) Ces rendements sont relativement faibles par rapport aux potentialités de la zone, sinon comment expliquer le pic record de 99 q/ha enregistré durant la campagne 2016/2017 à Fenoughil.

iii) Les raisons de la faiblesse des rendements résultent, dans la plupart des cas, d'un itinéraire technique non approprié, de la méconnaissance de la fertilisation et de l'envahissement des cultures par les adventices.

iv) L'absence de moyens de protection ou de stockage de la récolte (hangars ou silos) au niveau des zones de production. Cette préoccupation a été soulevée par les agriculteurs

qui jugent que, sans elle, il n'y aura aucun espoir pour l'extension de la superficie céréalière à l'avenir ni d'amélioration de la production du maïs dans la région d'Adrar.

v) Dans la perspective de développer la filière du maïs, nous avons pu estimer le coût de production et le seuil de rentabilité ; ces 2 données seraient fondamentales et doivent préalablement être acquises par les agriculteurs ou les futurs investisseurs. Ces deux connaissances seraient d'un grand intérêt et permettraient sûrement de planifier et gérer les besoins de cette culture de façon plus rationnelle.

vi) La fiche technique qui a été élaborée peut être considérée comme une référence utile pour la conduite de la culture du maïs sous pivot et pour développer et affiner les travaux de recherche scientifique sur les possibilités d'amélioration des conditions de production (gestion de l'eau, itinéraire technique, réduction des pertes à la récolte, etc.) des grandes cultures dans les zones arides. Parce que nous jugeons que la recherche qui a été menée sur les céréales sous pivot, particulièrement à Adrar, est insuffisante, c'est pourquoi, elle ouvre de grandes perspectives aussi bien pour la recherche que pour l'encouragement de l'investissement agricole dans cette région.

Perspectives

- Le suivi des cultures de maïs et du blé sous pivot et au moment de la production (croissance), c'est-à-dire durant le cycle cultural, peut être amélioré et opportunément conduit avec une assez grande précision par l'orientation de la recherche à utiliser davantage les nouvelles technologies pour la gestion notamment des grands périmètres. C'est ainsi qu'il serait intéressant d'étendre le spectre d'application de la télédétection spatiale dans ces zones sahariennes, à d'autres champs qui nécessitent encore d'être mieux contrôlés. Les dysfonctionnements (d'ordre techniques) des pivots, l'état de surface des sols (humidité et température, accumulation de sels solubles, configuration du terrain, etc), état de la culture (stade de développement, carences en éléments fertilisants, etc.) sont autant d'aspects qui doivent être détectés et suivis, aussi bien dans l'espace que dans le temps. Les connaissances qui seront apportées par ces outils modernes pourraient contribuer à l'amélioration des rendements des grandes cultures et au développement de la céréaliculture.

- En région sahariennes, le développement de la céréaliculture, plus précisément, dans la région d'Adrar, ne saurait aussi se concrétiser sans l'intégration de divers organismes tels que le département des sciences agronomiques de l'université d'Adrar, et les établissements de la formation professionnelle (CFPA, INSFP et ITMAS) qui doivent participer à ce progrès en optant à des spécialités bien appropriées, pour les grandes cultures, telles que l'itinéraire technique des céréales, la fertilisation raisonnée en contexte aride et le désherbage chimique. Le rôle de ces structures est éminemment indispensable pour justement aider les agriculteurs à surmonter leurs diverses contraintes techniques (utilisation rationnelle de l'eau d'irrigation par le pivot) auxquelles s'ajoutent celles imposées par l'environnement biotique et abiotique (aléas du climat, salinité, état des sols, etc.).

Le progrès de l'agriculture céréalière dans le grand sud algérien est encourageant. Cependant, de grands défis attendent encore cette filière. La gestion durable des sols et le management de l'eau, disponibilité des machines et la maîtrise de leur utilisation, sont les maillons essentiels de la production des céréales qui attendent d'être perfectionnés dès aujourd'hui.

- Développer la recherche et l'innovation dans le domaine des énergies renouvelables est un volet qui doit être mis à profit ; une collaboration étroite devrait être créée entre le CDER à travers ses 2 unités implantées à Ghardaïa et Adrar et le domaine agricole: La technique de séchage solaire est une voie prometteuse pour l'amélioration des conditions de stockage et de transport de la production du maïs.

- Enfin, cette étude plaide pour la création d'un pôle industriel spécialisé dans la l'agro-alimentaire. L'investissement dans le domaine de la transformation des céréales pour la production de patte et aliments de bétails doit être une préoccupation d'urgence des pouvoirs publics et des agriculteurs.

Références Bibliographiques

A

- **Aït Houssa A., Moutia S., Belbasri M., Hsayni M, Loultiti MR., 2008.** Productivité et rentabilité du maïs ensilage conduit en goutte à goutte dans les sables de Larache. Bulletin mensuel d'information et de liaison du PNTTA transfert de technologie en agriculture, Société Mazaria, Larache (Maroc)
- **ASAL., 2012.** L'apport de l'outil spatial au développement de l'agriculture saharienne. Projet entre l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) et le Commissariat au Développement de l'Agriculture des Régions Sahariennes (CDARS), Covention 12 avril 2012
- **Atzberger C. 2013.** "Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs." *Remote Sensing* 5: 949–981. doi:10.3390/rs5020949.

B

- **Baccari N., Boussema M.R., Smane M.H., 2005.** Nécessité de développement d'une méthodologie d'inventaire basée sur des photographies aériennes numérisées, la réalité de terrain et un SIG : Le cas des aménagements de conservation des eaux et du sol en Tunisie. *Téledétection*, vol.5,n° 1-2-3, p.7-8.
- **Barrière Y., 2001.** Le maïs et l'eau : une situation aujourd'hui paradoxale, mais des progrès génétiques à attendre d'un idéotype redéfini. *Fourrages* 168, 477-489. <http://www.ics-agri.com/maais-varietes.html>
- **Bartels C. J., et van Beurden A. U. C., 1998.** Using geographic and cartographic principles for environmental assessment and risk mapping. *Journal of Hazardous Materials*, 61(1-3), 115–124.
- **Baux A., Pellet D., 2010.** Liste recommandée des variétés de maïs pour la récolte 2010
- **Belaid D, 2013.** Fertilisation du maïs-grain cultivée sous pivot en conditions arides. Communication SudAgral 18-20 Décembre Ghardaïa. 5 pages
- **Belward A. S. et J. O. Skøien J. O., 2015.** "Who Launched What, When and Why; Trends in Global Land-Cover Observation Capacity from Civilian Earth Observation Satellites." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 103: 115–128. doi:10.1016/j.isprsjprs.2014.03.009.
- **Benmalek S., 2000.** Le japonais d'In Belbel. November 1999. Iwao Kobori : 2p.
- **BNEDER, 1994.** Carte de synthèse des grands ensembles agro-pedo-climatiques 1:1.000.000, Bureau National Etudes de Développement Rurale, Alger, Algérie.
- **Bessaoud O, 2016 :** Les réformes agraires postcoloniales au Maghreb : un processus inachevé. *Revue d'histoire moderne et contemporaine* 63-4/4 bis (4): 115-37. doi: 10.3917/rhmc.634.0115.
- **Bolton D. K. et Friedl M. A., 2013.** Forecasting crop yield using Remotely Sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, 74–84. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.01.007> (EVI)
- **Bonn F. et Rochon G., 1992.** Précis de télédétection. Vol. 1, Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 485 p.
- **Bouazghi A., 2017.** Ministre de l'agriculture et de développement rural
- **Boucedra S., 2010.** Irrigation des céréales sous-pivot, campagne 2009-2010. Feuille de l'INSID N°4.
- **Boukhalfa H. H., 2004.** Contraintes d'irrigation par rampe pivotante, état des lieux au sud algérien. Thèse de magister Spécialité : Machinisme Agricole Institut National Agronomique El harrache Alger. 110 page
- **Boulais A., 2017.** Methodes de separation aveugle de sources et application à l'imagerie hyperspectrale en astrophysique. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- **Brown P. and Saa S. 2015.** Biostimulants in agriculture. *Front. Plant Sci.* 6:671. doi: 10.3389/fpls.2015.00671
- **Brimicombe A., 2010.** GIS Environmental Modelling and Engineering. Taylor & Francis 11 New Fetter Lane, London EC4P 4EE (ISBN-10: 0415259231), 118-186.
- **Burke M. et Lobell D. B., 2017.** "Satellite-Based Assessment of Yield Variation and Its Determinants in Smallholder African Systems." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (9): 2189–2194. doi:10.1073/pnas.1616919114.

C

- **Callot G., Chamayou H., Maertens C. et Salsac L., 1982.** Mieux comprendre les interactions sol-racine : incidence sur la nutrition minérale. Paris, INRA Editions, 324 p., 1982
- **Caloz R., et Pued C., 1996.** Hydrologie et imagerie satellitaire in Précis de télédétection. Volume 2 : Applications thématiques. Presses de l'université du Québec UREF/AUPELF 159-196.
- **Carfagna E. and Gallego, F.J., 2005.** Using Remote Sensing for Agricultural Statistics. International Statistical Review 73, 389-404.
- **Cayrol P., 2000.** Assimilation de données satellitaires dans un modèle de croissance de la végétation et de bilan d'énergie. Thèse de doctorat, Télédétection spatiale, Institut National Polytechnique de Toulouse. 244p
- **Cemagref, 1995.** Le Pivot, les stations de pompage individuelles pour l'irrigation ; ed Cemagref RNED.
- **CDARS, 2013:** Commissariat au Développement de l'agriculture des régions saharienne. Rapport. Données statistiques 16p
- **Chaouche S., 2006.** Développement agricole durable au Sahara. Nouvelles technologies et mutations socio-économiques : cas de la région de Ouargla. Thèse de doctorat, université Aix Marseille 389 p..
- **Charcosset A., et Gallais A., 2009.** Emergence et développement du concept de variétés hybrides chez le maïs. Le Sélectionneur Français, 60 21-30
- **Chevalier A., 1932.** Les productions végétales du Sahara. R.B.A.A.T Paris.
- **Chen P., Haboudane D., Tremblay N., Wang J., Vigneault P. et Li B., 2010.** New spectral indicator assessing the efficiency of crop nitrogen treatment in corn and wheat. Remote Sensing of Environment 114, 1987-1997.
- **Chikhaoui M., Merzouk A., Lacaze B. et Madramootoo C. A., 2010.** Etude de la dégradation des sols en milieu semi-aride à l'aide de l'approche neuronale et de données multisources. Revue télédétection, 9, 139-150.
- **Chivasa W., Mutanga O., et Biradar C., 2017.** Application of remote sensing in estimating maize grain yield in heterogeneous African agricultural landscapes. a review, International Journal of Remote Sensing, 38:23, 6816-6845.
- **Christiansen J. E., 1942.** Irrigation by Sprinkling. California Agricultural Experiment Station, Bulletin N°670. ISO 11545 (2001). Agricultural irrigation equipment Center pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles: Determination of uniformity of water distribution. 124 pages.
- **CNIS., 2015.** Centre National de l'Information et des Statistiques des Douanes, Bilan du commerce extérieur Algérien des céréales.
- **Combal B., Janouskova K. et Eva H., 2017.** Atelier: Emissions liées à la déforestation et à la dégradation des forêts de la République du Congo. Centre Commun de recherche de la Commission Européenne, Coopération de la FAO, Coordination nationale REDD (République du Congo et du CNIAF), 11 - 15septembre 2017, Ispra, Italie, 28 p.
- **Combal B., Janouskova K. et EVA H., 2018.** Outils de traitement des images satellites dans le cadre de l'estimation des émissions de carbone dues à la déforestation et à la dégradation des forêts. Centre Commun de Recherche, Commission Européenne, Ispra, Italie. p31
- **Correia P., 2012.** Guide pratique du GPS. Editions Eyrolles. 246 pages, parution le 05/01/2012 (6eme édition)
- **Courault, D., Demarez, V., Guérif, M., Le Page, M., Simonneaux, V., Ferrant, S., Veloso, A., 2016.** Chapitre 4. Fonctionnement des surfaces agricoles : apport de la télédétection page 123-176, in: Observation des Surfaces Continentales par Télédétection: Agriculture et Forêt I volume 3. Baghdadi N., Zribi M. Editor: ISTE ISBN: 978-1-78405-158-7. 455 Pages.
- **CREAD., 2018.** Revue Stratégique de la Sécurité Alimentaire et Nutritionnelle en Algérie. Centre de Recherche en Economie Appliquée au Développement Programme Alimentaire Mondial Alger, Mars 2018 Rapport établi sous la coordination du Pr. Foued CHEHAT Rédigé par : Slimane BEDRANI, Omar BESSAOUD, Salima SALHI, Messaoud LAZREG, Amal BOUZID

D

- **Dahmane A., 2008.** « *La grande mise en valeur agricole dans la commune de Zaouiet Kounta, wilaya d'Adrar* », Mémoire d'ingénieur (langue arabe), Université d'Oran, 105 p.
- **De Boer D.-W. et Kohl R.-A., 1993.** Performance characteristics of reduced pressure sprinklers, ICID Fifteenth Congress, The Hague, NLD.
- **De Fries, R., Hansen, M. and Townshend, J., 1995.** Global discrimination of land cover types from metrics derived from AVHRR pathfinder data. *Remote Sensing of Environment* 54(3), 209-222.
- **De Groote H., and Traoré, O., 2005.** The cost of accuracy in crop area estimation. *Agricultural Systems* 84, 21-38.
- **Denis A., 2020.** Travaux Pratiques de télédétection spatiale I, Antoine DENIS, 2020, Arlon Campus Environnement, Université de Liège, Belgique . 111 pages
- **Derbali R., 2011.** Evaluation du niveau de fertilité des sols et conseils à la fertilisation au niveau des exploitations céréalières de la wilaya d'Adrar ; journée d'étude sur la culture de céréales sous pivot 18/12/2011 - INSID - Adrar
- **Derouche H., 2006.** Les dépérissements du peuplement forestier dans la région de Djelfa. Mém. Magister Centre universitaire de Djelfa, 40-43.
- **De Wit A. J. W. et Boogaard H. L., 2001.** Monitoring of crop development and crop model optimisation using NOAA - AVHRR : towards an integrated satellite and model – based crop monitoring system in the European context (Vol. BCRS Report 2000 : USP-2Report 2000 ; 00-12). Delft: Beleids Commissie Remote Sensing (BCR).
- **Deumier J.M., 2011.** La précocification des semis de maïs en réponse au changement climatique – ARVALIS Institut du végétal France. 72 pages
- **Djemai Z. et Adjroud R. 1990.** « Contribution à l'étude comparative de la qualité amidonnière de quatre variétés de maïs » thèse de CQA Tlemcen.
- **Djeboub M., 2018.** Statistiques agricoles, direction de services agricoles (DSA) de la wilaya de Ghardaïa
- **Djermoun A., 2009.** La production céréalière en Algérie : les principales caractéristiques. *Revue Nature et Technologie*. n° 01/Juin 2009. Pages 45 à 53
- **Douag H., 2018.** La conduite d'irrigation de céréales par la rampe pivotante en Algérie mémoire de Master UFAS1 Sétif. 44 pages
- **DSA., 2020.** Statistiques agricoles, direction de services agricoles de la wilaya d'Adrar
- **DSA., 2016.** Statistiques agricoles, direction de services agricoles de la wilaya d'Adrar
- **Dubost D., 2002.** *Ecologie, aménagement et développement agricole des oasis algériennes*, Ed CRSTRA Biskra, Algérie, 423p.
- **Duncan J. M. A., Dash J. et Atkinson P. M., 2015.** The potential of satellite-observed crop phenology to enhance yield gap assessments in smallholder landscapes. *Frontiers in Environmental Science*, 3(August), 1–16. <http://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00056>

E

- **Emberger L. 1971.** Considérations complémentaires au sujet des recherches bioclimatiques et phytogéographiques-écologiques. In : *Travaux de botanique et d'écologie de Louis Emberger*, livre jubilaire, Édit. MASSON, Paris, p. 291-301.
- **Escale B., 2020.** Le rôle des biostimulants des semences, Arvalis - France. <https://www.arvalis-infos.fr>

F

- **FAO et ITPS., 2015.** État des ressources en sols du monde - Résumé technique Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture et Groupe technique intergouvernemental sur les sols, Rome, Italie, 92p.
- **Falisse A. et Lambert J., 1994.** Fertilisation minérale et organique. In : Tayeb Ameziani: E.H.: Persoons E. *Agronomie moderne : Bases physiologiques et agronomiques de la production végétale*. Hatier-AUPELF-UREP, pp 377-398.
- **Fensholt R., 2003.** Assessment of primary production in a semi - arid environment from satellite data: exploiting capabilities of new sensors. Institute of Geography, University of Copenhagen, Denmark. 270p. – PhD

G

- **Garroutte E. L., Hansen A.J. and Lawrence R. L., 2016.** Using NDVI and EVI to Map Spatiotemporal Variation in the Biomass and Quality of Forage for Migratory Elk in the Greater Yellowstone Ecosystem. *Remote Sens.* 2016, 8, 404; doi:10.3390/rs8050404
- **Gay J.P., 1984.** « fabuleux maïs : histoire et avenir d'une plante », Ed. Ass. Grd. prod. Maïs, Paris, p 284-286.
- **Gitelson A. A., Y. Peng Y., Masek J.G., Rundquist D. C., Verma S., Suyker A. et Baker, J. M. Hatfield J.L., et Meyers T., 2012.** "Remote Estimation of Crop Gross Primary Production with Landsat Data." *Remote Sensing of Environment* 121: 404–414. doi:10.1016/j.rse.2012.02.017.
- **Gao B.C., 1995.** NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment* 58, 257-266.
- **Girard M. C., et Girard C. M., 1989.** Télédétection appliquée, zones tempérées et intertropicales. (2 ed.), Paris, Masson, 260 p.
- **Gueriniaï A. 2012.** Analyse spatio-temporelle par télédétection de la région de Djelfa, évolution de l'occupation du sol. URI: <http://hdl.handle.net/123456789/245>. Thèse de magister ENSA El Harrache Alger 109 page.
- **Guérif M., de Brisis S. et Seguin B., 1993.** Complementarity of SPOT-HRV and NOAA-AVHRR data for crop yield assessment in semiarid environments. *EARSeL Advances in Remote Sensing*, vol.2, N°2-VI, pp 110-123.
- **Guyot G., 1984.** Caractérisation spectrale des couverts végétaux dans le visible et le proche infrarouge, application à la télédétection. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, n°95, pp 5-14.

