

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES



FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE L'AGRONOMIE

Mémoire

De fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie (S.N.V.)

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Production Végétale

Intitulé du thème :

**Cartographie de l'occupation des sols agricoles en milieu
oasien commune de Magrane -Wilaya d'El-Oued-**

Présenté par : KHADDAR Hassen

Mémoire soutenu le 30 Septembre 2020 devant l'honorable jury composé de :

Examinateur : Mr. REGUIEG Mohammed Mokhtar (Maître-assistant A) UDL SBA

Examinateur : Dr. BACHIR BOUAIDJRA Salah Eddine (Maitre de conférences A) UDL SBA

Promoteur : Mr. BENMANSOUR Nadir (Maitre de conférences B) UDL SBA

Année universitaire 2019– 2020

Remerciements

A la fin de la réalisation de cette étude, nous avons remercié notre Dieu ALLAH Tout Puissant qui nous a donné la force et la volonté pour continuer toute ces années d'études.

Je remercie mon encadrent M. BENMANSOUR Nadir pour l'assistance qu'il me a témoignée tout au long de ce travail, qu'il trouve ici l'expression de mon gratitude pour ses conseils et tous les enseignants du département des Sciences Agronomiques de l'université de Djilali-Liebes de Sidi-Bel Abbes

TOUS LES PERSONNES QUI M'ONT AIDE POUR ACCOMPLIR CE TRAVAIL

Je vous adresse mes vifs remerciements

Hassen

Dédicace

Allah dit : « *Mon succès ne relève que d'Allah.*

Je me confie à Lui et vers Lui je reviens

Repentant. » Saint Coran (Hoûd, verset 88)

Je dédie ce modeste mémoire à mes chers parents :

Ma mère et mon Père,

Mes grands-parents.

Pour leur soutien, leur sacrifice, leur amour et leur
courage,

Et que Dieu bénisse leur existence.

A ma fiancée.

A mes chères sœurs R et H

Surtout la petite fleur Marwa.

A toute ma famille, mes professeurs et mes chères
amies proches.

Qui n'ont cessé d'être pour moi l'exemple de
réussite

Et de bonheur dans cette vie.

KHADDAR HASSEN

Table des matières

Résumé	
Introduction Générale.....	1
Partie bibliographie	2
Etat de l'art	2
1. Introduction	2
2. Télédétection en agriculture	2
2.1. Cartographie de la couverture terrestre	3
Agriculture de précision	3
Agriculture de précision	4
2.2. Surveillance régionale de l'état des cultures.....	5
2.3. Changement de l'occupation des sols	5
2.4. Cartographie de la couverture terrestre irriguée.....	6
I.1. La télédétection.....	8
I.1.1. Généralité.....	8
I.1.1.2. Quelques problématiques.....	8
I.1.2. Définition	9
I.1.3. Quelles sortes des satellites ?.....	9
I.1.4. Processus de la télédétection.....	11
4.1. La source d'énergie	11
4.2. Les interactions du rayonnement avec l'atmosphère	12
4.3. Les interactions du rayonnement avec la surface terrestre.....	12
4.4. L'enregistrement du signal par le capteur satellitaire	12
4.5. La transmission et la réception des données	12
I.5. Télédétection et source de rayonnement.....	12
I.5.1. Rayonnement électromagnétique.....	12
I.5.2. Spectre électromagnétique	13
I.5.2.1. Signatures spectrales des principales surfaces naturelles	14
I.5.2.1.1. Signature spectrale des sols	15
I.5.2.1.2. Signature spectrale de l'eau	15
I.5.2.1.3. Signature spectrale de végétation.....	16
I.5.2.2.1. Les pigments foliaires	17
I.5.2.2.2. La structure cellulaire des feuilles	17
I.5.2.2.3. L'influence de la teneur en eau	18
I.5.3. Type des capteurs.....	19
I.6. Domaines d'application de la télédétection	19

II.1. Introduction	22
II.2. Système Sentinel-2 pour le suivi de l'agriculture.....	22
II.3. Les images Sentinel -2.....	23
II.4. Propriétés des images satellitaires	24
4.1. Résolution spatiale	24
4.2. La résolution spectrale	24
4.3. Résolution radiométrique	24
4.4. Résolution temporelle	24
II.5. Nature de l'image	24
II.6. Les méthodes de classification thématique des images satellitaires sur ordinateur	26
6.1. Les classifications non dirigées.....	26
6.2. Les classifications dirigées.....	26
II.7. Indices de végétation	26
II.7.1. Principe.....	27
II.8. Finalité du traitement numérique d'image (TNI)	27
Partie expérimentale.....	29
III. Présentation de la zone d'étude.....	29
III.1. Choix de la commune de Magrane.....	29
III.2. Présentation générale du commun de Magrane.....	29
III.2.1. Situation géographique.....	29
III.2.2. Conditions climatiques	29
Pluviométrie	29
La température.....	30
IV. Matériels et méthodes	31
IV.1. Matériels.....	31
IV.1.1. Collecte et consultation de la documentation	31
IV.1.2. Logiciel utilisé.....	31
IV.2. Méthodes.....	32
IV.2.1. Délimitation de la commune de Magrane	32
IV.2.2. Enregistrement des photos satellite « Google Earth »	33
IV.2.3. Digitalisation de la commune avec ArcView 3.3	33
IV.2.4. Mosaïque des images satellitaires	34
IV.2.5. Définition du masque	34
I.V.2.6. Interprétation visuelle	34
IV.2.7. Construction et l'application du masque.....	35
IV.2.8. La composition colorée.....	36
IV.2.9. NDVI.....	37