H

- **Haddouche I., SAIDI S., et Toutain B., 2009.** La télédétection et la dynamique des paysages en milieu aride en Algérie: le cas de la région de Naâma. *Energies, changements climatiques et développement durable*, Hammamet (Tunisie), 15,16 et 17 juin 2009.
- **Halitim A., 2011.** L'aridoculture et le développement durable. *Algerian journal of arid environment* : vol. 1, n° 1, Janvier 2011
- **Halitim A., 1988.** Les Sols des régions arides d'Algérie. OPU. Alger, 384 p.
- **Halitim A., 1985.** Contribution à l'étude des sols des zones arides (Hautes plaines steppiques de l'Algérie). Morphologie, distribution et rôle des sels dans la genèse et le comportement des sols. Thèse doctorat. univ Renne, 384 p.
- **Halilat M.T., 2004.** Effect of Potash and Nitrogen Fertilization on Wheat under Saharan Conditions. IPI regional workshop on Potassium and Fertigation development in West Asia and North Africa; Rabat, Morocco, 24-28 November, 2004. 16 pages.
- **Hamrelaine M., 2020.** Support de cours de machines hydrauliques et station de pompage Master 1 Aménagement hydro Agricole, université Farhat Abbas Sétif1 Site web [www. https://www.univ-setif.dz/](https://www.univ-setif.dz/)
- **Hamrelaine M., 2008.** Rapport de mission sur le choix des équipements agricoles pour la réhabilitation de la station INRAA Adrar. 14 pages
- **Henri G., Georges C., Philippe J., et Roger G., 1968.** « Cours d'agriculture moderne », 182 p.
- **Heerman D.F. et Hein P.R., 1968.** Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation systems. *Trans. ASAE* 11 (1), 11–15. USA. Pp 85-98
- **Huete A.R., 1989.** Soil influences in remotely sensed vegetation canopy spectra. Theory and application of optical remote sensing, 107-141. - G. Asrar Ed., New York.
- **Huete A.R., Justice C., Leeuwen W. 1999.** MODIS vegetation index (MOD 13) algorithm theoretical basis document version 3. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.
- **Huete A. R., 1988.** A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309.
- **ITGC, 2017.** Fiche technique de la culture de maïs dans le grand sud Algérien.

J

- **Jaritz G. et Bonnejmte M. 1997.** Production et utilisation des cultures fourragères au Maroc. Rabat: 244-253.
- **Jayanthi H., Neale C.M.U. et Wright J.L., 2007.** Development and validation of canopy reflectance based crop coefficient for potato. *Agricultural water management*. Vol. 88, 235-246.

- **Jensen J.R., 2000.** Remote sensing of the environment: an Earth resource perspective. Upper Saddle River : NJ: Prentice Hall, 544 p.
- **Jensen T., Apan A., Young F. et Zeller L., 2007.** Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform. Computers and electronics in agriculture. Vol. 59, 66-77.
- **Jensen, J.R., 1996.** Introductory digital image processing: a remote sensing perspective. Prentice-Hall, London.
- **Johnson D. M., 2014.** “An Assessment of Pre-And Within-Season Remotely Sensed Variables for Forecasting Corn and Soybean Yields in the United States.” Remote Sensing of Environment 14, 116–128. doi:10.1016/j.rse.2013.10.027.
- **Julia A., Bahjat Alhammoud B., Czapla-Myers J., Gascon F., Obaidul Haque Md., Kaewmanee M., Leigh L et Markham B L., 2018.** Sentinel-2A MSI and Landsat-8 OLI radiometric cross comparison over desert sites, European Journal of Remote Sensing, 51:1, 822-837, DOI: 10.1080/22797254.2018.1507613
- **Justice C.O., and Becker-Reshef, I., (Eds.) 2007.** Report from the Workshop on Developing a Strategy for Global Agricultural Monitoring in the framework of the Group on Earth Observations (GEO), UN/FAO, Rome.
- **Justice C., Vermote E., Townshend J.R.G., Defries R., et al. (1998).** The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 36, 1228-1249.

K

- **Kassah A., 1998.** Eau et développement agricole au Sahara maghrébin : enjeux, conflits Et arbitrages. Cah. Séch. 9 (2): 95-102.
- **Kergormad C., 2009.** La Télédétection aéro-spatiale : Une introduction. Ecole normale supérieure, Paris, pp 6-21.
- **Khaznadar M., 2016.** Etude et cartographie des services écosystémiques du Parc National d’El Kala (Algérie) thèse de doctorat, Laboratoire de Phytothérapie appliquée aux maladies chroniques UFAS1Sétif. 120 pages
- **Khorram S., Van der Wiele C. F., Koch F. H., Nelson S. A. et Potts M. D., 2016.** Principles of applied remote sensing. Springer. 307 pages, DOI 10.1007/978-3-319-22560-9
- **Kholladi M.K, 2007.** SIG pour l’étude de l’évolution de la répartition de la population de la Wilaya d’Adrar 4th International Conference: SETIT 2007 Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications March 25-29, 2007 – TUNISIA Transactions of the ASAE, vol 30, n°4, p.1071-1074.
- **Köhl, M., Magnussen, S. S., Marchetti, M. (2006).** *Sampling methods, remote sensing and GIS multiresource forest inventory.* Springer Science Business Media. 373 pages
- **Knorn, J., Rabe, A., Radeloff, V.C., Kuemmerle, T., Kozak, J. and Hostert, P., 2009.** land cover mapping of large areas using chain classification of neighboring landsat satellite images. remote sensing of environment 113, 957-964.
- **Kranz W., 1998:** Flow Control Devices for Center Pivot Irrigation Systems. Irrig. Eng. Irrigation systems and development : 5p

L

- **Laaboudi A., MouhoucheB., Slama A., 2016.** Impact des variations des températures sur les rendements de ble sous pivots dans la region d’adRAR.. African Review of Science 47-58, Technology and Development V 01, N.02/July 2016
- **Lassieur S., (2006).** Utilisation de la télédétection et des techniques SIG pour détecter et prévenir les activités de déforestation illégales. Rapport de Stage Master 2ème Année, SIG et gestion de l’espaces. Université JEAN MONNET, France. 45p.
- **Laurini R., Milleret-Raffort F., 1993.** Les bases de données en géomatique. Paris, Hermès, 340 p.
- **Li J., and Roy D.P., 2017.** A Global Analysis of Sentinel-2A, Sentinel-2B and Landsat-8 Data Revisit Intervals and Implications for Terrestrial Monitoring. Remote Sens.MDPI, 2017, 9, 902; doi:10.3390/rs9090902.
- **Lillesand T.M., Kiefer R.W. et Chipman J.W., 2008.** Remote sensing and image interpretation. 6th edition. NJ: Wiley and Son. 768 pages

- **Lillian, K.P., 2018.** Real-Time prediction of crop yields from MODIS relative vegetation health: A continentwide analysis of Africa -series for dry land vegetation dynamics monitoring.
- **Liu H.Q., Huete A.R. 1995.** A feedback based modification of the NDV I to minimize canopy background and atmospheric noise, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 33: 457-465. Yield Estimation from Landsat-5 Thematic Mapper Data
- **Lobell D. B., Ortiz-Monasterio J. I., Asner G. P., Naylor R. L. et Falcon W. P., 2005.** “Combining Field Surveys, Remote Sensing, and Regression Trees to Understand Yield Variations in an Irrigated Wheat Landscape.” *Agronomy Journal* 97: 241–249
- **Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J. et Rhind D. W., 2005.** Geographic information systems and science. John Wiley & Sons. 517 pages

M

- **Maas E. V., 1993.** Plant growth response to salt stress. H. Lieth and A. Al Masoom (eds) : Towards the Rational Use of High Salinity Tolerant Plant, vol 1 : 279-291.
- **MADR, 2014.** Minster de l’agriculture et de développement rural
- **Maselli F., Rembold F., 2001.** Analysis of GAC NDVI data for cropland identification and yield forecasting in Mediterranean African countries. *Photogramm.Eng. Remote Sens.* 67, 593–602.
- **Merabti A., 2008.** « L’exploitation agricole dans la commune d’Inzeghmir, wilaya d’Adrar, étude comparative entre les deux secteurs, traditionnel et mise en valeur agricole », Mémoire d’ingénieur (en langue arabe), Université d’Oran, 165 p.
- **Mirik M., Ansley R.J., Michels G.J. Jr. et Elliott N.C., 2012.** Spectral vegetation indices selected for quantifying Russian wheat aphid (*Diuraphis noxia*) feeding damage in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agriculture* 13, 501-516.
- **Mohd M. I. S., Ahmad S. et Abdullah A., 1994.** Agriculture Application of remote sensing: Paddy Yield Estimation from Landsat 5 Thematic Mapper Data. ACRS Publications. University Technology Malaysia. 5 pages
- **Molle B., 2005.** Choix des matériels d’irrigation en fonction de leurs performances - Des adaptations possibles pour une meilleure maîtrise des arrosages. Colloque SIMA « Eau et Agriculture Durable ». Mars 2005
- **Molle B., Baudequin D., Haidar S., 1998.** Choix du busage et conduite de l’irrigation par pivots - Prise en compte de la capacité d’inaltération du sol. *Ingénieries – Eau Agriculture & Territoires (EAT)*, IRSTEA, 1998, 57-69.
- **Monteith J.L., 1972.** Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *The Journal of Applied Ecology*, 9, 744-766.
- **Moquet A., 2003.** Apports de la télédétection pour la cartographie d’habitats terrestres en zones humides méditerranéennes, application aux habitats de la Réserve Nationale de Camargue. PFE d’Ingénieur Agronome. École Nationale Supérieure d’Agronomie et des Industries Alimentaires. Nancy. 64 p.
- **Muthy, C. S., Jonna, S., Raju, P. V., Thurivengadachari, S., & Hakeem, K. A. 1994.** Crop Yield Prediction in Command Area using Satellite Data [html]. ACRS. Retrieved 4-11, 2002, from the World Wide Web: <http://www.gisdevelopment.net/aars/acrs/1994/ps1/ps1014.shtml>

N

- **Nedjah N., Hamdaoui O., et Laskri N., 2011.** Protection des eaux souterraines de la région d’Adrar des infiltrations d’eau usée par application du lagunage naturel, 228 p.

O

- **Omoyo, N. N., Wakhungu, J. , and Oteng’i., S. 2015.** Effects of climate variability on maize yield in the arid and semi-arid lands of lower eastern Kenya. *Agriculture & Food Security*, 4(1),
- **ONFAA, 2015.** Observatoire National des filières agricoles et agroalimentaires, bilan du commerce extérieur algérien des céréales. 8 pages
- **Ould Rebai A., Hartani T., Chabaca MN., Kuper M., 2017.** Une innovation incrémentielle : la conception et la diffusion d’un pivot d’irrigation artisanal dans le Souf (Sahara algérien). *Cah. Agric.* 26: 35005. 9 p
- **OSS ., 2008.** Observatoire du Sahara et du Sahel. ISBN : 9773-856-01-5

- **Otmane T. et Kouzmine Y., 2013.** The agricultural development in the Algerian Sahara: Myths, outcomes and impacts in the Touat-Gourara- Tidikelt area. *CyberGeo* 2013 doi: 10.4000/cybergeogeo.25732.
- **Otmane T., 2010.** Mise en valeur agricole et dynamiques rurales dans le Touat, le Gourara et le Tidikelt (Sahara algérien). Doctorat, Université d'Oran, Algérie. 400 pages
- **Ould Baba SY, M., 2005 :** « *Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional* », Thèse de doctorat de Géologie, Université de Tunis, 261p.

P

- **PDGDRS., 1999.** **Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes** Chapitre Rapport sol Lot 1 Analyse-contraintes: Etudes de base ; Phase II A3 : Monographies spécialisées des ressources naturelles Ressources en eau ; Volume 2 : Modélisation du Continental Intercalaire 56p
- **Planetoscope-statistique., 2013.** Statistiques mondiales en temps réel sur les céréales www.planetoscope.com/cereales/193-production-mondiale-de-mais
- **Peñuelas J., Filella I., Biel C., Serrano L. et Save R., 1993.** The reflectance at the 950-970 region as an indicator of plant water status. *International Journal of Remote Sensing* 14 (10), 1887-1905.
- **Picard D. et Derieux M., 1990.** « physiologie et production de maïs », INRA département d'agronomie, Pau-France, 499 Pages
- **Pinter P.J., Hatfield J.L., Schepers J.S., Barnes E.M., Moran M.S., Daughtry C.S.T., et Upchurch D.R., 2003.** Remote sensing for Crop Management. 18 p.
- **Prasad A. K., Chai L., Singh R. P., et Kafatos M., 2006.** "Crop Yield Estimation Model for Iowa Using Remote Sensing and Surface Parameters." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 8: 26–33. doi:10.1016/j.jag.2005.06.002.

Q

- **Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H. et Sorooshian S., 1994.** A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119-126.
- **Weng Q, 2010:** Introduction to Geographic Information System. 3ème Edition, 432 p.

R

- **Ramoelo A., Cho M.A., Mathieu R., Skidmore A.K., Schlerf M., Heitkönig I.M.A. - Rembold F., 2013.** *Remote Sensing*, 5, 1704-1733.
- **Rembold F., C. Atzberger Savin I., et Rojas O., 2013.** "Using Low Resolution Satellite Imagery for Yield Prediction and Yield Anomaly Detection." *Remote Sensing* 5: 1704–1733. doi:10.3390/rs5041704.
- **Reynolds C. A., Yitayew M., Slack D. C., Hutchison C. F., Huete A. et Petersen M. S., 2000.** Estimating crop yields and production by intergrating the FAO Crop Specific Water Balance model with real-time satellite data and ground based ancilliary data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(18), 3487-3508.
- **Robert M., 1996.** Le sol, interface dans l'environnement, ressource pour le développement Paris, ed. Masson 244 p.
- **Rocha, A. V., and Shaver G. R., 2009.** Advantages of a two band EVI calculated from solar and photosynthetically active radiation fluxes, *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(9), 1560-1563.
- **Rolland L., 1980.** La mécanisation de l'irrigation par aspersion ; Bulletin 35 FAO d'irrigation et de drainage. Organisation des nations unies pour l'alimentation et l'agriculture Rome.
- **Ruas A. (Ed.), 2011.** *Advances in Cartography and GIScience. Volume 1. Lecture Notes in Prins, 2011: Integrating environmental and in situ hyperspectral remote sensing variables for grass nitrogen estimation in savanna ecosystems, 34th International Symposium on the Remote Sensing of Environment (ISRSE). The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring, Sydney, Australia, <http://www.isprs.org/proceedings/2011/ISRSE-34/index.html> Accessed November6 2012. 560 page*

S

- **Sahli Z., 1997.** Deux tentatives controversées de modernisation de l'agriculture en zone aride : L'opération "tomate d'Adrar" et la mise en valeur hydro-agricole du Touat Gourara (Wilaya d'Adrar-Algérie). *Options Méditerranéennes* 29(A) 283–295.
- **Schuler R. T., 2002.** Remote Sensing Experiences in Production Fields. Retrieved 16/07,2002, from the World Wide Web:<http://alfi.soils.wisc.edu/extension/FAPM/2002proceedings/Schuler.pdf>

- **Scotford I.M. et Miller P.C.H., 2005.** Applications of Spectral Reflectance Techniques in Northern European Cereal Production: A Review. *Biosystems Engineering* 90(3), 235-250.
- **Serrano L., Fillella I. et Peñuelas J., 2000.** Remote sensing of biomass and yield of winter wheat under different nitrogen supplies. *Crop Science* 40, 723-731
- **Sellers P.J., 1985.** Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *Int. J. Remote Sensing*. 6, 1 335-1 372
- **Serratos-Hernandez J.A., 2009.** The origin and diversity of maize in the American continent. Ed. Green Peace, Mexico, 33 p.
- **Simard, J. 2018.** Méthodes de régression robustes. Mémoire de libération du grade de maître sciences (M.Sc), dirigé par Bouezmarni, M. Université de Sherbrooke. 115 pages
- **Sitayeb T., et Benabdéli K., 2008.** Contribution à l'étude de la dynamique de l'occupation des sols de la plaine de la Macta (Algérie) à l'aide de la télédétection et des systèmes d'information géographique. *C. R. Biologies* 331, 466-474
- **Souidi Z., Hamimed A., Zaagane M. et Donze F., 2017.** Cartographie des zones à risque d'érosion hydrique : Application au bassin versant d'oued Fergoug dans les monts des Béni-Chougranes en Algérie. *SAGREN (Systèmes Agricoles et Environnement) Vol 01, No 1, pp 1-8.*
- **Stafford J. V., 2000.** "Implementing Precision Agriculture in the 21st Century." *Journal of Agricultural Engineering Research* 76: 267-275. doi:10.1006/jaer.2000.0577.
- **Soltner D., 2005.** Les grandes productions végétales. 20^{ème} Edition. Collection sciences et techniques agricoles. Bressuire, France, 472 p.

T

- **Tanaka A. et Yamaguchi J. 1972.** « Dry matter production, yield components and grain yield of the maize plant » *J. Fac. Agric. Hokkaido Univ.*, 57:71-132.]
- **Tébourbi R., 2006.** SIG- Télédétection partie 1 : Télédétection. SUP'COM, 6 p.
- **Tahiri A., Destain J., Druart Ph. et Thonart Ph., 2014.** Propriétés physico-chimiques et biologiques des substances humiques en relation avec le développement végétal (synthèse bibliographique). *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2014 18(3), 436-445
- **Toumi S., Mohamed Meddi M., Mahé G. and Brou.Y.T., 2013.** Cartographie de l'érosion dans le bassin versant de l'Oued Mina en Algérie par télédétection et SIG. *Hydrological Sciences Journal* 2013, Vol. 58, No. 7, pp1542-1558
- **Tucker C.J., 1979.** "Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation." *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150. doi:10.1016/0034-4257(79)90013-0.
- **Tucker C.J., Holben B.N., Elgin J.H., McMurtrey J.E., 1981.** Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sens Environ* 11:171-189 (9) (PDF) The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unforeseen successes in animal ecology.
- **Tyner J.A., 2010.** Principles of Map Design. New York: The Guilford Press. 259 pages

U

- **USDA (United States Department of Agriculture), 2005.** Germplasm resources information network (GRIN). Base de données en ligne. URL : <http://www.arsgrin.gov/egi-in/npgs/html/taxon.pl>
- **UVED, 2008.** ENVCAL - Suivi de l'environnement par télédétection, Cours en ligne. Université Paris I, Panthéon-Sorbonne.
- **Ustin, S.L., and Gamon, J.A., 2010.** Remote sensing of plant functional types. *New Phytologist* 186, 795-816.

V

- **Van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckeles, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., Bezlepkina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A., Van der Wal, T., Wien, J.E., Wolf, J., 2008.** Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS) *Agricultural Systems* 96 (2008) 150-165
- **Verma K. S., Saxena R. K., Hajare T. N. et Kumar S. C. R., 1998.** Gram yield estimation through SVI under variable soil and management conditions. *International Journal of Remote Sensing*, 19(13), 2469-2476.
- **Vintrou E., 2012.** Cartographie et caractérisation des systèmes agricoles au Mali par télédétection à moyenne résolution spatiale. *Sciences agricoles. AgroParisTech.*, 205 pages

W

- **Wang, L., Tian, Y., Yao, X., Zhu, Y., & Cao, W., 2014.** Predicting grain yield and protein content in wheat by fusing multi-sensor and multi-temporal remote-sensing images. *Field Crops Research*, 164, 178–188. <http://doi.org/10.1016/j.fcr.2014.05.001>
- **Weng Q., 2010.** Remote sensing and GIS integration: theories, methods, and applications. New York: McGraw-Hill, 416 p.
- **Wójtowicz M., Wójtowicz A. et Piekarczyk J., 2016.** “Application of Remote Sensing Methods in Agriculture.” *Communications in Biometry and Crop Science* 11: 31–50.

Y

- **Yang C., Everitt J. H. et Du Q., 2010.** Applying linear spectral unmixing to airborne hyperspectral imagery for mapping yield variability in grain sorghum and cotton fields. *Journal of the Application of Remote Sensing* 4(1), 041887, 1-11.
- **De Kouassi., y , 2017.** Fiche technico-économique du maïs. Agence Nationale d’Appui au Développement Rural (ANADER) . 5 pages

Z

- **Zenkri S., 2017.** L’agriculture saharienne : Du système oasien traditionnel à l’établissement d’une conception d’économie de marché et de développement durable. Thèse De Doctorat Sciences Agronomiques Université Abdelhamid Ibenbadis – Mostaganem. 244 pages
- **Zhang, J., Feng, L., & Yao, F., 2014.** Improved maize cultivated area estimation over a large scale combining MODIS–EVI time series data and crop phenological information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 94, 102–113.

Annexes

Annexe 01 : Questionnaire- Enquête

données sur les Agriculteurs

1. Nom et Prénom

2. Adresse

3. Age

4. Niveau d'instruction

1. école coranique 2. primaire 3. CEM
 4. secondaire 5. universitaire 6. INSEFP
 7. autre

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

5. Formation technique en Agr

1. oui 2. non

6. Origine de l'Agriculteur (Nord/Sud)

1. Sud 2. Nord

7. esprit d'investir

1. oui 2. non

8. Potentielle financier de l'Agr

1. élevé 2. moyenne 3. faible

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

9. Esprit de Coopération entre exploitation

1. oui 2. non

10. vulgarisation (relation avec la chambre d'ag)

1. oui 2. non

11. Êtes-vous assuré contre les calamités naturelles?

1. oui 2. non 3. Temps en temps

12. Adhésion au programme d'état (PNDA)

1. oui 2. non

13. Mode de suivi de la culture

Personnel

niveau et le nombre de la main d'oeuvre

14. MO Familiale

15. MO salariés permanents

16. MO salariés saisonniers

17. MO qualifié

18. MO total

19. Faites-vous appels à des spécialistes?

1. oui 2. non 3. NON disponible 4. coûteux

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

Information sur le terrain

cadre concession ou APFA autres

20. Année Aquisition de Terrain

21. Cadre d'aquisition de terrain

1. APFA 2. Concession 3. propriété
 4. location

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

22. Surface totale

23. Surface agricole utile

Augmentation de la taille de l'exploitation

24. Est-ce que vous avez agrandi votre exploitation ces dernières années?

1. oui 2. non

25. Si oui sur quels fonds ?

1. Subventions de l'état (PNDR) 2. Fonds propres
 3. Crédit bancaire 4. NON

Vous pouvez cocher plusieurs cases (3 au maximum).

26. Avez vous des difficultés de remboursement de dettes?

1. oui
 2. non
 3. S'il y aura une Extension
 4. Taux d'intérêt élevé
 5. charges élevées (Prix des intrants)
 6. faible production
 7. Possibilité d'Effacement des dette par l'Etat

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

végétation

information sur le Maïs

27. Quelles sont les cultures pratiquées ?

1. Maïs 2. Blé 3. Rotation

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

28. Quels types de cultures (d'été) installées ?

1. Maïs grain 2. Maïs ensilage

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

29. Quelles sont les variétés utilisées?précoce ou tardive ?

1. colonia 2. masria 3. Ranti 4. hana
 5. panam 6. codilac 7. Précoce 8. tardive

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

30. Est-ce-qu'il ya un Effet de cycle de la Variété du maïs (précoce ou tardive) sur MH?

1. il y a un effet 2. il n'y a pas un effet 3. Sait pas

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

31. combien de comagnes vous avez cultivé du Maïs ?

1. 1 compagne 2. 2comp 3. 3comp
 4. 2012 5. 2013 6. 2014
 7. 2015 8. 2016 9. 2017
 10. 4comp

Vous pouvez cocher plusieurs cases (9 au maximum).

Le SOL

caractéristiques physico-chimiques

32. outils préparation du sol?

1. charnu à dent 2. charnu à disque 3. cover crope
 4. 2croisement

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

33. Faites-vous les Analyses du sol?

1. oui 2. non

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

34. Est ce qu'il y a du sel/Sol

1. oui 2. non 3. faible 4. moyenne 5. fort

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

35. Pouvez vous Estimer la Surface du sol salé en ha?

36. Présence Cailloux?

1. non 2. légèrement (-10%)
 3. grande partie (+30%)

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

37. Est-ce-qu'il y a un effet de residus du maïs sur l'Aération du sol pour une culture du blé (Rotation)?

1. oui 2. non 3. Sait pas

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

38. coût de travail du sol pour le blé après une culture du maïs ?

1. augmente 2. n'a pas d'effet 3. diminue

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

Semis

données sur les étape de semis

39. date de semis idéale

1. début juillet 2. mi juillet
 3. fin juillet 4. début aout
 5. mi aout 6. fin aout
 7. début septembre

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

40. Nombre de Rang de semoir?

1. 4 2. 5 3. 6 4. 3

Vous pouvez cocher plusieurs cases (3 au maximum).

41. densité de semis

42. Manque de levé de végétation

1. sel 2. machine 3. vent
 4. rangeur 5. profondeur 6. eau
 7. semence 8. autres 9. Non
 10. BLOCAGE

Vous pouvez cocher plusieurs cases (8 au maximum).

43. vous avez un semoir ?

1. oui 2. non 3. location

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

Irrigation

matériel et technique d'irrigation

58. Quelle est le nombre de pivots dans votre exploitation?

59. Quelle est la marque de votre pivot?

1. Anabib 2. Zematic 3. Otech
 4. Valmont 5. Rénové

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

60. combien de pivots cultivé par le Maïs 2016?

61. quelle est la surface totale pivots cultivé en maïs 2016?

62. combien de pivots cultivés par le Maïs en 2015?

63. quelle est la surface totale pivots cultivé en maïs 2016?

64. Combien de pivots cultivés par le Maïs en 2014?

65. quelle est la surface totale pivots cultivé en maïs 2014?

70. quelle est le coût de la consommation d'électricité de la campagne de la culture du Maïs/PIVOT?

1. 30 2. 35 3. 40 4. 45 5. 50 6. 55

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

66. Pratiquez-vous le Test d'uniformité de la PLUVIOMÉTRIE sur la rampe pivotante? mm/j

1. oui 2. non 3. à l'oeil (Sans test)

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

67. quelle est la Vitesse moyenne de rotation du pivot% durant le cycle de croissance?

68. Est-ce-qu'il y a une satisfaction exacte dans les besoins en d'irrigation de la culture ?

1. satisfait 2. non satisfait
 3. PAS TELLEMENT 4. Avec inondation

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

69. changez-vous les Buses de votre Pivots?

1. chaque 3ans
 2. chaque 5ans
 3. jamais
 4. celle détérioré ou cassée

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

Etat de la machine d'irrigation (Pivot)

71. degré de la corrosion sur le tubage de Pivot?

1. faible 2. quelques travées 3. toutes les travées

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

72. déplacez-vous le pivot pour installer une deuxième culture?

1. OUI 2. NON

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

73. quelle est le type d'Asperseurs monté sur le Pivots?

1. Springer 2. Nelson 3. ne Sait pas

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

74. d'Après vous quel est le types d'Asperseur le plus adapté à l'irrigation du maïs pour un sol sableux?

1. Sprinnenger 2. Nelson 3. ne sait pas

Vous pouvez cocher plusieurs cases (2 au maximum).

75. y a-il des fuites d'eau sur le Pivot?

1. oui 2. non

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

76. quelles sont le pannes fréquentes sur le pivot?

1. multiples 2. Simple
 3. Réducteurs 4. Cardans
 5. Eléctrique 6. chute de travée
 7. Roues 8. Pas de panne

Vous pouvez cocher plusieurs cases (7 au maximum).

77. Les roues de Pivot enfoncent-elles dans les sol en formant des Ornières?

1. oui 2. 30 à 40 cm de prof 3. travées intérieurs
 4. non

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

78. A votre avis quelles sont les conséquences de Formation des Ornières?

1. Les roues tournent difficilement
 2. usure au niveau de réducteur
 3. destruction des cardans
 4. consommation d'énergie
 5. difficulté de dépanage
 6. autres

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

Récolte

79. Quel est taux d'Humidité de l'épi enregistré (noté) au moment de la récolte?

80. vous avez enregistré un taux d'H plus bas que celui exigie par l'ONAB qui est 15 à 18% pourquoi?

1. retard de la MB
 2. retard de Transport
 3. absence de système de séchage
 4. s'il y a lieu

Vous pouvez cocher plusieurs cases (3 au maximum).

81. avez-vous enregistré de la verse sur votre champ du Maïs?

1. oui 2. non

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

82. quelles sont les Causes de la verse du maïs?

1. retard de moisson 2. manque de machine
 3. les vents de sables 4. S'il y a lieu

Vous pouvez cocher plusieurs cases (3 au maximum).

83. quelle est la date de récolte?

1. Décembre 2. Janvier 3. Février
 4. Mars 5. Avril

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

84. Vous avez une MB pour récoltez le maïs?

1. location MB 2. j'ai ma propre MB

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

Rendement qx/ha

85. Pouvez vous estimer le rendement avant la récolte?

86. quel est le Rendement moy du maïs des campagnes que vous avez réalisées?

87. Quel est le Rdt qx/ha en 2016?

88. Quel est le Rdt qx/ha en 2015?

89. Quel est le Rdt qx/ha en 2014?

90. Quel est le Rdt qx/ha en 2013?

91. quelles sont les Causes de pertes de rendement?

1. sel 2. machine (Retard ou réglage)
 3. égrenage 4. vent
 5. rangeur 6. profondeur
 7. manque eau 8. Pas de pertes
 9. EXCEE D'eau 10. blocage

Vous pouvez cocher plusieurs cases (8 au maximum).

92. Pensez-vous que sans l'aide de l'état cette culture ne pourra pas être persister?

1. disparaître
 2. agriculteur doit travailler en coopération
 3. penser à la transformation
 4. autres
 5. Fluctuation (non stabilité de décisions de la tutelle de secteur agricole)

Vous pouvez cocher plusieurs cases.

Annexe 2- Résultats de calculs des indices de végétation

a- L'indice de végétation NDVI

N° Pivot	Agriculteurs	Indice de végétation		Rendement q/ha	
		NDVI max	NDVI Moy	Observé	Estimé
PT01	Nedjari kaddour	0,23	0,74	26,88	30,51
PT02	Kasdi Sof	0,86	0,14	52,14	56,67
PT03	Kasdi A/nour	0,85	0,14	63,40	56,46
PT04	Kasdi Omar	0,82	0,16	52,36	54,83
PT05	Kasdi Ali	0,82	0,12	68,86	54,13
PA06	Daamache W moy. 3 pivots	0,85	0,09	56,85	55,45
PF07	CCLS	0,18	0,71	37,29	26,85
PF08	Titafi	0,01	0,39	6,95	10,23
PF09	Boulahia moy. 3 pivots	0,00	0,85	34,78	18,94
PF10	Ben aoumer moy. 2 pivots	0,40	0,49	48,55	35,74
PF11	Zenani	0,00	0,70	25,45	15,84
PF12	Baba A/slem moy. 2 pivots	0,03	0,82	20,95	20,15
PF13	Oeg a/allah moy. 3 pivot	0,03	0,79	27,42	19,79
PZ14	Bensmail aek	0,62	0,25	35,59	44,60
PZ15	Bensmail a/allah	0,57	0,35	35,66	43,88
PZ16	Omari aek moy. 2 pivots	0,40	0,47	39,68	35,45
PZ17	Dabla moh	0,42	0,45	31,40	36,41
PZ18	Taleb saddik	0,55	0,33	49,99	42,08
PZ19	Belbali aek	0,52	0,30	26,52	39,69
PA20	Ferhat lies moy. 2 pivots	0,88	0,08	50,34	56,69
PF21	Zenani mohamed	0,87	0,07	63,50	56,32
PF22	Benoumer mohamed	0,86	0,09	68,89	55,87
PF23	Ferme ccls adrar	0,44	0,50	41,17	38,78
PF24	Ouali mohamed	0,90	0,05	55,40	57,43
PF25	Ferdjani aek	0,87	0,07	48,00	56,21
PT26	Kasdi ali ksa	0,36	0,57	37,88	34,79
PT27	Kasdi brahim	0,67	0,26	44,56	47,81
PT28	Kasdi omar	0,88	0,08	67,80	56,91
PT29	Kasdi sofiane	0,23	0,68	22,56	29,69
PT30	Kasdi rabeh	0,89	0,05	65,23	56,99
PT31	Tamaziret chaabane	0,85	0,13	49,06	56,36
PT32	Kazi t moy. 5 pivots	0,66	0,27	42,95	47,47
PZ33	Oeg a/llah abdselem	0,62	0,33	36,57	45,89
PZ34	Bensmail aek	0,78	0,17	54,81	52,72
PZ35	Belbali aek	0,49	0,45	33,36	40,89
PZ36	Omari freres moy. 2 pivots	0,54	0,39	45,52	42,76
PZ37	Bensmail a/llah	0,85	0,11	61,09	55,54
PZ38	Oum el ghait tayeb	0,01	0,87	25,25	20,02
PZ39	Chahir lamia cherine	0,86	0,09	64,79	56,06
PZ40	Regedi a/llah	0,36	0,60	37,94	35,69