IV.2.10. Calcul de l'indice d'NDVI des images culturelles.....	39
IV.2.11. Extraction des cartes à partir des différents attributs	39
V. Résultats et discussions	40
V.1. Analyse de l'indice d'NDVI des images sentinelles 2	40
V.2. Extraction des cartes à partir des différents attributs	40
Conclusion.....	46
Références bibliographies	

Liste des figures

Figure 1 : processus de la télédétection	11
Figure 2 : Nature et propagation d'une onde électromagnétique	12
Figure 3 : le spectre électromagnétique	13
Figure 4 : signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen	14
Figure 5 : réflectance de l'eau de mer en fonction de sa teneur en chlorophylle	15
Figure 6 : réflectance de l'eau de mer pour diverses valeurs du coefficient d'atténuation	16
Figure 7 : influence de la structure cellulaire des feuilles sur leur signature spectrale	18
Figure 8 : principaux facteurs influençant la signature spectrale de la végétation dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen	19
Figure 9 : Répartition mensuelle interannuelle de la pluie moyenne caractéristique de la commune calculée entre 2009-2019	30
Figure 10 : Répartition mensuelle interannuelle de la température moyenne caractéristique de la commune calculée entre 2009-2019	30
Figure 11 : Exemple de délimitation du commun de Magrane	32
Figure 12 : Exemple de digitalisation des palmerais et les serres	33
Figure 13 : Exemple de mosaïque deux images satellitaires	34
Figure 14 : Exemple de construction du masque	35
Figure 15 : masque de la partie sud du commun de Magrane	36
Figure 16 : composition colorée	36
Figure 17 : NDVI	37
Figure 18 : NDVI masqué	37
Figure 19 : Segmentation a seuil contrôlé	38
Figure 20 : Shp du commun de Magrane	38
Figure 21 : Carte d'occupation du sol dans le sud du commun de Magrane saison 2018/2019	

Figure 22 : Carte d'occupation du sol dans le sud du commun de Magrane saison 2017/2018
42

Figure 23 : statistiques agricoles des cultures saisonnières de la commune de Magrane de
saison 2017/2018 43

Figure 24 : statistiques agricoles des cultures saisonnières de la commune de Magrane de
saison 2018/2019 43

Liste des tableaux

Tableau 1 : Longueurs d'ondes en nm (nanomètre) un nanomètre = 10^{-9} mètre	13
Tableau 2 : les domaines d'application de la télédétection UNIGE (2004), Peduzzi (2009)	20
Tableau 3 : Moyennes des précipitations (moyennes sur 10 ans)	29
Tableau 4 : Les indices d'NDVI des images sentinelles 2	40

Cartographie de l'occupation des sols agricoles en milieu oasien commune du Magrane Wilaya d'El-Oued sud-est de l'Algérie

Résumé

Les applications informatiques qui contiennent une dimension géographique et des systèmes d'information géographique sont utilisées par les organisations professionnelles et les ingénieurs

Dans ce travail, nous avons utilisé des images satellitaires et découvert des produits agricoles dans le district de Magran, la wilayat d'El Oued

Le système d'information géographique SIG contient plusieurs informations, dont la plus importante est la possession des terres, le système agricole, les zones, et nous avons développé d'autres domaines tels que les cartes d'occupation du sol

Mots clés : Télédétection, cartographie, systèmes d'information géographique SIG, al-Mogran, Wilaya d'El-Oued

رسم خرائط استخدامات الأراضي الزراعية بتجمع واحة مقران ولاية الوادي الجنوب الشرقي للجزائر

ملخص

تستعمل تطبيقات الحاسوب التي تحتوي على بعد جغرافي وأنظمة المعلومات الجغرافية من طرف المنظمات والمهندسين الاحترافيين

في هذا العمل استخدمنا صور الأقمار الصناعية وكشفنا عن المنتوجات الفلاحية في دائرة المقران ولاية الوادي

يحتوي نظام المعلومات الجغرافية عدة معلومات أهمها حيازة الأراضي، النظام الزراعي المساحات وقد وضعنا المجالات الأخرى مثل الخرائط الموضوعية

كلمات مفتاحية: استشعار عن بعد، رسم الخرائط، نظم المعلومات الجغرافية، المقران، ولاية الوادي

Mapping of agricultural land use in the oasis community of Magrane Wilaya of El-Oued south Est of Algeria

Abstract

Computer applications that contain a geographical dimension and geographic information systems are used by professional organizations and engineers

In this work, we used satellite imagery and uncovered agricultural products in the Magran commune, the Wilayat of El Oued

The geographical information system contains several information, the most important of which is land possession, the agricultural system, areas, and we have developed other fields such as land use maps

Key words: Remote-sensing, mapping, geographic information systems SIG, al-Mogran, The Wilayat of El-Oued

Introduction Générale

L'Algérie passée par plusieurs politiques agricoles depuis l'indépendance sur le mode pratique agraire celle politique sont : l'autogestion et la révolution agraire. Ces deux premières décisions ont eu la gestion des terres agricoles en Algérie.