PZ41	Kenzah mohamed	0,90	0,05	68,89	57,80
PZ42	Belbali Hamza	0,54	0,39	53,14	42,25
PZ43	Moulay Larbi	0,24	0,71	41,30	30,44
PF44	Wali Mohamed	0,01	0,89	13,86	20,42
PF45	CCLS Adrar	0,38	0,47	30,02	34,69
PF46	Medjabri AEK	0,85	0,08	54,43	55,27
PZ47	Garaf AEK	0,73	0,20	58,27	50,11
PZ48	Belbali Hamza	0,72	0,17	42,34	49,24
PZ49	Bahamdi AEK	0,03	0,85	22,33	20,44
PZ50	Belbali Salem	0,69	0,19	37,69	47,77
PZ51	Belbali AEK	0,48	0,42	21,33	39,59
PZ52	Barmati Moh	0,27	0,68	29,27	31,64
PZ53	Bensmail A/Allah	0,82	0,08	62,44	53,36
PZ54	Djoumi Aissa	0,79	0,16	40,68	52,75
PZ55	Djoumi Bouhamou moy. 2 pivots	0,65	0,29	46,39	47,25
PZ56	Regadi A/Allah	0,11	0,71	18,20	22,64
PZ57	Ben hamadi Moh	0,45	0,48	22,36	38,81
PZ58	Benhamadi hamadi	0,13	0,80	17,87	25,82
PZ59	Belbali a/rahmane	0,58	0,36	32,05	44,01
PT60	Nadjari Kaddour	0,57	0,35	36,47	43,76

b- L'indice de végétation EVI

N° Pivot	Agriculteurs	Végétation dense			Rendement q/ha	
		Classe1 EVI ₁	Classe2 EVI ₂	Classe3 EVI ₃	Observé	Estimé
PT01	Nedjari kaddour	0,063	0,285	0,551	26,88	29,95
PT02	Kasdi Sof	0,584	0,189	0,094	52,14	51,82
PT03	Kasdi A/nour	0,594	0,199	0,126	63,40	53,37
PT04	Kasdi Omar	0,458	0,343	0,116	52,36	49,36
PT05	Kasdi Ali	0,641	0,178	0,095	68,86	55,14
PA06	Daamache W moy. 3 pivots	0,723	0,108	0,079	56,85	57,76
PF07	CCLS	0,100	0,301	0,512	37,29	32,17
PF08	Titafi	0,000	0,007	0,236	6,95	10,50
PF09	Boulahia moy.3 pivots	0,000	0,014	0,783	34,78	20,94
PF10	Ben aoumer moy. 2 pivots	0,400	0,493	0,021	48,55	48,93
PF11	Zenani	0,000	0,688	0,225	25,45	33,55
PF12	Baba A/slem moy. 2 pivots	0,000	0,170	0,666	20,95	24,09
PF13	OEG A/Allah moy. 3 pivot	0,000	0,060	0,823	27,42	23,28
PZ14	Bensmail AEK	0,196	0,458	0,222	35,59	38,27
PZ15	Bensmail A/Allah	0,003	0,424	0,438	35,66	28,71
PZ16	Omari AEK moy. 2 Pivots	0,357	0,378	0,149	39,68	44,63
PZ17	Dabla Moh	0,000	0,545	0,332	31,40	30,67

PZ18	Taleb saddik	0,316	0,293	0,245	49,99	40,86
PZ19	belbali AEK	0,173	0,480	0,236	26,52	37,84
PA20	Ferhat Lies moy. 2 pivots	0,642	0,192	0,130	50,34	56,34
PF21	Zenani Mohamed	0,758	0,124	0,057	63,50	60,16
PF22	Benoumer Mohamed	0,672	0,213	0,063	68,89	57,72
PF23	Ferme CCLS Adrar	0,300	0,514	0,138	41,17	45,39
PF24	Ouali Mohamed	0,738	0,185	0,043	55,40	60,68
PF25	Ferdjani AEK	0,757	0,134	0,044	48,00	60,20
PT26	Kasdi Ali	0,030	0,595	0,304	37,88	33,79
PT27	Kasdi Brahim	0,313	0,438	0,171	44,56	44,22
PT28	Kasdi Omar	0,883	0,044	0,042	67,80	65,23
PT29	Kasdi Sofiane	0,274	0,235	0,404	22,56	39,14
PT30	Kasdi Rabeh	0,861	0,056	0,039	65,23	64,15
PT31	Tamaziret Chaabane	0,749	0,109	0,091	49,06	59,71
PT32	Kazi (moy. 5 pivots)	0,401	0,380	0,188	42,95	48,26
PZ33	Oeg a/Allah abdselem	0,009	0,688	0,254	36,57	34,65
PZ34	Bensmail AEK	0,475	0,356	0,102	54,81	50,65
PZ35	Belbali aek	0,362	0,288	0,291	33,36	44,50
PZ36	Omari freres moy. 2 pivots	0,299	0,387	0,242	45,52	42,92
PZ37	Bensmail a/Allah	0,477	0,394	0,079	61,09	51,62
PZ38	Oum El ghait Tayeb	0,000	0,040	0,811	25,25	22,35
PZ39	Chahir Lamia Cherine	0,687	0,194	0,067	64,79	58,13
PZ40	Regedi A/Allah	0,007	0,424	0,501	37,94	30,11
PZ41	Kenzah Mohamed	0,840	0,031	0,063	68,89	62,43
PZ42	Belbali Hamza	0,441	0,436	0,026	53,14	49,75
PZ43	Moulay Larbi	0,35	0,367	0,161	41,30	44,03
PF44	Wali Mohamed	0,002	0,126	0,731	13,86	23,95
PF45	Ccls Adrar	0,163	0,295	0,422	30,02	34,36
PF46	Medjabri AEK	0,778	0,120	0,061	54,43	61,35
PZ47	Garaf AEK	0,422	0,397	0,100	58,27	48,59
PZ48	Belbali Hamza	0,363	0,435	0,140	42,34	46,82
PZ49	Bahamdi AEK	0,000	0,045	0,817	22,33	22,66
PZ50	Belbali Salem	0,192	0,615	0,117	37,69	41,48
PZ51	Belbali AEK	0,000	0,002	0,881	21,33	22,38
PZ52	Barmati Moh	0,045	0,330	0,564	29,27	30,53
PZ53	Bensmail a/Allah	0,268	0,616	0,055	62,44	45,25
PZ54	Djoumi Aissa	0,411	0,384	0,159	40,68	48,55
PZ55	Djoumi Bouhamou	0,443	0,297	0,212	46,39	48,58
PZ56	Regadi a/Allah	0,000	0,002	0,647	18,20	17,99
PZ57	Ben Hamadi Moh	0,260	0,230	0,439	22,36	38,71
PZ58	Benhamadi Hamadi	0,037	0,150	0,722	17,87	26,85
PZ59	Belbali A/Rahmane	0,000	0,010	0,859	32,05	22,21
PT60	Nadjari Kaddour	0,000	0,297	0,630	36,47	27,77

Annexe 03

Coordonnées de forages alimentant les Pivots – ANRH ADRAR

Commune	Lieu_dit	X	Y
Sbaa/Tsabit	Abdiche 2	0° 8' 30,998"	28° 17' 11,040"
Zaouiet Kounta (ZK)	Ali behaii	0° 10' 13,001"	27° 18' 29,160"
ZK	Taleb Seddik 2	0° 2' 51,000"	27° 9' 57,960"
ZK	Imam Malek	0° 4' 23,002"	27° 9' 15,840"
ZK	El Feth	0° 9' 20,999"	27° 14' 43,080"
ZK	Acer 1	0° 9' 33,998"	27° 15' 24,120"
ZK	8 mai 45/ °01	0° 9' 14,000"	27° 16' 6,960"
ZK	Cheikh Larbi 1 (kaboya k)	0° 8' 44,999"	27° 16' 30,000"
ZK	Ali behaii 1	0° 9' 11,999"	27° 17' 30,840"
ZK	Khaled ibe el alid	0° 9' 34,000"	27° 18' 2,000"
ZK	Si el houas (moussa m)	0° 8' 29,000"	27° 15' 57,960"
ZK	El mokhtar	0° 8' 34,001"	27° 15' 23,040"
ZK	Amir a,e,k djoumi	0° 9' 0,000"	27° 15' 39,960"
ZK	Be abdelmoume	0° 8' 16,001"	27° 14' 56,040"
ZK	Omer ibe el khatab	0° 7' 59,002"	27° 14' 25,080"
ZK	Akid chabou (salmi2)	0° 9' 7,000"	27° 17' 21,000"
ZK	8 mai 45/ °02 (kadi y)	0° 8' 38,000"	27° 17' 17,160"
ZK	Re f foggara (azzi)	0° 8' 48,001"	27° 14' 44,880"
ZK	Djoumi 1	0° 7' 14,999"	27° 18' 24,840"
ZK	Bouhamou 1	0° 7' 48,000"	27° 21' 15,840"
ZK	Sambili 1	0° 7' 35,000"	27° 20' 7,080"
ZK	Houari boumedie e(faradji)	0° 10' 5,002"	27° 16' 32,160"
ZK	Oueld el mada i	0° 7' 49,001"	27° 13' 53,040"
ZK	Be smail 1	0° 6' 6,001"	27° 14' 3,840"
ZK	Cheikh el kebir	0° 8' 11,000"	27° 16' 21,000"
ZK	Djoumi 2	0° 7' 9,001"	27° 17' 47,040"
ZK	Sambili 2	0° 7' 27,998"	27° 19' 31,080"
ZK	Omari 1	0° 4' 54,998"	27° 13' 4,080"
ZK	Cheikh larbi 2	0° 8' 35,002"	27° 17' 11,040"
ZK	Asso, foggara (zaglou)	0° 8' 56,000"	27° 17' 57,120"
ZK	Omari freres 1	0° 7' 18,998"	27° 15' 2,880"
ZK	Sid mokdache	0° 8' 33,000"	27° 15' 24,120"
ZK	Moulay taki (be zi a)	0° 7' 41,999"	27° 17' 21,120"
ZK	Hamou belhadj	0° 7' 41,999"	27° 20' 44,160"
ZK	Salmi freres	0° 9' 36,000"	27° 16' 58,080"
ZK	Omari freres 2	0° 7' 4,001"	27° 14' 26,880"
ZK	Be smail 2	0° 5' 52,001"	27° 13' 32,880"
ZK	Ferme pilote	0° 6' 6,001"	27° 16' 3,000"
ZK	Djoumi 3	0° 6' 31,000"	27° 18' 33,840"
ZK	Khaled ibe Eloualid 2	0° 9' 5,000"	27° 18' 36,000"
ZK	ACER 2	0° 8' 3,998"	27° 18' 23,040"
ZK	Cheikh Larbi 3	0° 7' 38,000"	27° 16' 43,000"

ZK	Bouhamou Fares 2	0° 7' 54,998"	27° 21' 51,840"
ZK	Grands Travaux	0° 7' 45,001"	27° 18' 59,040"
ZK	Gep Dabella 1	0° 6' 49,000"	27° 13' 46,920"
ZK	Baghdadi	0° 5' 31,999"	27° 12' 47,880"
ZK	Sidi el Mokhtar	0° 8' 26,999"	27° 15' 12,960"
(Inzagmir IZ)	Soudai Boudjemaa	0° 4' 22,001"	27° 8' 36,960"
IZ	Khali Ali	0° 3' 47,999"	27° 8' 26,880"
IZ	Ahmed be Youcef	0° 3' 1,001"	27° 9' 6,120"
IZ	Be M'ghili	0° 2' 26,999"	27° 8' 45,960"
IZ	Cheikh Abderrahma e	0° 4' 5,999"	27° 7' 58,080"
IZ	Ibe Badis	0° 2' 41,605"	27° 7' 7,670"
IZ	Saliha Ouled Kablia	0° 2' 28,000"	27° 9' 24,840"
IZ	Oum el gheit Abed Essalam	0° 1' 40,001"	27° 7' 57,000"
IZ	Zoubir ibe Ela am	0° 1' 32,999"	27° 9' 16,920"
ZK	Amirouche 1	0° 6' 0,000"	27° 11' 3,840"
ZK	M,lakbir be smail	0° 5' 16,001"	27° 10' 27,120"
ZK	Abed karim maghili 1	0° 5' 21,001"	27° 11' 0,960"
ZK	Salah eddi e el ayoubi	0° 4' 54,998"	27° 9' 57,960"
ZK	Akid Lotfi 1	0° 5' 39,001"	27° 11' 30,840"
ZK	Essalam	0° 6' 51,000"	27° 12' 33,000"
ZK	Ibe Badis	0° 6' 37,001"	27° 12' 11,160"
ZK	Amirouche 2	0° 4' 34,000"	27° 11' 38,040"
ZK	Abed el Karim el Maghili	0° 4' 29,000"	27° 10' 58,000"
ZK	Me Acir	0° 9' 18,000"	27° 13' 54,120"
ZK	Tazoult	0° 8' 42,000"	27° 19' 15,960"
ZK	Stah azzi	0° 4' 31,001"	27° 13' 39,000"
Fenoughil (Fg)	GDAS 1	0° 9' 40,000"	27° 31' 45,120"
Fg	Daouali 01	0° 7' 34,000"	27° 32' 11,040"
Fg	Sahouli tahar (be aumeur)	0° 6' 11,999"	27° 33' 15,120"
Fg	Salam 1 (beradai ali)	0° 10' 41,002"	27° 32' 8,160"
Fg	Akid lotfi (be hachem)	0° 9' 4,000"	27° 32' 12,840"
Fg	Megue i ferhat kheira	0° 12' 25,999"	27° 32' 39,840"
Fg	Laazri	0° 11' 42,000"	27° 32' 29,000"
Fg	Medjebri	0° 11' 39,998"	27° 33' 6,840"
Fg	Salam 2	0° 10' 18,998"	27° 31' 23,880"
Fg	GDAS 2	0° 9' 1,001"	27° 31' 23,880"
Fg	GDAS 3	0° 8' 22,999"	27° 31' 27,120"
Fg	Hilali 1	0° 6' 43,999"	27° 32' 45,960"
Fg	GDAS 4	0° 8' 8,999"	27° 30' 51,120"
Fg	GDAS 5	0° 7' 37,999"	27° 31' 32,160"
Fg	Daha a,rahma e(be hachem)	0° 11' 22,000"	27° 31' 52,000"
Fg	Moulay lahce	0° 9' 15,001"	27° 32' 51,000"
Fg	Baba salem 1	0° 8' 17,002"	27° 34' 5,880"
Fg	Da ouali 2	0° 8' 16,001"	27° 33' 21,960"
Fg	Hilali djemaa 2	0° 7' 8,000"	27° 33' 19,080"
Fg	GDAS 6	0° 7' 3,000"	27° 31' 58,080"

Fg	Serguema (Molay Ab)	0° 7' 45,998"	27° 34' 46,920"
Fg	Chouiref (za a i)	0° 5' 44,002"	27° 33' 34,920"
Fg	GDAS 7	0° 6' 16,999"	27° 32' 13,920"
Fg	Essalam 3	0° 10' 54,001"	27° 31' 14,160"
Fg	Batata (Le ali)	0° 5' 28,000"	27° 32' 54,960"
Fg	Baba salem 2	0° 7' 23,999"	27° 34' 9,120"
Fg	CCLS	0° 2' 30,001"	27° 31' 13,080"
Fg	CCLS	0° 2' 37,000"	27° 31' 45,840"
Fg	CCLS	0° 2' 44,002"	27° 32' 25,080"
Fg	CCLS	0° 3' 28,001"	27° 32' 17,880"
Fg	CCLS	0° 3' 20,002"	27° 31' 40,080"
Fg	CCLS	0° 4' 3,000"	27° 31' 32,880"
Fg	CCLS	0° 4' 10,999"	27° 32' 11,040"
Fg	CCLS	0° 4' 54,001"	27° 32' 4,920"
Fg	CCLS	0° 4' 45,998"	27° 31' 26,040"
Fg	CCLS	0° 4' 37,999"	27° 30' 47,880"
Tsabit - Sbaa (SB)	Belbadaoui	0° 12' 33,001"	28° 9' 33,840"
Sb	Abdiche 2	0° 8' 30,998"	28° 17' 11,040"
SB	Tabbi	0° 11' 17,999"	28° 8' 43,080"
SB	Sbaihi 1	0° 12' 0,000"	28° 9' 33,120"
SB	Mostakbel Djanoub 01	0° 12' 24,001"	28° 7' 59,160"
SB	Belhaouas 1	0° 10' 25,000"	28° 8' 53,160"
SB	Mostakbel Djanoub 02	0° 12' 14,000"	28° 7' 45,840"
SB	Mostakbel DJA OUB 03	0° 11' 42,000"	28° 8' 6,000"
SB	Sbaihi 04	0° 11' 22,999"	28° 9' 25,920"
SB	Soussi	0° 10' 57,000"	28° 8' 26,160"
SB	Mostakbel DJA OUB 04	0° 11' 12,998"	28° 7' 57,000"
SB	Mostakbel DJA OUB 5	0° 10' 25,000"	28° 7' 41,160"
SB	Sbaihi 2	0° 12' 24,998"	28° 9' 57,960"
SB	Sbaihi 3	0° 11' 52,001"	28° 8' 38,040"
SB	El izdihar 1	0° 9' 56,999"	28° 8' 22,920"
SB	EL Izdihar 2	0° 10' 28,999"	28° 8' 15,000"
SB	Belhaouas 2	0° 9' 24,001"	28° 8' 44,880"
SB	Sbaihi 05	0° 11' 1,000"	28° 9' 50,040"
SB	Belbadaoui 02 bis	0° 12' 33,001"	28° 9' 33,840"
SB	Sbaihi 6	0° 10' 44,000"	28° 9' 25,920"
SB	Touati 2	0° 7' 39,000"	28° 15' 19,080"
SB	Touati 3	0° 7' 5,999"	28° 15' 15,840"
SB	Touati 4	0° 6' 59,000"	28° 15' 56,880"
SB	Be akli 1	0° 7' 0,998"	28° 18' 38,880"
SB	Oussalah 1	0° 7' 49,001"	28° 17' 20,040"
SB	Oussalah 2	0° 8' 8,002"	28° 17' 51,000"
SB	Be akli 2	0° 6' 20,999"	28° 18' 50,040"
SB	Kassour (be akli 04)	0° 6' 16,999"	28° 18' 55,080"
SB	Batata	0° 7' 54,998"	28° 19' 36,120"
SB	Cha a e 1(takrarte 1,krouchi,b)	0° 6' 46,001"	28° 18' 2,160"