La wilaya d'El-Oued se positionne en tête des wilayas du Sud dans les cultures agricoles, notamment de primeurs, et se hisse même parmi les premières wilayas productrices du pays, selon la Chambre locale de l'Agriculture. Elle est leader en matière de culture de pomme de terre à l'échelle nationale, mais aussi dans d'autres cultures telles que les dattes, la tomate, les arachides, le tabac et autres, portée par l'orientation des jeunes vers l'investissement agricole et confortée par la mise en place de diverses mesures lui ayant permis d'accéder au statut de pôle agricole par excellence, estime le président de la Chambre, Bekkar Ghemmam Hamed. (El-Oued : Pôle agricole en tête des wilayas du Sud productrices de primeurs, 2019)

L'objectif finale visée dans ce mémoire est la construction des cartes d'occupation des sols agricoles de chaque parcelle et de saisir les données dans un système d'information géographique (SIG), ce dernier permettra de fournir un outil précieux de gestion dans notre zone d'étude choisie : la commune de Magrane dans la wilaya d'El Oued.

Le présent travail est constitué des chapitres suivants :

- Le premier chapitre est un aperçu pour l'étude bibliographique sur la télédétection en agriculture
- Le deuxième chapitre est un aperçu sur la cartographie de l'occupation du sol à partir des images Sentinel 2
- Le troisième chapitre aborde une présentation de la zone d'étude
- Le quatrième chapitre est pour les matériels et méthodes de travail
- Le cinquième chapitre est pour la présentation des résultats issus de notre travail.

Partie bibliographie

Chapitre I

Recherche bibliographique

Partie bibliographie

Etat de l'art

1. Introduction

L'intérêt croissant pour les technologies de télédétection et d'avancement telles que ArcGIS, QGIS, ENVI, ERDAS et d'autres ont des passerelles ouvertes vers diverses recherches - l'agriculture étant l'une d'entre elles. La viabilité aisée des images hyperspectrales (grâce au Centre USGS EROS) et l'enthousiasme des scientifiques à utiliser leur expertise pour interpréter et analyser ces images afin de produire des produits robustes, sensibles et compréhensibles ont non seulement profité à la communauté scientifique mais aussi aux acteurs locaux, les décideurs et l'humanité dans son ensemble.

Diverses tentatives ont été faites concernant l'étude de l'agriculture par télédétection. L'idée de base est d'utiliser et d'interpréter ces images télédéteectées telles que MODIS, Landsat, Sentinel, AVHRR, ASTER et VIRRS et de produire des ensembles de données conviviaux qui ont la capacité de distinguer les terres agricoles des autres. Les ensembles nationaux de données sur la couverture terrestre (NLCD) produits par l'USGS, par exemple, ont peu de classes qui distinguent les terres cultivées des autres. La couche de données des cultures (CDL) produite par le département américain de l'Agriculture va encore plus loin pour classer différents types de cultures telles que le maïs, le riz, le blé et autres. Les données d'analyse de soutien à la sécurité alimentaire mondiale (GFSAD30) financées par la NASA fournissent des données mondiales à haute résolution sur les terres cultivées et leur utilisation de l'eau qui contribuent à la sécurité alimentaire mondiale au XXIe siècle. Les produits GFSAD30 sont dérivés de données de télédétection multi-capteurs (par exemple, Landsat, MODIS, AVHRR), de données secondaires et de données de parcelles et visent à documenter la dynamique des terres cultivées de 1990 à 2017. Il existe divers autres ensembles de données produits au niveau mondial, l'échelle régionale et locale qui se concentre sur la fourniture d'ensembles de données géospatiales détaillées, complètes et cohérentes à différentes échelles temporelles et spatiales.

2. Télédétection en agriculture

L'application de la télédétection en agriculture va de la simple identification des parcelles de terres cultivées à des applications sophistiquées comme l'agriculture de précision. L'évaluation facile (gratuite) des données télédéteectées (via l'USGS) et l'avancement des outils d'analyse géospatiale ont déclenché les études de manière vigoureuse. Cependant, en raison de certaines

limitations techniques, de budget et de contraintes de temps, les études sont à la traîne. Voyons rapidement comment la télédétection a aidé en agriculture :

2.1. Cartographie de la couverture terrestre

La cartographie de la couverture terrestre est l'une des applications les plus populaires de la télédétection. La cartographie de la couverture terrestre se concentre sur la distinction des différents types de couverture terrestre à la surface de la terre. Ces couvertures terrestres comprennent les terres cultivées, les prairies, les forêts, l'eau, les zones urbaines et autres. Lors de la cartographie de la couverture terrestre, les images télédéteectées telles que Landsat sont des processus en s'intégrant à des ensembles de données auxiliaires multi-sources tels que la température, l'altitude, les précipitations à l'aide de classificateurs robustes tels que l'arbre de décision ou la machine à vecteur de support, puis un thème hiérarchique basé sur un Thème une post-classification est effectuée pour générer des produits de couverture terrestre à différentes échelles temporelles, spectrales et spatiales.

La cartographie de la couverture terrestre a aidé les chercheurs ainsi que les parties prenantes dans la prise de décision / politique, la planification de l'économie agro-basée, la gestion de l'approvisionnement alimentaire, la gestion des ressources en eau, etc. L'identification des types de cultures, d'autre part, aide aux meilleures pratiques de gestion, à décider des types de cultures à cultiver et à prévoir les rendements des cultures. L'intégration des types de cultures avec les conditions météorologiques et climatiques actuelles et historiques, les modèles de rendement des cultures, les caractéristiques du sol et les conditions du marché renforcent le système d'aide à la décision qui, en retour, aide à la gestion des cultures, notamment la sélection des cultures en fonction du type de champ et de sol, l'élaboration des plans de traitement pour améliorer les rendements des cultures et réduire les risques de maladies ou de ravageurs.

Agriculture de précision

L'agriculture de précision, également appelée agriculture de précision et gestion des cultures spécifique au site, fait référence à un ensemble de techniques, de technologies et de stratégies de gestion conçues pour optimiser la croissance des plantes et la rentabilité de l'exploitation en ajustant les traitements en fonction des conditions biophysiques variables qui se produisent dans un champ agricole au lieu d'appliquer le même traitement uniformément sur toute la zone. L'agriculture de précision utilise de nouvelles technologies comme la télédétection, le SIG et le GPS pour augmenter les rendements et la rentabilité des cultures tout en abaissant les niveaux d'intrants traditionnels nécessaires à la culture (terre, eau, engrais, herbicides et insecticides).

En d'autres termes, une agriculture contrôlée où les agriculteurs peuvent décider quelles cultures planter, quels nutriments (et quelle quantité) utiliser et quand cultiver en fonction des modèles et des algorithmes développés à l'aide de technologies avancées telles que les outils GPS et SIG.

Thème une post-classification est effectuée pour générer des produits de couverture terrestre à différentes échelles temporelles, spectrales et spatiales.

La cartographie de la couverture terrestre a aidé les chercheurs ainsi que les parties prenantes dans la prise de décision / politique, la planification de l'économie agro-basée, la gestion de l'approvisionnement alimentaire, la gestion des ressources en eau, etc. L'identification des types de cultures, d'autre part, aide aux meilleures pratiques de gestion, à décider des types de cultures à cultiver et à prévoir les rendements des cultures. L'intégration des types de cultures avec les conditions météorologiques et climatiques actuelles et historiques, les modèles de rendement des cultures, les caractéristiques du sol et les conditions du marché renforcent le système d'aide à la décision qui, en retour, aide à la gestion des cultures, notamment la sélection des cultures en fonction du type de champ et de sol, l'élaboration des plans de traitement pour améliorer les rendements des cultures et réduire les risques de maladies ou de ravageurs.

Agriculture de précision

L'agriculture de précision, également appelée agriculture de précision et gestion des cultures spécifique au site, fait référence à un ensemble de techniques, de technologies et de stratégies de gestion conçues pour optimiser la croissance des plantes et la rentabilité de l'exploitation en ajustant les traitements en fonction des conditions biophysiques variables qui se produisent dans un champ agricole au lieu d'appliquer le même traitement uniformément sur toute la zone. L'agriculture de précision utilise de nouvelles technologies comme la télédétection, le SIG et le GPS pour augmenter les rendements et la rentabilité des cultures tout en abaissant les niveaux d'intrants traditionnels nécessaires à la culture (terre, eau, engrais, herbicides et insecticides). En d'autres termes, une agriculture contrôlée où les agriculteurs peuvent décider quelles cultures planter, quels nutriments (et quelle quantité) utiliser et quand cultiver en fonction des modèles et des algorithmes développés à l'aide de technologies avancées telles que les outils GPS et SIG.

L'utilisation de la télédétection pour surveiller l'état des cultures pendant la saison de croissance et de la technologie SIG pour analyser les résultats a permis d'identifier les problèmes et de cartographier leur emplacement. De plus, l'utilisation du GPS pour collecter les données de terrain des échantillons de sol et intégrer ces résultats aux données météorologiques et climatiques actuelles et historiques aide à prendre les meilleures décisions

en termes de choix des meilleurs types de cultures, d'approvisionnement en nutriments et d'utilisation des traitements appropriés.

En raison de l'avancement de la télédétection et des fonctionnalités ajoutées dans le SIG, la caractérisation, la modélisation et la cartographie de presque toutes les cultures ont été possibles, c'est-à-dire que l'avenir de l'agriculture de précision repose largement sur le SIG et la télédétection.

2.2. Surveillance régionale de l'état des cultures

Les données de télédétection utilisées conjointement avec les données historiques et actuelles sur les cultures, les données météorologiques et les rapports de terrain fournissent une évaluation globale de la situation des cultures et des approvisionnements alimentaires - et l'intégration de ces données avec des cartes numériques des limites administratives, des prix récents et des conditions du marché sur les stocks alimentaires et les taux de consommation peuvent être utilisés pour prédire les perspectives des cultures actuelles. Divers outils Web interactifs sont développés pour maintenir ces informations.