SB	Abdiche 1	0° 8' 48,998"	28° 18' 5,040"
SB	Abi a (morsli)	0° 7' 44,000"	28° 20' 7,080"
SB	Bakalem 1(mebarki 01)	0° 7' 21,000"	28° 20' 39,120"
SB	Be akli 3	0° 7' 36,001"	28° 18' 39,960"
SB	Cha a e 2 (takraret 2)	0° 6' 11,002"	28° 18' 11,880"
SB	Oussalah 3	0° 7' 39,000"	28° 18' 6,120"
SB	Coodepa 1(kasdi)	0° 5' 35,999"	28° 15' 3,960"
SB	Touati 5(imam)	0° 7' 9,998"	28° 16' 27,120"
SB	Coodepa 2 (kasdi)	0° 4' 57,000"	28° 15' 1,080"
SB	Bakalem 2(mebarki 02)	0° 7' 53,000"	28° 21' 2,880"
SB	Coodepa 3	0° 4' 9,001"	28° 14' 57,120"
SB	Coodepa 4	0° 3' 33,001"	28° 14' 53,880"
SB	Coodepa 5	0° 4' 4,001"	28° 14' 11,040"
SB	Coodepa 6	0° 2' 37,000"	28° 14' 57,840"
SB	Coodepa 7	0° 1' 58,001"	28° 14' 45,960"
SB	Sud agro 13(be a el djalil 03)	0° 4' 57,000"	28° 20' 9,960"
SB	Sud agro 06(be a el djalil)	0° 3' 59,000"	28° 19' 9,120"
SB	Sud agro 08 (be a el djalil 05)	0° 2' 31,999"	28° 19' 23,880"
SB	Sud agro 09 (be a el djalil)	0° 3' 1,000"	28° 19' 54,000"
SB	Loukil mehdi	0° 6' 13,000"	28° 15' 7,920"
SB	Touati 6	0° 7' 9,998"	28° 17' 4,920"
SB	H,boumedie e 2	0° 5' 8,002"	28° 20' 43,080"
SB	Hassi saka 2 (khatir)	0° 4' 29,000"	28° 20' 50,000"
SB	El amel 2(ramel)	0° 3' 40,000"	28° 20' 57,840"
SB	Hida 2 (be kat ia)	0° 3' 2,999"	28° 21' 2,880"
SB	Coodepa 8(kasdi)	0° 4' 37,999"	28° 16' 14,160"
SB	Ahet touat (oukrif)	0° 5' 36,886"	28° 17' 19,548"
SB	Coodepa 9 (kasdi)	0° 5' 13,999"	28° 16' 15,960"
SB	Coodepa 10	0° 5' 28,000"	28° 15' 36,000"
SB	Bouiba touhami	0° 5' 8,002"	28° 14' 47,040"
SB	Yakoubi (mebarki)	0° 5' 46,000"	28° 20' 38,040"
Inzghmir (IZ)	Tidmai e(foggara ke ou)	0° 4' 31,001"	27° 6' 54,000"
IZ	Tidmai e	0° 4' 10,999"	27° 6' 14,040"
IZ	Zaouier chiekh	0° 7' 1,999"	27° 11' 2,040"
IZ	Ksar tillouli e	0° 2' 51,000"	27° 4' 24,960"
IZ	Sid el hadj	0° 2' 12,001"	27° 0' 57,960"
IZ	Oum el gheit 01	0° 3' 7,999"	27° 1' 15,960"
IZ	Oum el gheit 02	0° 2' 53,000"	27° 1' 37,000"
IZ	Oum el gheit 03	0° 1' 50,002"	27° 1' 55,920"
IZ	Oum el gheit 04	0° 2' 22,000"	27° 1' 52,000"
IZ	Abi der el ghifari 01	0° 0' 22,000"	27° 2' 3,120"
IZ	Tarek iben ziad	0° 1' 39,000"	27° 2' 51,000"
IZ	Oum el gheit 05	0° 0' 38,999"	27° 2' 40,920"
IZ	Re f foggara (aramass)	0° 3' 29,002"	27° 4' 5,160"
IZ	Othma e ibe afa e 1bis	0° 1' 39,000"	27° 1' 18,120"

IZ	Khalili abdelkrim(abi d 2)	0° 0' 59,000"	27° 1' 45,840"
IZ	Oum el gheit 06	0° 1' 0,998"	27° 3' 12,960"
IZ	Oum el gheit 07	0° 0' 24,998"	27° 3' 36,000"
IZ	Oum el gheit 08	0° 0' 6,001"	27° 3' 2,880"
IZ	Oum el gheit 09 (ahmed wahid 5)	0° 0' 29,999" E	27° 3' 27,000"
IZ	Re f foggara (sahl)	0° 2' 58,999"	27° 2' 40,920"
IZ	Abi der el ghifari 03	0° 1' 16,000"	27° 2' 17,880"
IZ	Oum el gheit 10 (ahmed ahid 6)	0° 2' 34,665"	27° 6' 34,558"
IZ	Ibe si a	0° 1' 36,001"	27° 5' 3,120"
IZ	Oum el gheit 12 (ahmed ahid 7)	0° 1' 23,405"	27° 6' 7,787"
IZ	Abi der el ghifari 04	0° 0' 32,000" E	27° 2' 8,160"
IZ	Belbali 01	0° 1' 0,998"	27° 8' 13,920"
IZ	Amir abdelkader	0° 2' 24,000"	27° 7' 35,040"
IZ	Périmètre mise en valeur (ai el fath)	0° 2' 43,001"	27° 2' 31,920"
IZ	Oum el gheit 14 (ahmed ahid 9)	0° 0' 10,001" E	27° 5' 26,880"
IZ	Tiloullie (fog armasse)	0° 3' 29,002"	27° 4' 5,160"
IZ	Tiloullie	0° 2' 16,001"	27° 2' 35,880"
IZ	Ksar zaouiet blal	0° 4' 21,000"	27° 5' 21,120"
IZ	Tidmaie	0° 3' 56,002"	27° 7' 28,920"
IZ	Ksar titaouie lakhras	0° 3' 47,999"	27° 4' 42,960"
Tsabit (Ts)	Hamada raya	0° 2' 44,002"	28° 18' 56,160"
Ts	Hamada raya	0° 3' 5,000"	28° 18' 25,920"
Ts	Hamada raya	0° 2' 4,999"	28° 18' 38,880"
Ts	Hamada raya	0° 1' 49,001"	28° 17' 45,960"
Ts	Hamada raya	0° 2' 26,999"	28° 18' 6,120"
Ts	Hamada raya	0° 2' 8,602"	28° 19' 32,957"
Ts	Hamada raya	0° 1' 29,010"	28° 19' 8,010"
Ts	Hamada raya	0° 0' 34,999"	28° 19' 22,080"
Ts	Hamada raya	0° 1' 18,998"	28° 19' 45,840"
Ts	Hamada raya	0° 1' 55,999"	28° 20' 6,000"
Ts	Hamada raya	0° 1' 11,544"	28° 17' 25,164"
Ts	Hamada raya	0° 0' 29,002"	28° 17' 2,040"
Ts	Hamada raya	0° 0' 6,001"	28° 17' 35,160"
Ts	Hamada raya	0° 0' 42,998"	28° 17' 56,040"
Ts	Hamada raya	0° 1' 27,001"	28° 18' 16,920"

Annexe 04 : Statistique de Production et superficie de la culture du maïs délivré par l'ONAB

GAO Oravio - Mostaganem
 Au Capital Social de 2 703 000 000 DA
 Unité des Aliments du Bétail - Bougtob
 Route National N° 06 Bougtob BP N° 78
 Ide Fiscal : 096916260000932
 Art Imposit : 32100567511
 PROGRAMME DE PRODUCTION DE MAIS EN GRAIN

1)- WILAYA D'ADRAR - Campagne 2014 / 2015 récolté 2016

N°	Nom et prénom	Adresse		Superficie	Superficie	Nbre pivots	Quantité
				Actée	Contractée		Livr/q
01	Ferme ccls adrar	Founogil	Adrar	500	30	01	1215,40
02	Mehdaoui a/llah	Inzedjmir	Adrar	40	20	01	637,60
03	Bahekem a/waheb	Inzedjmir	Adrar	22	20	01	208,20
04	Kasdi ali	Sbaa	Adrar	35	50	02	2191,20
05	Kazi thani djamel	Tsabit	Adrar	150	145	05	4389,40
06	Sbaai aek	Inzadjmir	Adrar	50	20	01	726,60
07	Oum el ghait tayeb	Inzadjmir	Adrar	20	18	01	534,20
08	Daameche watck	Adrar	Adrar	2300	120	04	2837,00
09	Chahir lamia cherine	Zaouia konta	Adrar	20	20	01	1282,80
10	Ghazaze kamel	Sbaa	Adrar	30	26	01	760,60
11	Limame amir	Sbaa	Adrar	220	100	03	3102,80
12	Kasdi brahim	Sbaa	Adrar	46	23	01	1094,40
13	Moulay larbi	Zaouia konta	Adrar	27	18	01	814,40
14	Tamaziret chaabane	Sbaa	Adrar	21	20	01	1118,60
15	Bafeker lahcene	Zaouia konta	Adrar	34	30	01	1634,00
16	Benzina a/hafid	Zaouia konta	Adrar	46	20	01	990,60
17	Regedi a/llah	Zaouia konta	Adrar	26	20	01	687,40
	S/total			3587	700	27	24225,20
18	Kasdi omar	Sbaa	Adrar	55	23	01	1556,60
19	Kasdi rabeh	Sbaa	Adrar	70	23	01	1594,20
20	Kasdi a/nour	Sbaa	Adrar	60	60	02	2853,40
21	Debela mohamed	Zaouia konta	Adrar	49	36	02	1310,80
22	Djaafri a/krim	Zaouia konta	Adrar	28	20	01	862,80
23	Kenzah mohamed	Zaouia konta	Adrar	20	20	01	1138,00
24	Gep taleb sedik	Zaouia konta	Adrar	63	38	02	1753,00
25	Benoumer mohamed	Fonogil	Adrar	300	42	02	2843,60
26	Kasdi sofiane	Sbaa	Adrar	73	20	01	523,00
27	Cheikh hassane	Inzandjmir	Adrar	40	40	02	1029,80
28	Kadiri fodil	Z sidi a/llah	Adrar	39	27	01	1064,80
29	Oum el ghait a/llah	Fonogil	Adrar	80	80	04	2659,80
30	Belbali aek	Inzadjmir	Adrar	32	20	01	648,60
31	Omari aek	Zaouia konta	Adrar	569	40	02	1675,00
32	Titafi allal	Fonogil	Adrar	90	20	01	527,40
33	Ouali mohamed	Fonogil	Adrar	20	20	01	1174,40
34	Nedjari kaddour	Titsabit	Adrar	50	45	02	1962,40
35	Zenani mohamed	Fonogil	Adrar	100	20	01	1333,40
36	Ferdjani aek	Fonogil	Adrar	35	25	01	1342,00
37	Gep b akrim el maghili	Aoulef	Adrar	50	20	01	416,40
	Total			5410	1339	30	52494,60
	Report			5410	1339		52494,60
38	Bensmail aek	Zaouia konta	Adrar	50	20	01	988,80
39	Bensmail a/llah	Zaouia konta	Adrar	40	25	01	1551,60
40	Belbali hamza	Inzandjmir	Adrar	20	20	01	1031,00
41	Gep salah dinne el aioubi	Zaouia konta	Adrar	100	18	01	765,20
42	Oum el ghait tayeb a/llah	Zaouia konta	Adrar	80	18	01	655,40
43	Dlaldja laid	Inzandjmir	Adrar	50	18	01	233,80
	Total			5750	1458	06	57720,40
						63	

PROGRAMME DE PRODUCTION DE MAIS EN GRAIN

2)- Wilaya d'Adrar campagne 2013/2014 récolté fin 2014/2015 – ONAB W Elbayadh

NOM ET PRENOM	ADRESSE	Superficie Semée / ha	Nombre Pivots	Quantité Livrée/q	date de livraison	Arrêt irrigation
Zenani Med	Fonghil Adrar	20	01	680,40	20/12/14	,10/11/14
Benoumer Med	Fonghil Adrar	42	02	2595,40	23/12/14	
Boulehia el hadj	Fonghil Adrar	60	03	2789,20	29/12/14	,20/11/14
Oum el Ghait tayeb	Inzadjmir Adrar	20	01	493,60	,04/01/15	,01/12/14
Ferme CCLS Adrar	Fonghil Adrar	30	01	996,80	,25/12/15	
Oum el ghait a/llah	Fonghil Adrar	170	05	3664,40	,11/01/15	10/11/14
Baba a/slem	Fonghil Adrar	40	02	1119,80	,12/01/15	,10/11/14
Azizaoui mustapha	Zaouiet konta Adrar	18	01	712,80	*17/02/15	17/11/14
Lazri a/madjid	Fonghil Adrar	50	02	1789,60	,21/01/15	05/11/14
Baba m'hamed	Fonghil Adrar	25	01	308,00	,22/01/15	
Ben smail aek	Zaouiet konta Adrar	18	01	951,40	04/02/15	
Belbali aek	Inzadjmir Adrar	20	01	709,00	,27/01/15	
Limame amir	Hmadet raya Adrar	35	01	1336,20	,01/02/15	
Omri aek	Zaouiet konta Adrar	40	02	2121,20	,10/02/15	
Ben smail a/llah	Zaouiet konta Adrar	25	01	953,20	,08/02/15	
Dabla med	Zaouiet konta adrar	18	01	839,40	,11/02/15	
Nedjari kaddour	Sbaa tisabit Adrar	25	01	718,60	,11/02/15	
Kasdi brahim	Hamadet raya Adrar	79	03	1343,60	,16/02/15	
Daamache wathic	Bp 544 Adrar	80	03	4559,20	,04/03/15	
Farhat iless	Ougtoutte Adrar	65	02	2691,40	,22/02/15	
Kasdi sofiane	Tesabit Adrar	20	01	1393,60	,23/02/15	
Lamri AEK	Sbaa tisabit Adrar	25	01	808,20	,03/03/15	
Kasdi omar	Sbaa tisabit Adrar	23	01	1399,60	,02/03/15	
Moussa mouloud	Zaouiet konta Adrar	20	01	833,80	,22/02/15	
Kasdi a/noor	Tesabit Adrar	25	01	1694,80	,04/03/15	
Kasdi ali	Sbaa tisabit Adrar	25	01	1840,60	,18/03/15	
Delaldja laid	Sbaa tsabit hamrat raya	10	01	542,00	,16/03/15	
Titafi allal	Fonghil Adrar	26	01	185,80	28/01/15	
TOTALUX		1099	45	42361,00		

Annexe 5- Exemple d'une fiche de diagnostic technique de suivi de pivot

**Diagnostic du fonctionnement
d'un pivot au champ**

Date 27/12/2015 Nom de l'enquêteur information sur pivot
 Nom de l'agriculteur : Ben Omeur Abdelouahab
 Adresse complète : association G.P.E, Sidi-Abdelkader
(Plateau de Basmaou - Fougouglil) téléphone : 0660943938

Caractéristiques des parcelles irriguées

Cultures	surface irriguée (ha)		Volume d'eau apporté ha/an en moyenne (m3)	Débit d'équipement souhaitable		
	Total	Par matériel testé		m3/h/ha	Pour la surface irriguée totale (m3/h)	Pour l'installation considérée (m3/h)
Mais	<u>30 ha</u>	<u>Pluricollinaire</u>	<u>750 mm/ha</u>		<u>45 l/s/30 ha</u>	<u>45 l/s</u>
Soya						
Ble dur	<u>30 ha</u>		<u>1300 mm/ha</u>		<u>40 l/s/30 ha</u>	<u>40 l/s</u>
Total						