Certaines des sources de surveillance régionale de l'état des cultures à examiner sont les suivantes :

- Système mondial d'information et d'alerte rapide (SMIAR) de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture : il fournit une analyse détaillée et des rapports fréquents sur les conditions des cultures et la situation des approvisionnements alimentaires pour tous les pays.
- Programme d'évaluation de l'état des cultures de Statistique Canada : Il fournit des cartes, des données statistiques et des courbes NDVI mises à jour chaque semaine pour toute la région. Les utilisateurs peuvent choisir de manière interactive les régions d'intérêt par leur nom ou en les sélectionnant sur des cartes à plusieurs échelles.

2.3. Changement de l'occupation des sols

L'occupation du sol indique le type physique de terrain, comme la forêt ou l'eau libre, tandis que l'utilisation du sol documente la façon dont les gens utilisent le terrain. En comparant les données sur la couverture terrestre et les cartes sur une période de temps, les gestionnaires du littoral peuvent documenter les tendances et les changements d'utilisation des terres. L'utilisation des terres La modification de la couverture terrestre fait simplement référence à la conversion d'une parcelle d'utilisation des terres par les humains, d'un but à un autre. Par

exemple, les terres peuvent être converties de terres cultivées en prairies, ou de terres sauvages (par exemple, des forêts tropicales) à des utilisations des terres spécifiques à l'homme (par exemple, des plantations d'huile de palme).

La télédétection a une contribution importante à apporter pour documenter le changement réel de l'utilisation des terres / de la couverture terrestre à l'échelle régionale et mondiale. À l'aide des images télédéteectées de séries chronologiques, il permet de détecter le changement de la couverture terrestre, par exemple, la conversion des prairies en terres cultivées et / ou la conversion des terres cultivées en prairies. La télédétection permet de voir facilement et rapidement différents types de couverture terrestre (herbe, arbustes, arbres, stérile, eau et éléments artificiels) à différents intervalles de temps - et cet instantané de la couverture terrestre à différents intervalles de temps donne une image plus large de la façon dont la couverture terrestre a changé au cours d'une période de temps. Le taux de changement peut être brutal, comme les changements causés par l'exploitation forestière, les ouragans et les incendies, ou subtil et graduel, comme la régénération des forêts et les dommages causés par les insectes. En utilisant des techniques de télédétection, nous pouvons suivre les changements naturels à long terme des conditions climatiques, les processus géomorphologiques et écologiques, les altérations anthropiques du couvert végétal et des paysages, la variabilité climatique interannuelle et l'effet de serre d'origine humaine et prendre les bonnes décisions au moment.

Connaissant l'utilisation des terres et la tendance de l'occupation des sols, on peut mieux comprendre comment et où planifier les pratiques agricoles et en bénéficier également.

2.4. Cartographie de la couverture terrestre irriguée

Une autre application importante de la télédétection en agriculture est la cartographie de la couverture terrestre irriguée. Les observations par satellite fournissent des données fiables, économiques et synoptiques de la surface de la Terre. Ces données contribuent à cartographier la couverture terrestre, y compris les terres agricoles. Les méthodes existantes de caractérisation de la couverture des terres agricoles ont souvent été dérivées au moyen de techniques de classification d'images. Cependant, la variété des cultures irriguées et les modèles spatiaux de leur phénologie nécessitent des informations de croissance de la végétation composites, multi-temporelles et cohérentes avec suffisamment de détails spatiaux, ainsi qu'une riche bibliothèque de formations de référence sur le terrain et de données auxiliaires (par exemple, le climat et la topographie), classer les terres irriguées à l'aide d'observations par satellite. L'obtention constante de ces paramètres à l'échelle nationale est un défi majeur.

Des images de télédétection avec diverses caractéristiques spatiales et temporelles ont été largement utilisées pour cartographier l'étendue des terres cultivées et sa dynamique. Plus précisément, l'imagerie du spectroradiomètre imageur à résolution modérée (MODIS) offre une capacité unique de cartographier l'étendue des terres cultivées à des résolutions de 250 à 1 000 m. Les données Landsat fournissent une couverture moins fréquente mais permettent la cartographie des terres cultivées à la résolution spatiale beaucoup plus fine de 30 m, comme illustré par les classes spécifiques aux cultures de la couche de données des terres cultivées (CDL) du National Agricultural Statistics Service (NASS) du Département américain de l'agriculture (USDA) , les classes plantées / cultivées de l'US Geological Survey (USGS) National Land Cover Dataset (NLCD) et des données d'analyse de la sécurité alimentaire mondiale (GFSAD30).

Des informations détaillées et actualisées sur l'emplacement actuel de l'agriculture irriguée et sur la manière dont sa distribution et sa portée changent dans l'espace et dans le temps peuvent contribuer à résoudre ce problème. Ces informations sont essentielles si nous voulons comprendre pleinement l'impact de l'agriculture sur l'utilisation de l'eau et formuler des politiques de gestion efficaces pour cette ressource limitée.