Ressources en eau		volume disponible (m3)	Débit disponible (m3/h)	Observations
Retenue Collinaire	<input type="checkbox"/>			
Rivière	<input type="checkbox"/>			
Forage	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>50 l/s</u>	<u>45 l/s</u>	<u>/</u>
Puits	<input type="checkbox"/>			
Borne d'irrigation	<input type="checkbox"/>			

Sol	Type de sol	Profondeur d'enracinement	Perméabilité estimée (mm/h)	Réserve facilement utilisable estimée (mm)
Sol à faible réserve	<input checked="" type="checkbox"/>	<u>Sablonneux</u>	<u>10 à 15 cm</u>	<u>13 à 15 mm</u>
Sol à réserve moyenne	<input type="checkbox"/>			
Sol profond à bonnes réserves	<input type="checkbox"/>			

Vent	Observations
● rare <input type="checkbox"/>	
● gênant <input type="checkbox"/>	Direction dominante : <u>Nord-Est/sud-Ouest.</u>
● gênant souvent <input type="checkbox"/>	
● empêche d'irriguer de temps en temps <input checked="" type="checkbox"/>	Force ou vitesse : <u>Vitesse</u>
● empêche d'irriguer souvent <input type="checkbox"/>	

Annexe 6- Résultats

Tableau 1: Surfaces emblavées perdues (non productives) par manque de levée

Nombre de Pivots détectés	Adresse Exploitation (Pivot)	surface S/ pivot (ha) détecté	Surface perdue (ha)	%
01	Tsabit	20,1	4,42	22
02	TS	16,92	2,53	15
03	TS	23,97	1,79	07
04	TS	25,86	2,77	11
05	TS	24,61	6,13	25
06	Adrar	31,1	0,89	03
07	AD	29,69	6,09	21
08	AD	30,94	6,1	20
09	AD	32,17	5,42	17
10	Fenoughil	17,3	3,01	17
11	FN	20,64	1,16	06
12	FN	21,64	2,17	10
13	FN	18,64	2,33	13
14	FN	26,89	4,16	15
15	Zaouiet kounta	18,53	4,74	26
16	ZK	20,29	6,25	31
17	ZK	17,66	5,47	31
18	ZK	20,43	5,69	28
19	ZK	24,82	3,1	12
20	ZK	19,59	2,94	15
21	IZ	19,64	0,41	02
22	ZK	17,49	3,43	20
23	ZK	17,87	2,44	14
24	IZ	19,01	4,36	23
25	ZK	17,2	1,42	08
Totale (ha)		552,91	89,22	

Tableau 2 : Taux de location du semoir monograin

Location	Nb Agriculteurs	% Obs.
Non	9	22
Oui	32	78
total	41	100

Tableau 3: Rendement moyen des variétés cultivées entre 2014 et 2016

Variétés utilisées/ Campagne	Nombre de pivots emblavés	Rdt moy q/ha	durée cycle Jours
2013 /2014			
1- Ranti	16	41,38	120
2- Hytech Hybrid 2066 (Egypte)	1	39,61	150
Moyen		40,49	
2014/2015			
2- Hytech Hybrid 2066 (Egypte)	20	49,37	150
3- Colonia	1	40,62	130
Moyen		45,00	
2015/2016			
2- Hytech Hybrid 2066 (Egypte)	2	50,44	150
3- Colonia	10	48,73	130
4- Codilac	4	26,06	120
5- Panam	8	26,08	120
Moyen		37,83	

NB : Rdt moy = rendement moyen

Tableau 4 : Caractéristiques de quelques variétés cultivées dans différents périmètres de GMV

Variétés	Précocité	Cycle (jour)	Rendement Potentiel (q/ha)	Rendement Moyen (q/ha)	Caractères particuliers
Hytech Hybrid 2066 (Egypte)	Tardive	150	60 à 70	55 à 60	Risque de la verse
Ranti (France- Caussade)	Précoce	120	50 à 60	40 à 55	Résistance à la verse, à la rouille et à la striure
Colonia (France- Caussade)	Mi- tardive	130	100	65 à 75	Tolérance à la sécheresse

Source : fiche technique Caussade semence et Hytech (Egypte)

Tableau 5: Niveaux statiques des forages alimentant les Pivots

Moyenne = 18,39 ; Médiane =19 m ; Min = 6 ; Max = 32 m		
Niveaux statiques des forages (m)	Nombre d'exploitations	% Observé
Moins de 8	1	2,4
De 8 à 11	5	12,2
De 12 à 15	7	17,1
De 16 à 19	11	26,8
De 20 à 23	11	26,8
24 et plus	6	14,6
Total	41	100

Source : Enquête de terrain – Hamrelaine, 2015

Cartographie de superficies irriguées et l'estimation de rendement de la culture du maïs par l'imagerie satellitaire en utilisant l'indice de végétation dans les zones arides

M. Hamrelaine^{1*}, A. Mekliche², A. Laaboudi³

¹ Université Ferhat Abbas Sétif 1, 19000 Sétif - Algérie

² Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie Hassan Badi El Harrach 1600 Alger - Algérie

³ Institut national de la recherche agronomique d'Algérie. Station d'Adrar – Algérie

* Corresponding author: hamrelaine2000@gmail.com; Tel.: +213556 570 637

ARTICLE INFO

Article History :

Received : 25/08/2019
Accepted : 16/02/2020

Mots clés :

Estimation des rendements ;
télédétection ;
NDVI ;
EVI ;
régression robuste

Key words:

Crop yield estimation;
remote sensing;
NDVI;
EVI;
robust regression

ABSTRACT/RESUME

Résumé : De nombreuses techniques d'estimation du rendement des cultures sont utilisées. La plus efficace repose sur l'utilisation de données géo spatiales et de technologies telles que la télédétection, notamment dans des conditions de la présente étude où le ciel est souvent dégagé. Dans le but d'estimer les superficies cultivées en maïs sous pivots dans la région d'Adrar en Algérie et de prédire les rendements, nous avons exploité les données satellitaires d'imagerie de Landsat8 et Sentinel2 de 2014, 2015 et 2016. Le calcul des indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et EVI (Enhanced Vegetation Index) ont permis de distinguer plusieurs classes de végétation selon la densité du couvert végétal et son état sanitaire. En utilisant la régression robuste (RR), les classes identifiées ont été utilisées comme des variables indépendantes et les rendements observés ont été utilisés comme variable dépendante et ce pour développer des modèles d'estimation des rendements. Les résultats obtenus ont montré une répartition des pivots dans trois régions potentielles avec un accroissement de la superficie durant les trois campagnes d'étude. Les modèles obtenus par les données basées sur d'EVI sont plus performants par rapport à ceux des données basées sur l'NDVI. Ainsi, les critères de performance qui consistent en coefficient de corrélation (r), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) sont respectivement 0,77, 8,30 q/ha et 7,17q/ha.

Abstract: To estimate crop yields many techniques and approaches are used. The most effective method is remote sensing technology, especially in the conditions of this study where the sky is often clear. The aim of this study is to estimate the cultivated surface and to predict crop yields of irrigated maize under pivot centers in Adrar region of South Algeria. The methodology consists of collecting satellite imagery landsat8 and Sentinel2 from 2014, 2015 and 2016 of the study region, and calculating two vegetation indices: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index). According to the density of the canopy and its health, several vegetation classes are distinguished. In order to develop crop yield prediction model, we have used robust regression technique (RR). Vegetation classes have been used as independent variables and crop yields have been used as dependent variable.

The obtained result showed that Crop yield Model performed from EVI-based data is highly accurate than this performed from NDVI based data. Thus, the performance criteria of EVI-based data model which consist of correlation coefficient (r), Root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE) are respectively: 0,77, 8,30 q/ha et 7,17q/ha.

I. Introduction

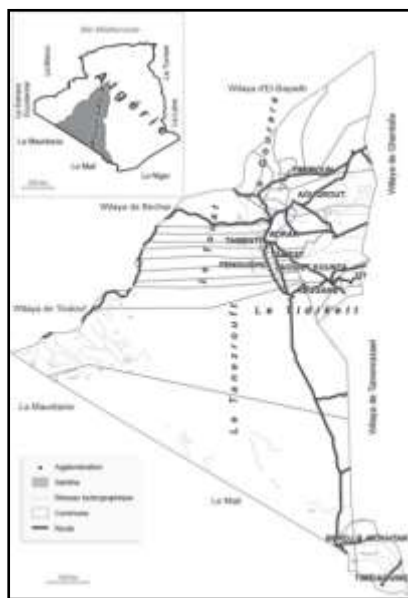
Le maïs, le riz et le blé sont les principales cultures produites dans le monde et les piliers de la sécurité alimentaire mondiale. Chaque jour, l'humanité consomme des millions de tonnes de ces céréales sous l'une de leurs innombrables formes familières. Elles constituent l'élément le plus important du régime alimentaire humain, puisqu'ils fourniraient 42,5 % des apports énergétiques alimentaires mondiaux [1]. La demande en aliments pour animaux augmente et continue à croître en volumes et en valeur, du fait de l'augmentation de la population mondiale, de l'urbanisation et de l'augmentation du pouvoir d'achat des consommateurs [2]. Au niveau mondial, 700 millions d'hectares de céréales sont cultivés, dont 33 % sont alloués à la culture de maïs et 28 % au blé. Ces deux productions constituent la base des formules de l'alimentation animales [3]. En Algérie, le maïs et le soja représentent 80% de l'alimentation du bétail. Les besoins nationaux en maïs et soja sont estimés à 3 millions de tonnes par an [4]. Pour combler le déficit, 2,5 millions de tonnes de maïs sont importés. Le prix du maïs qui augmente sans cesse dans les cours du marché international se répercute inévitablement sur les prix des productions animales en Algérie. Pour faire face à cette situation, l'état algérien à encourager la production du maïs grains au sud du pays sous rampes pivotantes, plus particulièrement dans la wilaya d'Adrar. Pour aider à prendre des décisions à temps, l'estimation prévisionnelle des superficies et des rendements est indispensable. Cependant, l'approche traditionnelle de la collecte de données est coûteuse, prend du temps et souvent difficile [5]. Pour cela, la prédiction de la production agricole à l'aide de la télédétection présente une approche d'une importance incontournable. En effet, l'existence de cette technologie facilitera l'identification, la cartographie et surtout l'actualisation de l'évolution de superficie et les prévisions des rendements. En fait, différentes méthodes ont été développées pour prédire les rendements des cultures. La télédétection qui est l'approche la plus courante consiste à générer un modèle de régression pour établir des relations empiriques directes entre les mesures des indices de végétations et le rendement des cultures [6, 7]. Ces approches supposent que les mesures de la capacité photosynthétique à partir des indices de végétation spectrale sont directement liées au rendement des cultures.

Avec la disponibilité des images gratuites acquises par les satellites de télédétection Landsat-8 et Sentinel-2, il devient possible d'obtenir une résolution temporelle de 3 à 5 jours à une résolution spatiale plus élevée (10 à 30 m) [8]. Il faut signaler que les données extraites des images Landsat8 et sentinel2 ont été utilisées avec succès pour l'estimation et la prévision du rendement [9]. Le contraste entre l'absorption maximale dans la partie rouge et la réflexion maximale dans la partie proche infrarouge du spectre électromagnétique a été largement utilisé pour le suivi des cultures et les statistiques agricoles par plusieurs chercheurs [10, 11]. Certains chercheurs ont utilisé la régression linéaire multiple pour développer les modèles d'estimation de rendement, cependant cette méthode présente beaucoup d'inconvénients, notamment le problème de colinéarité et le problème des points aberrants [12]. Par conséquent, des estimateurs de régression robustes peuvent constituer un outil puissant de détection des valeurs aberrantes dans des ensembles de données complexes. Pour cette raison, un modèle de régression robuste peut constituer la meilleure alternative pour plusieurs modèles de régression linéaire [13, 14]. L'approche de télédétection qui consiste à utiliser des mesures de l'indice de végétation il repose sur le fait que la réflectance de la végétation fournit une mesure de la quantité et de l'état de la verdure. Ce qui constitue un indicateur utilisable pour estimer le rendement [15]. L'EVI utilise la bande bleue qui fournit une correction atmosphérique contrairement à l'NDVI [16]. Elmore et al [17] ont indiqué que l'inconvénient de l'NDVI réside dans le fait qu'il est fortement influencé par la luminosité et l'effet spectral du sol, ce qui nuit aux évaluations de la végétation. En plus, il est plus sensible à la teneur en chlorophylle dans les feuilles des plantes [18]. En calculant les indices de végétation NDVI et EVI et en utilisant la régression robuste, les objectifs de cette étude sont ; i) cartographier les superficies emblavées sous pivot, ii) développer les modèles d'estimation du rendement du maïs grain avant la période de récolte. iii) Mettre en évidence les conditions agronomiques pour une haute précision des modèles.

II. Matériels et méthodes

II.1. Localisation et description de la zone d'étude (cadre géographique général)

La wilaya d'Adrar (436 272 km²) est située dans le Sud-Ouest de l'Algérie (Fig.1) ; elle s'étend, selon les coordonnées géographiques: entre les longitudes 0°30' Est et 0°30' à l'Ouest et entre les latitudes 26°30'et 28°30'au Nord. Elle est limitée géomorphologiquement au Nord par le Grand Erg Occidental, au Sud par le plateau de Tanezrouft, à l'Est par le plateau de Tademaït et à l'Ouest par l'Erg Chech. Elle est répartie entre trois régions sahariennes naturelles représentées par : 1. Gourara: son centre administratif est la daïra de Timimoune, cette région regroupe toute les palmerais et les ksars de cette daïra. 2. Touat : Elle se prolonge du Brinkane jusqu'à Reggane; c'est la plus vaste des régions, et la plus intéressante, car elle contient un grand nombre d'exploitations de mise en valeur cultivant la céréaliculture sous pivot. 3. Tidikelt : Cette région se prolonge d'Aoulef à Ain Saleh qui est le centre de la région [19].



Par ailleurs, la zone d'Adrar est l'une des zones à fortes potentialités agricoles puisqu'il s'y

Figure 1. Carte de localisation de la zone d'étude.

Tableau 1. Caractéristiques des capteurs Landsat8 Oli et Sentinel2.

Pays	Satellite et capteurs	Résolution et couverture	Coût des données d'archives	Caractéristiques
Etats –Unies	Landsat8 OLI	15-30 m 180x180 km ²	données d'archives de L'USGS entièrement gratuite	Données systématiquement recueillies depuis 2013
UE	Sentinel-2	10-20 m Fauchée de 290 m	données d'archives de L'ESA entièrement gratuite	Données systématiquement recueillies depuis 2015

Source [20].

exprime l'essentiel des activités agricoles familiales (palmier-dattier, maraîchage, cultures condimentaires, fourrages, céréales ...). C'est aussi dans cette zone que l'on compte le plus fort taux de la population agricole. Les conditions climatiques y sont dures : rareté des pluies, ensoleillement intense, forte évaporation, siccité de l'air, vents de sable (vitesse moyenne 5,8m/s). Le ciel est souvent clair et dégagé des nuages et de tous obstacles qui peuvent réduire la visibilité, qui réduira en conséquence la netteté de l'image. Cet avantage permet d'avoir des bonnes images sans recours à de nombreux traitements préliminaires.

Les sols sont formés généralement d'aires constituées de couches sédimentaires superficielles dont la fertilité et le pouvoir de rétention en eau et en éléments fertilisants est faible et dont les horizons de surface sont très sensibles à l'érosion éolienne. La formation et l'évolution de ces sols restent conditionnées par le climat et la salinité. Sans mise en valeur, sans apports fréquents d'éléments fertilisants et surtout sans irrigation, il n'est donc point possible de produire dans une telle zone. Les eaux d'irrigation proviennent de la nappe du continentale intercalaire appelée communément « l'albien ». La nature des eaux de la région d'étude est de bonne qualité. La conductivité électrique varie de 1,3 ms/cm avec un niveau statique qui varie entre 10 et 30 m.

Les données relatives aux superficies récoltées et les rendements obtenus sont collectées auprès de l'office national d'aliment de bétail (ONAB). Des informations sur la conduite de la culture, la date et la dose de semis, la fertilisation et l'irrigation ont été obtenues sur le site via des enquêtes avec les agriculteurs.

II.2. Traitement des images

Logiciel ArcMap a été utilisé, pour traiter et cartographier l'information géographique. Trois images ont été utilisées; une image de Landsat8 (30 m) pour la campagne 2014 et deux images de Sentinel2 (10 m) pour les campagnes 2015 et 2016.

Pour toutes les années, la période de choix de l'image de Landsat8 et Sentinel2 est entre le 6 et le 25 Novembre de chaque campagne. Le NDVI (Indice de végétation par différence normalisé) est calculé à partir des réflectances dans les parties rouge et proche infrarouge (NIR) du spectre. L'EVI (indice de végétation amélioré) incorpore la réflectance dans la partie bleue du spectre en plus du rouge et du NIR. Les équations sont données comme suit [18]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

Avec :

NIR : Valeur de réflectance dans la bande proche infrarouge,

RED : Valeur de réflectance dans la bande rouge (pour Landsat8, la bande 5 représente the proche infrarouge réflectance et la bande 4 représente la rouge réflectance).

L'EVI a été développé pour être plus sensible à la biomasse en réduisant au minimum l'effet d'aérosols. Il emploie la bande bleue pour corriger ces effets [21].