Il existe différentes applications de la télédétection. Certaines des applications incluent :

Télédétection en foresterie.

Télédétection en intelligence géospatiale.

Télédétection dans la cartographie urbaine

Télédétection en géologie

Télédétection en archéologie

Télédétection dans l'armée

Télédétection en météorologie

Télédétection dans les recherches, et plus encore.

I.1. La télédétection

I.1.1. Généralité

On s'accorde à considérer que la télédétection satellitale a apporté une véritable révolution pour la connaissance et le suivi de la surface du sol et de l'eau. Le volume 1 du *Précis de télédétection* (Bonn et Rochon 1992) a passé en revue les contextes physiques dans lesquels les mesures de luminance sont acquises et les technologies qui lui sont associées. Le volume 2 (Bonn, 1996) a démontré l'exploitation qui en est faite dans les nombreux domaines qui, de près ou de loin, s'occupent des phénomènes naturels ou anthropiques se déroulant à la surface de la Terre.

L'évolution extrêmement rapide qu'ont connus les systèmes d'information géographiques (SIG) au cours de la dernière décennie a encore accentué le recours à l'image pour l'acquisition ou la mise à jour d'informations concernant l'occupation du sol. L'image notamment à très haute résolution, est exploitée en toile de fond pour une mise en contexte d'information généralisées telles que routes, réseau hydrographique, milieux urbains, etc. (Règis & Collet, 2001)

I.1.1.2. Quelques problématiques

Quelle sont les informations contenues dans une image numérique ? Comment et dans quel cas les exploiter ? Quels sont les moyens dont nous disposent pour en extraire de l'information ? Quels rôles l'image est-elle susceptible de jouer dans les moyens en constante évolution consacrées à la gestion du territoire ?

Le traitement numérique d'image est un sous-ensemble du domaine très vaste du traitement des signaux. De surcroit, les traitements qui concernent les images de télédétection représentent à leur tour un sous-ensemble du traitement d'images. La nature des phénomènes étudiés, leur hétérogénéité n'autorisent que l'exploitation d'une portion réduite des nombreuses fonctions développées dans les ensembles supérieurs. (Règis & Collet, 2001)

En termes de processus de traitement de l'information, le traitement d'images se situe à la fois au niveau du « conditionnement » (mise en forme) de données à référence spatiale et à celui de son exploitation intégrée à une base de données géographiques (BDG). (Règis & Collet, 2001)

I.1.2. Définition

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

On peut utiliser :

- L'image analogique obtenue par photographie aérienne
- image verticale
- image oblique
- image panoramique.
- L'image numérique obtenue par les satellites.

I.1.3. Quelles sortes des satellites ?

a. Satellites géostationnaires :

- altitude : 36 000 kms
- orbite : circulaire dans le plan équatorial de la terre.

Ces satellites apparaissent fixes au-dessus d'un même point du globe.

b. Satellites météorologiques « METEOSAT », « NOAA » font partie de cette catégorie ; la terre est observée toujours sous le même angle. La résolution au sol ou pixel d'analyse au sol est de l'ordre de deux kilomètres.

« NOAA » couvre une surface grande comme la moitié de l'Europe.

« METEOSAT » utilise :

- un canal pour les longueurs d'ondes du « visible »
- un canal pour l'infra-rouge, le proche infra-rouge, l'infra-rouge thermique
- un canal pour la vapeur d'eau.

c. Les satellites de basse altitude héliosynchrones : satellites à défilement.

- altitude : de 600 à 1500 km
- inclinaison de 98° par rapport à l'équateur sur une orbite circulaire

Étant donné la non sphéricité de la terre et l'inclinaison par rapport à l'équateur, à chaque passage de l'équateur le satellite survole une région décalée un peu plus vers l'ouest par rapport au précédent passage d'où la nécessité de faire une correction.

Pour ces satellites plan orbital et direction « terre-soleil » ne varient pas : ce sont des satellites héliosynchrones ; selon la période calculée, après un nombre donné de rotations autour de la terre, le satellite survole à la même heure la même latitude.

La résolution au sol ou pixel d'analyse au sol dépend :

- de l'altitude,
- des caractéristiques optiques des télescopes qui sont connectés aux radiomètres (capteurs).

La plupart des images numériques attribuées aux établissements chargés de l'application pédagogique de la télédétection proviennent de NOAA et de SPOT1.

Le CNES en assure la diffusion auprès des établissements pourvus du matériel de traitement des images spatiales. (Guillet, 2005)

Le satellite SPOT : ses caractéristiques

SPOT : Système Probatoire Observation Terre

Le satellite SPOT1 a été lancé et mis sur orbite par la fusée Ariane le 22 février 1986. Quatre années plus tard SPOT2 à son tour est mis sur orbite.

Les caractéristiques de ces satellites sont en rapport avec la mission d'observation de la terre qui nécessite une orbite circulaire (altitude constante) phasée par rapport à la terre afin de retrouver à intervalles de temps réguliers les mêmes conditions d'observation.

Ainsi SPOT repasse exactement au même point et à la même heure tous les 26 jours. La direction terre-soleil forme un angle de $22^\circ 5'$ avec le plan orbital ; cet angle demeure constant en raison de l'héliosynchronisme de la terre et du satellite.

SPOT évolue à une altitude de 832 km.

SPOT est équipé d'un miroir permettant un changement de visée ainsi une même scène peut être observée à partir de plusieurs orbites tous les 2 jours et demi au lieu de tous les 26 jours.

Energie : SPOT dispose de 15 mètres carrés de panneaux solaires assurant un apport énergétique de 1500 watts pendant sa durée de vie ; cette surface est altérée et diminuée (x 0,7) en raison des météorites. (Guillet, 2005)

I.1.4. Processus de la télédétection

L'observation de la Terre par les satellites peut être décomposée en cinq étapes ou processus depuis la source d'énergie qui éclaire la surface terrestre jusqu'à la réception des données par la station satellite au sol. (UVED, 2008)

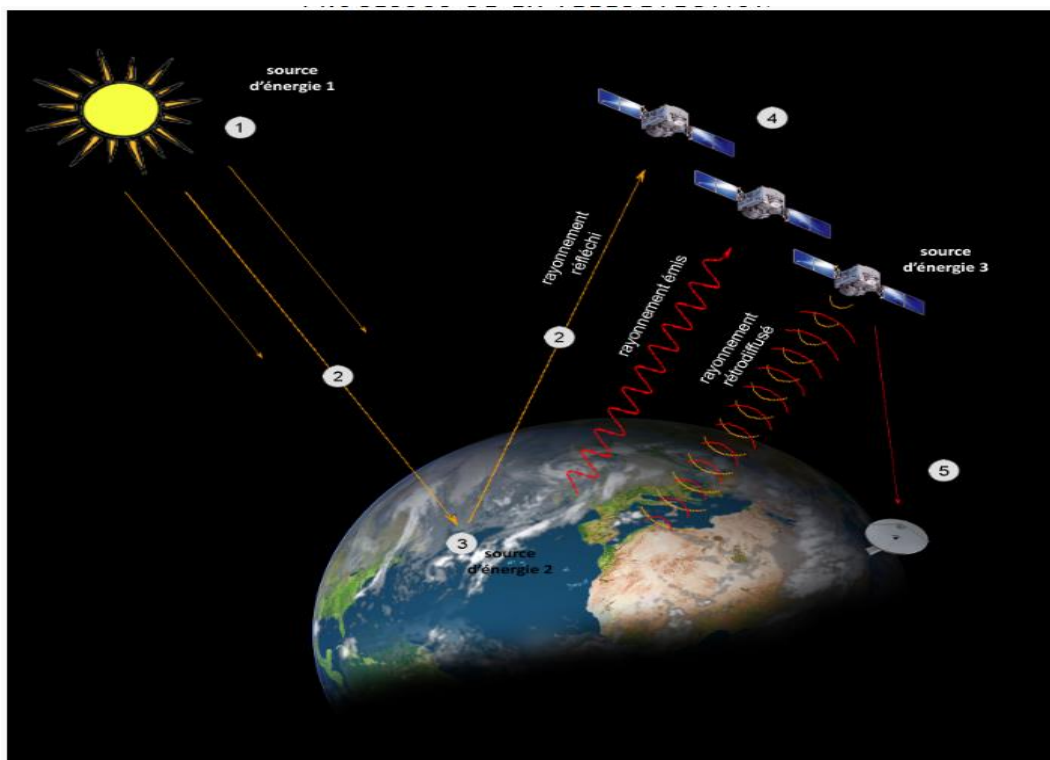


Figure 1 : processus de la télédétection

(UVED, 2008)

4.1. La source d'énergie

À la télédétection Il est y a trois sources d'énergie sont utilisées ; bien que le soleil, la surface terrestre et le capteur satellitaire.

4.2. Les interactions du rayonnement avec l'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.

4.3. Les interactions du rayonnement avec la surface terrestre

Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci. La nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

4.4. L'enregistrement du signal par le capteur satellitaire

Une fois l'énergie diffusé 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.

4.5. La transmission et la réception des données

L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en image (numériques ou photographiques).

I.5. Télédétection et source de rayonnement

I.5.1. Rayonnement électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source qui peut être soit le soleil, soit la surface terrestre ou océanique ou l'atmosphère, ou bien encore le capteur satellitaire lui-même, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. (UVED, 2008)

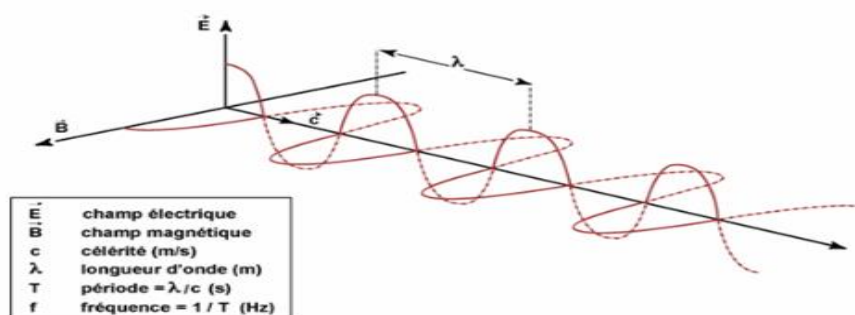


Figure 2 : Nature et propagation d'une onde électromagnétique

(Bonn & Rochon, 1992)

Selon la théorie des ondes tout rayonnement électromagnétique possède des propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible.