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + C1\rho_{RED} - C2\rho_{BLUE} + L} \quad (2)$$

où :

G : facteur de gain (égal à 2,5)

L : facteur d'ajustement des sols (égal à 1)

C1 = 6 et C2 = 7,5 : coefficients de correction de la diffusion atmosphérique.

II.3. Approche de la modélisation

Pour NDVI deux variables indépendantes ont été utilisées. La première variable a été construite de la somme de 3 classes à forte densité et deuxième variable a été construite de la somme de 3 classes à moyenne densité.

Pour l'EVI trois variables indépendantes ont été utilisées. Se sont les trois premières classes à forte densité.

2.4. Les critères de performance du modèle

Pour évaluer les modèles, les critères de performance utilisés sont : - le coefficient de corrélation (3), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) (4) et l'erreur moyenne absolue (MAE) (5).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})(Y_{es} - \bar{Y}_{es})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - \bar{Y}_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_{es} - \bar{Y}_{es})^2}} \quad (3)$$

- The root mean squared error (RMSE):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{obs} - Y_{es})^2}{n}} \quad (4)$$

- The mean absolute error (MAE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_{obs} - Y_{es}| \quad (5)$$

Avec : Y_{sim} est le rendement estimé, Y_{obs} est le rendement observé, \bar{Y}_{es} est le rendement estimé moyenne, \bar{Y}_{obs} est le rendement observé moyen, n est le nombre d'observations.

III. Résultats et discussion

Grâce aux conditions atmosphériques de la zone d'étude souvent caractérisée par un ciel clair et dégagé de tous obstacles, les images obtenues sont nettes et ne nécessitent aucun traitement préalable. Cet avantage a permis d'avoir des estimations précises et très proches de la réalité. Car, la couverture nuageuse, les maladies et les intempéries sont des sources d'erreurs qui pourraient réduire la précision du modèle [18]. Dans de telles situations, les images satellitaires devront subir de nombreux traitements préliminaires; contrôle de la géolocalisation, conversion en réflectance au sommet de l'atmosphère, masquage des nuages et des ombres puis la normalisation de l'image sur la base de paramètres pseudo-invariables [22].

III.1. Localisation géographique de pivots

Le traitement des images satellitaires a permis de localiser avec une grande précision les périmètres de la grande mise en valeur (GMV) qui contiennent les pivots dans toute la wilaya d'Adrar (Touat-Gourara-Tidikelt). Ce sont : La zone de Zaouit Kounta qui vient en tête de liste avec 61 pivots. Elle est suivie par la zone de Fenoughil avec 26 pivots, puis la zone de Tssabit où le nombre de pivots est de 25. D'autres zones ont connu un début d'installation des pivots, nous citons la zone d'Aoulef avec 11 pivots, le périmètre d'Inzeghmir avec 10 pivots et les périmètres d'Adrar et Aougrouit avec 4 pivots seulement (Fig 2).

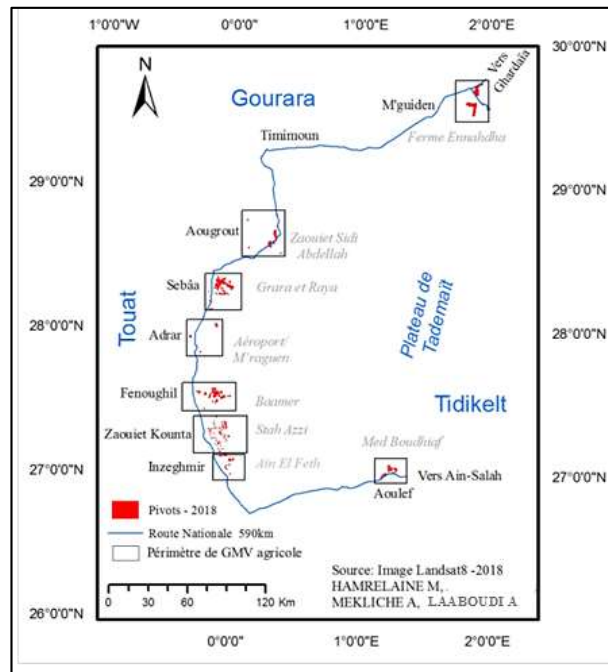


Figure 2. Carte de localisation géographique des pivots dans les périmètres de la GMV agricole dans la wilaya d'Adrar (Touat-Gourara-Tidikelt).

III.2. Evolution des superficies cultivées par le maïs

Avec les données extraites à partir des images satellitaires Landsat8 et sentinel2 entre 2014 et 2018, nous constatons que le nombre de pivots emblavés par le maïs est passé de 45 en 2013/2014 à 135 pivots en 2017/2018 avec une augmentation de 300% pour une superficie correspondante de 1075,34 à 3297,42 ha. L'évolution des rampes pivotantes selon les zones agricoles est représentée de la façon suivante :

- Dans la zone de Zaouit Kounta compte 15 pivots (2014) et 61 pivots en 2016. Soit une augmentation

de 400% avec une superficie de 1427,4 ha. Cette commune, est toujours en tête pour l'activité agricole vue la vocation agricole de la population depuis des siècles.

- Dans la zone de Fenoughil, le nombre de pivots a augmenté de 16 en 2014 à 26 pivots en 2016. Soit une augmentation de 162,5% avec une superficie totale de 615,66 ha.

- Dans la zone de Tssabit, le nombre de pivots varie de 9 pivots en 2014 à 25 pivots en 2016. Soit une augmentation de 277,77% avec une superficie totale de l'ordre de 669,94 ha (Fig 3).

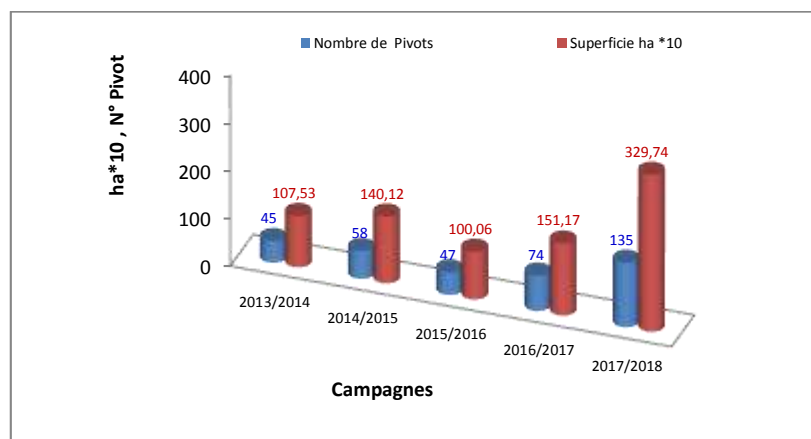


Figure 3. Evolution de la superficie et du nombre de Pivots.

Grâce aux images satellitaires, nous pouvons localiser exactement l'emplacement des pivots du maïs par rapport à ceux de blé. Aussi, nous pouvons distinguer les pivots à grande superficie et ceux à superficie inférieure. Une concentration importante est constatée dans la partie nord du périmètre de Zaouit Kounta (Fig 4.).

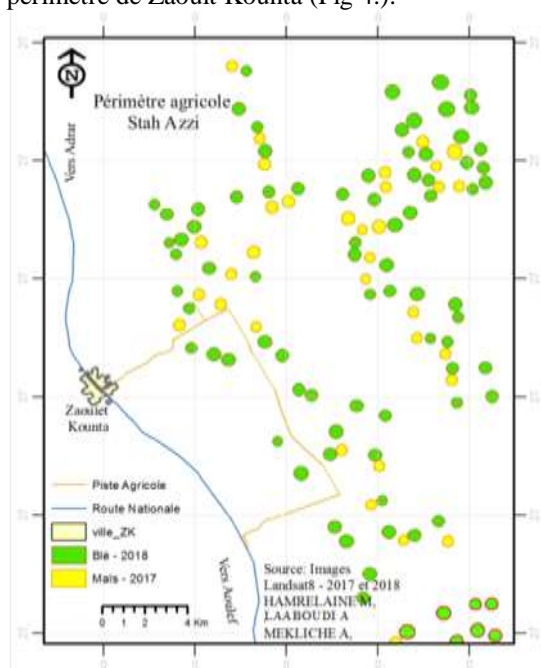


Figure 4. Pivots du maïs (Jaune) et Blé (vert) dans le périmètre agricole de Zaouit Kounta dans la wilaya d'Adrar.

III.3. Evolution des rendements

Bien que les rendements moyens soient presque semblables pour les trois zones et les trois campagnes, des fluctuations d'une zone à une autre et d'une campagne à une autre sont enregistrées. Ces fluctuations pourront être dues notamment aux variations des conditions climatiques et édaphiques, mais aussi aux non respects de la date de semis. La zone de Zaouit Kounta a enregistré le rendement le plus élevé avec 39,13q/ha suivi par la zone de Tssabit avec 38,13 q/ha (Tableau 2).

Tableau 2. Rendement moyen q/ha par périmètre agricole pendant les trois campagnes.

Campagnes	Tsabit	Fenoughil	ZK/IZ	Moy
2014/2015	40,54	31,3	41,77	37,87
2015/2016	41,64	29,19	41,77	37,53
2016/2017	32,23	48,14	33,85	38,07
Moyenne	38,13	36,21	39,13	37,82

Ces rendements sont relativement faibles par rapport aux potentialités de la zone, si on prend en considération le pic record de 99 q/ha enregistré durant la campagne 2016/2017. En effet, dans une superficie de 34 ha une production de 3372 q a été obtenue dans le périmètre de la zone de Fenoughil.

Les raisons de faiblesse des rendements résultent dans la plupart des cas à un itinéraire technique non approprié, faible apport d'engrais, envahissement des adventices. En outre, la mauvaise conduite de l'irrigation a conduit à l'hétérogénéité de la répartition de l'eau de l'irrigation et par conséquent une hétérogénéité de croissance et de développement de la culture.

III.3. Classification de la superficie emblavée à travers les indices de végétation

Au total, 8 classes de l'indice d'NDVI et 6 classes de l'indice EVI ont été identifiés. Chacune est représentée par le pourcentage de la superficie couverte.

III.3.1. Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Les résultats obtenus par l'NDVI indiquent que les parcelles cultivées n'ont pas une densité de végétation homogène. Des parties de sol nu ou de très faible végétation ont été détectées. En effet, trois ensembles de végétation, selon leurs densités, ont été identifiés : végétation dense (NDVI maximum), végétation clairsemée (NDVI moyen) et végétation faible (NDVI Minimum). Chaque ensemble contient un certain nombre de classes, selon la valeur de l'NDVI, comme l'indique le tableau ci-dessous. Ainsi 10 classes peuvent être distinguées (tableau 3).

Tableau 3. Les valeurs des indices de végétation selon les classes d'NDVI.

Ensemble de végétation	Végétation dense			Végétation clairsemée			Végétation faible	
	2	3	4	5	6	7	8	9
Classes	2	3	4	5	6	7	8	9
Valeur NDVI	0,8 à 0,9	0,7 à 0,8	0,6 à 0,7	0,5 à 0,6	0,4 à 0,5	0,3 à 0,4	0,2 à 0,3	0,1 à 0,2
ST %	0,09	24,66	35,17	15,79	9,72	6,20	4,40	3,53

Dans notre cas, la classe 1 caractérisée par la plus forte densité (NDVI \approx 1) n'est pas détectée. C'est la classe 4 ayant NDVI entre 0,6 et 0,7 qui présente une grande partie de la superficie emblavée. De même, un nombre important des pivots ne

présentent pas la classe 2 où l'NDVI varie 0,8 à 0,9 (Fig 5). Une forte densité de la végétation comme celle appartenant à la classe 1 ou à la classe 2 pourrait être un indicateur d'infestation du sol par les adventices.

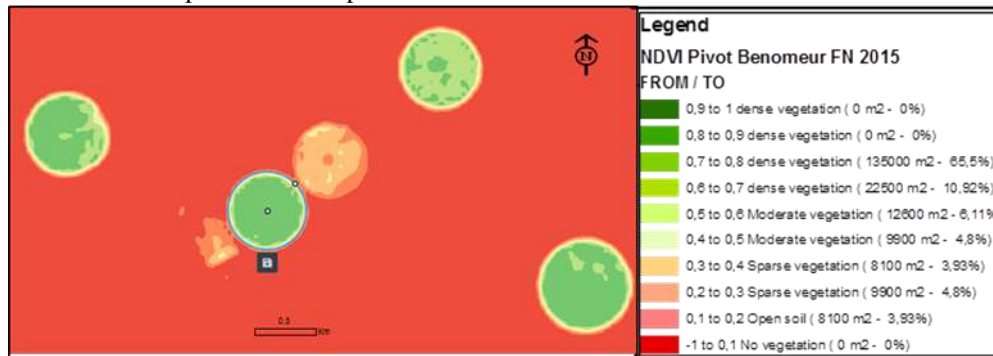


Figure 5. Exemple de différentes classes d'NDVI d'un Pivot du maïs situé dans le périmètre de Fenoughile selon les valeurs des indices de végétations, les surfaces et le taux de chaque classe.

III.3.2. Indice de végétation amélioré EVI

Selon l'indice EVI, la végétation est partagée en deux ensembles ; végétation dense et végétation clairsemée. Par ailleurs, nous avons constaté 3 classes appartiennent au premier ensemble et deux

classes appartiennent au deuxième ensemble (tableau). Cet indice détecte 4 autres classes à $EVI \leq 0,1$ mais elles sont dépourvues de végétations.

Tableau 4. les valeurs des indices de végétation selon les classes d'EVI

Etat de végétation	Végétation dense			Végétation clairsemée		Sol nu
Classes	1	2	3	4	5	6
Valeur d'EVI	0,8 à 1	0,6 à 0,8	0,3 à 0,6	0,2 à 0,3	0,1 à 0,2	0 à 0,1
Superficie totale %	31,95	31,01	27,72	4,92	4,12	0,29

A signaler, trois (03) classes sont indiquées pour un $EVI < 0$. Il s'agit de la classe 7 à EVI de 0 à -0,3 dont l'eau ou le sol est nu ainsi que deux autres classes (classe 8 et classe 9) à EVI variant, respectivement de -0,3 à -0,6 et de -0,6 à -1 couramment indiquant la présence de la neige. De

même, la représentation des classes diffère d'un pivot à un autre. Un bon pivot est celui où la classe 1 et représentée par une très grande superficie, tandis que les classes à $EVI \leq 0,1$, sont inexistantes (Fig 6).

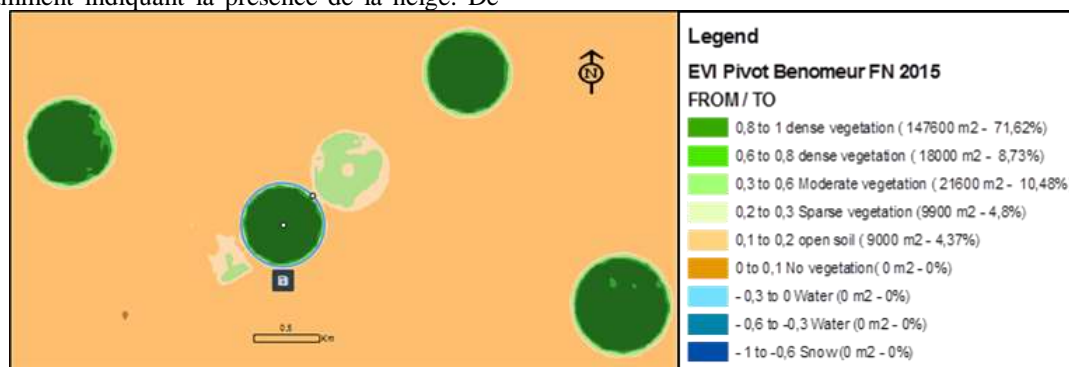


Figure 6. Exemple de différentes classes d'EVI d'un Pivot du maïs situé dans le périmètre de Fenoughil selon les valeurs des indices de végétation, les surfaces et taux de chaque classe.

Dans l'ensemble, à travers les résultats obtenus, les 6 classes sont bien représentées. La classe 2 est la plus vaste avec une superficie globale de 31,01 % suivi de la classe 1, avec un taux de la superficie de

l'ordre de 27,72%. Le sol nu est aussi représenté mais avec un taux plus faible qui ne dépasse guère 0,29 % par rapport à la superficie totale.

III.4. Estimation des rendements à distance

Jusqu'à présent, toutes les informations sur la culture du Maïs et son rendement sont collectées sur les lieux. Vue la difficulté de contacter tous les agriculteurs suite à l'ensablement des pistes, l'éparpillement de périmètres agricoles et les grandes distances parcourues entre exploitations, le recours à la télédétection devient ainsi une approche incontournable. Toutefois, la seule visite obligatoire sur terrain est celle qui consiste à évaluer le taux d'infestation de la culture par des adventices.

III.4.1. Utilisation d'NDVI

Nous rappelons que la somme des valeurs d'NDVI des classes 2, 3 et 4 indiquant la présence d'une végétation dense, représente la première variable indépendante (NDVI₁), tandis que la somme des valeurs d'NDVI des classes 5, 6 et 7 indiquant une végétation clairsemée, représente la deuxième variable indépendante (NDVI₂). Le rendement observé constitue la variable dépendante. Les classes à faible végétation ont une influence insignifiante sur le modèle, elles ne sont pas prises en considération. Donc, le modèle est construit par deux variables indépendantes NDVI₁ et NDVI₂. Le résultat d'implémentation de la régression robuste sur logiciel MATLAB a donné les valeurs suivantes pour les deux coefficients de régression β₁= 61,49 et β₂= 20,81. La constante C= 1,149. Donc, l'équation d'estimation de rendement (Rdt) est de la forme suivante :

$$Rdt_{NDVI} = 61,49 NDVI_1 + 20,81 NDVI_2 + 1,1 \quad (6)$$

III.4.2. Utilisation d'EVI

Dans les deux cas, les mêmes valeurs de rendements sont considérées comme variables dépendantes. Cependant, les variables indépendantes sont construites par les trois premières classes de valeurs d'EVI (classe 1, 2 et 3) qui représentent la végétation dense. Les classes à végétation clairsemé et à faible végétation ont une influence insignifiante sur le modèle, elles ne sont pas prises en considération. Dans ce cas, le modèle est construit par trois variables indépendantes EVI₁, EVI₂ et EVI₃. Le résultat d'implémentation de la régression robuste sur MATLAB a donné les valeurs suivantes pour les trois coefficients de régression β₁= 66,03, β₂ = 34,54 et β₃= 20,44. La constante C= 4,79. Donc, l'équation d'estimation de rendement est de la forme suivante :

$$Rdt_{EVI} = 66,03 EVI_1 + 34,54 EVI_2 + 20,44 EVI_3 + 4,79 \quad (7)$$

III.5. Les critères de performance

Il est évident que le modèle construit par l'utilisation d'EVI est plus performant que celui construit par l'utilisation des indices d'NDVI (Tableau 5). Par conséquent, l'erreur relative MARE = 17,30 % est nettement inférieure à celle obtenue en utilisant l'NDVI.

Tableau 5. Critères de performance des modèles selon les deux types d'indices de végétation

Indice de végétation		R ²	RMSE (q/ha)	MAE (q/ha)	MAR E %
NDVI	RR	0,71	8,30	7,17	20,33
	RM	0,71	8,30	7,17	20,35
EVI	RR	0,77	7,44	5,99	17,21
	RM	0,77	7,45	6,00	17,30

RR : Régression Robuste, RM: Régression Linéaire Multiple

Dans les deux cas, l'utilisation de la régression robuste est légèrement mieux que celle de la régression linéaire multiple.

III.6. Paramètres statistiques

Les paramètres statistiques des rendements observés et les rendements estimés par les deux indices sont présentés dans le tableau 06. Il a été constaté que les paramètres des rendements estimés sont généralement plus proches les uns des autres par rapport aux rendements observés. Cependant, les paramètres des rendements estimés par les indices EVI sont légèrement plus proches que ceux des rendements estimés par les indices NDVI (tableau 6).

Tableau 6. Comparaison des paramètres statistiques des rendements estimés par les deux types d'indices de végétation

Paramètres	Rendements		
	observés	estimés /EVI	estimés /NDVI
Moyenne	41,78	41,77	41,78
MIN	6,95	10,50	10,23
MAX	68,89	65,23	57,80
Ecartype	15,68	13,76	13,25
Médiane	40,92	44,12	43,82

La comparaison graphique entre les rendements observés et les rendements estimés par les types d'indices de végétation NDVI (Fig 7) et EVI (Fig 8), montre que généralement les deux graphiques prennent les mêmes allures. Néanmoins, la série des points des rendements estimés par les indices EVI est plus proches de la série des points des rendements estimés par les indices NDVI.

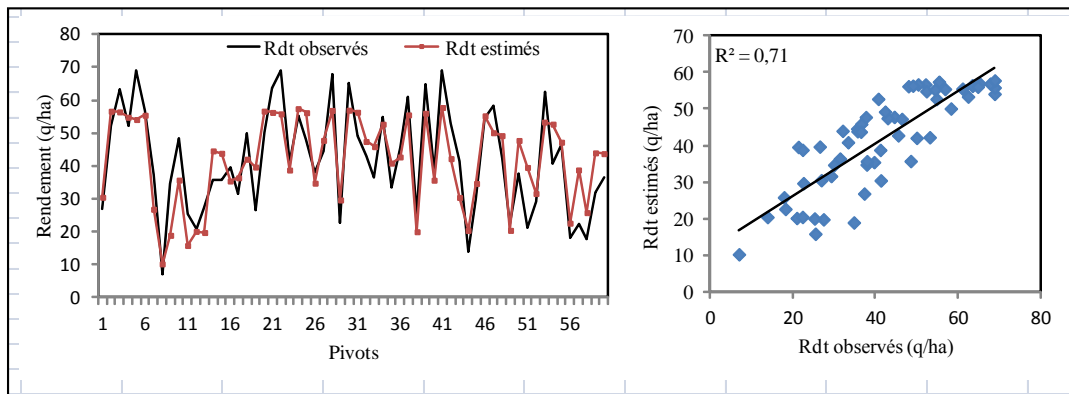


Figure 7. Comparaison graphique entre les rendements observés et les rendements estimés par les indices NDVI.

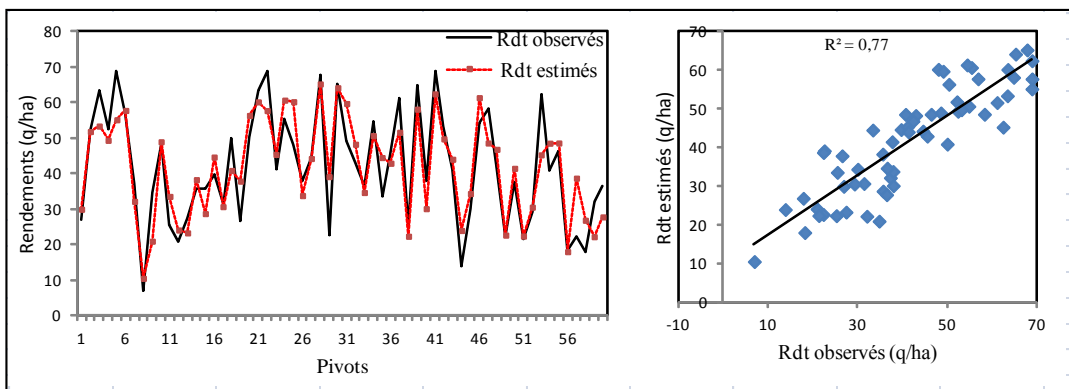


Figure 8. Comparaison graphique entre les rendements observés et les rendements estimés par les indices.

De même, la liaison entre les rendements estimés par les indices EVI ($r = 0,77$) est plus forte par rapport à celle estimée par les indices NDVI ($r = 0,71$). La valeur de R^2 obtenue en utilisant NDVI est plus proche de ($r = 0,7$) celle obtenue par [23, 14], elle est nettement supérieure de ($r = 0,67$) la valeur trouvée par [16]. Ces deux valeurs sont très inférieures à $r = 0,77$ obtenues dans la présente étude en utilisant les indices de végétation EVI. D'après les résultats obtenus, l'utilisation des indices de végétation NDVI et EVI permettent de prédire le rendement du maïs dans la région d'Adrar avec une bonne précision, sans faire recours à beaucoup de traitement et d'ajustement de l'image. Ceci est dû à la visibilité du ciel pendant la période de prise de photos aériennes. En plus, les valeurs des indices EVI et NDVI durant 65 à 80 jours après la date de semis donnent de bonnes estimations des indices de la végétation qui reflète les rendements attendus. Cette période correspond aux périodes de floraison et de remplissage du grain du maïs dans la région d'étude. Cet intervalle de moment est lié, probablement, au cycle de la variété (précoce / tardif). Ces valeurs coïncident avec le moment de prédiction du rendement en Amérique centrale qui est environ de 65 à 75 jours après la date de semis en utilisant les mêmes

indices de végétations [16]. Cette cohérence peut être due à la même longueur de la saison de croissance et au stade tardif du remplissage du grain dans notre région (wilaya d'Adrar). Les chercheurs s'accordent généralement pour dire que la période optimale de prévision du maïs s'étend de la floraison au développement de l'épi, soit 50 et 70 jours après la date de semis pour [24]. Le maximum de l'EVI peut aller jusqu'à 90 après le semis selon [25]. Cette période correspond à la formation de soies et au développement des épis, ce qui est en accord avec un certain nombre d'études de rendements de maïs [26, 24].

Dans cette étude, l'EVI a montré une aptitude prédictive élevée dans l'estimation du rendement du maïs par rapport à l'NDVI. Le même constat a été signalé par certains auteurs [27, 28].

III.7. Amélioration des performances des modèles

La précision des modèles peut être beaucoup mieux si un certain nombre de contraintes ont été surmontées : Le matériel du moisson- battage inadapté provoque beaucoup de perte à la récolte, elle pourrait atteindre dans certains cas de 20 à 40% de la récolte totale. Le non-respect du taux d'humidité à la récolte provoque des pertes de la production. L'infestation des champs du maïs par les adventices est une source importante d'erreur d'imagerie, elle contraigne aussi l'obtention d'un bon rendement.

IV. Conclusion

L'étude a démontré le potentiel tangible d'utilisation de données des images satellitaires, de Landsat8 et sentinel2 à une résolution 10 et 30 m respectivement, pour estimer les superficies réellement emblavées et évaluer le rendement du maïs grain sur le terrain. L'analyse comparative des données d'EVI et de l'NDVI pour l'estimation du rendement à grande échelle dans la wilaya d'Adrar de 2014 à 2016 a été réalisée de manière objective à l'aide de la régression robuste. En utilisant le NDVI et l'EVI, les résultats obtenus ont montré une forte corrélation entre les rendements réels et les rendements estimés. Cependant, le modèle basé sur les indices EVI a produit des estimations de rendement plus précises que le modèle basé sur les indices NDVI. Étant donné que plusieurs sources d'erreur telles les pertes à la récolte et les adventices pourraient réduire la précision du modèle, les résultats de cette étude ont démontré l'efficacité des données d'EVI pour une estimation du rendement à grande échelle utilisant la date de pic de végétation (floraison/ épiaison), ce qui serait utile pour estimer la production du maïs avant la période de la récolte afin d'assurer une disponibilité d'un aliment très demandé dans le domaine de l'élevage. En générale, on peut conclure que les indices de végétation l'EVI et l'NDVI peuvent avoir une importance incontournable pour l'estimation des rendements de maïs dans la région d'Adrar. Aussi, cette étude a montré que, même au niveau du champ, malgré l'existence de plusieurs contraintes, les images à date unique peuvent fournir des informations utiles sur l'état de cultures et de prédire le rendement. Cependant, la réussite de la culture du maïs dans la région d'Adrar passe impérativement par le respect de l'itinéraire technique et surtout l'apport des engrais, une bonne conduite de l'irrigation par le pivot et la lutte contre les mauvaises herbes. Il faut dire que cette approche qui est utilisé avec succès pour la culture de Maïs dans la région d'Adrar et peut être utilisé pour les autres cultures dans d'autres zones, mais tenir compte de sources d'erreurs pour les minimiser au

maximum. En perspective, nous recommandons de bien maîtriser cet outil pour généraliser son utilisation et ce afin de prévenir en temps réel pour améliorer la situation des cultures et prendre la décision qui convient à temps opportun.

V. Référence :

1. FAO, Le maïs, le riz et le blé, guide pour une production céréalière durable (2016).
2. FAO, bonnes pratiques pour l'industrie de l'alimentation animale. Manuel de production et santé animales. Numéro 9. Rome, Italie. (2013) 120 p.
3. Roussillon, M.A.; Maroubi.; H. Perspectives des marchés des matières premières entrant dans l'alimentation animale. Evaluation des écarts de prix des formules alimentaires porcines en Union Européenne, aux Etats-Unis et au Brésil. Rapport d'étude (2010) 150 p.
4. Yahi, L. l'Office national d'aliments de bétail (ONAB) (2012).
5. Huang, J.; Wang, X.; Li, X.; Tian, H.; Pan, Z. Remotely Sensed Rice Yield Prediction Using Multi-Temporal NDVI Data Derived from NOAA's-AVHRR. PLoS ONE 8(8) (2013) e70816.
6. Prasad, A.K.; Singh, R.P.; Tare, V.; Kafatos, M. Use of vegetation index and meteorological parameters for the prediction of crop yield in India. *International Journal of Remote Sensing* 28(2007) 5207–5235.
7. Mkhabela, M.S.; Bullock, P.; Raj, S.; Wang, S.; Yang, Y. Crop yield forecasting on the Canadian Prairies using MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology* 151(2011) 385–393.
8. Skakun, S.; Vermote, E.; Roger, J. C.; and Franch, B. Combined use of Landsat-8 and Sentinel-2A images for winter crop mapping and winter wheat yield assessment at regional scale (2017).
9. Rueda-Ayala, V.; Kunapuli, S.; Maiguashca, J. Development of yield prediction models in the maize crop using spectral data for precision agriculture applications (2015).
10. Hatfield, J.L.; Prueger, J.H.; Value of using different vegetative indices to quantify agricultural crop characteristics at different growth stages under varying management practices. *Remote Sens.*, 2 (2010) 562–578.
11. Basso, B.; Cammarano, D.; Carfagna, E. Review of crop yield forecasting methods and early warning systems. In Proceedings of the First Meeting of the Scientific Advisory Committee of the Global Strategy to Improve Agricultural and Rural Statistics, FAO Headquarters, Rome, Italy, (2013) 18–19.
12. Ibrahim, S. A.; Yahya, W.B. Effects of Outliers and Multicollinearity on Some Estimators of Linear Regression Model. Edited Proceedings of 1st International Conference 1 (2017) 204-209.
13. Bin Khamis, A.; Binti Abdul Razak, N.A. A Comparative Study of Robust Regression Methods in Modeling the Currency in Circulation in Malaysia. *International Journal of Science and Research.*, 6 (4), (2017) 241-245.
14. Lin, J.; Cai, G.; Liu, S.; Puppala, A.J. Robust Linear Regression for Undrained Shear Strength Data (2018).
15. Duncan, J. M. A.; Dash, J.; & Atkinson, P. M. . The potential of satellite-observed crop phenology to enhance yield gap assessments in smallholder landscapes. *Frontiers in Environmental Science*, 3(August), (2015)1-16.

16. Bolton, D. K.; and Friedl, M. A. Forecasting crop yield using Remotely Sensed vegetation indices and crop phenology metrics. *Agricultural and Forest Meteorology*, 173, (2013) 74–84.
17. Elmore, A. J.; Mustard, J. F.; Manning, S.-J.; and Lobell, D. B. Quantifying vegetation change in semiarid environments: precision and accuracy of Spectral Mixture Analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, v. 73, n.1, (2000) 87-102.
18. Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83 (1–2), (2002) 195–213.
19. Sahli, Z. Deux tentatives controversées de modernisation de l'agriculture en zone aride : l'opération "tomate d'Adrar" et la mise en valeur hydro-agricole du Touat Gourara (Wilaya d'Adrar-Algérie). *Options Méditerranéennes* 29(A) (1997) 283–295.
20. Achard, F.; Malheiros de Oliveira, Y.M.; et Mollicone, D. Suivi du couvert forestier et de la déforestation. In : J. Delincé (dir.), *Manuel de la Stratégie mondiale pour l'amélioration des statistiques agricoles et rurales (GSARS)* : Rome(2017).
21. Kaufman, Y.J.; and Tanré, D.-C. Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, no 2, (1992) 261-270.
22. Bodart, C.; Eva, H.D.; Beuchle, R. et al. Pre-processing of a Sample of Multi-scene and Multi-date Landsat Imagery used to Monitor Forest Cover Changes over the Tropics. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 66, no 5, (2011) 555-63.
23. Lillian, K.P. Real-Time prediction of crop yields from MODIS relative vegetation health: A continent-wide analysis of Africa -series for dry land vegetation dynamics monitoring (2018).
24. Wang, M.; Tao, F.; and Shi, W. Corn Yield Forecasting in Northeast China Using Remotely Sensed Spectral Indices and Crop Phenology Metrics. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(7), (2014) 1538–1545.
25. Chen, P.; Fedosejevs, G.; Tiscareño-López, M.; and Arnold, J. G. Assessment of modis-EVI, MODIS-NDVI and vegetation-NDVI composite data using agricultural measurements: an example at corn fields in western Mexico (2006).
26. Omoyo, N. N.; Wakhungu, J.; and Oteng'i, S. Effects of climate variability on maize yield in the arid and semi-arid lands of lower eastern Kenya. *Agriculture & Food Security*, 4(1), (2015) 8.
27. Son, N. T.; Chen, C. F.; Chen, C. R.; Minh, V. Q.; and Trung, N. H. A comparative analysis of multitemporal MODIS EVI and NDVI data for large-scale rice yield estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197, (2014) 52–64.
28. Zhang, J.; Feng, L.; and Yao, F. Improved maize cultivated area estimation over a large scale combining MODIS–EVI time series data and crop phenological information. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 94, (2014) 102-113.

Please cite this Article as:

Hamrelaine M., Mekliche A., Laaboudi A., Cartographie de superficies irriguées et l'estimation de rendement de la culture du maïs par l'imagerie satellitaire en utilisant l'indice de végétation dans les zones arides, **Algerian J. Env. Sc. Technology**, 7:1 (2021) 1739-1749