Selon (Guillet, 2005) ; la source de rayonnement utilisée on aura :

Sources naturelles	Sources artificielles
De rayonnement	De rayonnement
La terre Les lasers	Le soleil Les radars (On recueille l'écho)
La télédétection est passive	La télédétection est active

Les télédétections satellitaires passive et active utilisent plusieurs domaines du spectre électromagnétique.

I.5.2. Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (figure ci-dessous).

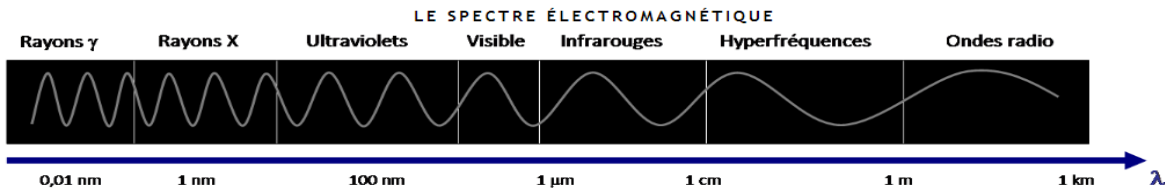


Figure 3 : le spectre électromagnétique

(UVED, 2008)

Tableau 1 : Longueurs d'ondes en nm (nanomètre) un nanomètre = 10⁻⁹ mètre. (Guillet, 2005)

290 nm à 400 nm :	Ultraviolet peu utilisé car ce rayonnement est trop absorbé par l'atmosphère
400 nm à 700 nm :	Le domaine du visible
700 nm à 14000 nm :	L'infra-rouge dont certaines bandes ne sont pas utilisables en raison de l'absorption trop importante par la vapeur d'eau atmosphérique notamment de 5000 à 800 nm.

On utilise cependant dans le domaine de l'infra-rouge :

- de 700 nm à 1500 nm le proche infra-rouge (P.I.)
- de 3000 nm à 5000 nm l'infra-rouge moyen
- de 800 nm à 14000 nm l'infra-rouge thermique et lointain.

Des radiations dont la longueur d'onde est de l'ordre du millimètre voire du centimètre sont utilisées selon le principe du radar. Ces microondes sont peu sensibles à l'humidité de l'air et traversent les nuages. Elles peuvent être utilisées quelque soient les conditions atmosphériques, on recueille un écho. (Guillet, 2005)

I.5.2.1. Signatures spectrales des principales surfaces naturelles

En fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces, le rayonnement incident interagira avec la cible selon l'une ou l'autre des propriétés citées précédemment, ou de manière générale selon une combinaison de ces propriétés.

Chaque surface possède ainsi une signature spectrale - quantité d'énergie émise ou réfléchi en fonction de la longueur d'onde - qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires. La figure ci-dessous présente la signature spectrale des principales surfaces naturelles. (UVED, 2008)

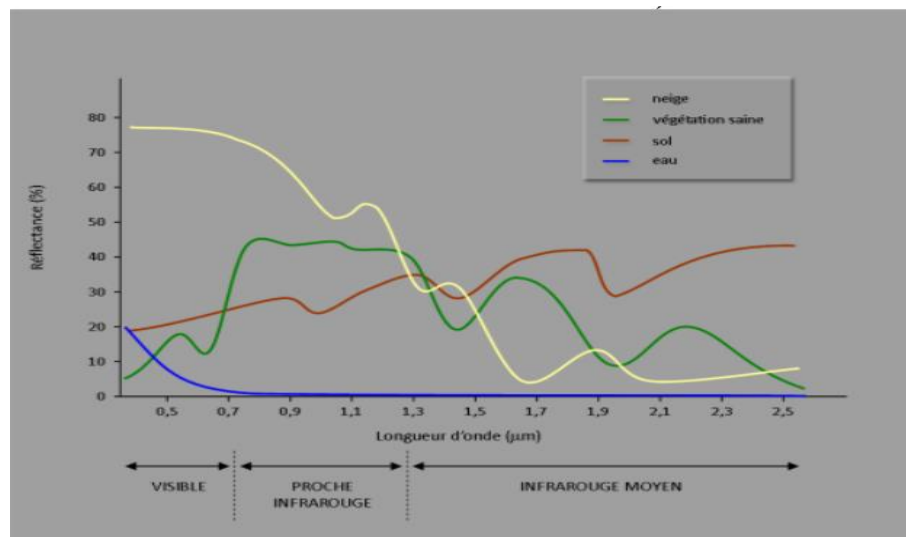


Figure 4 : signatures spectrales des surfaces naturelles dans le domaine du visible du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen

(UVED, 2008)

I.5.2.1.1. Signature spectrale des sols

En ce qui concerne la signature spectrale des sols, on note un accroissement régulier de la réflectance au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Les discontinuités que l'on observe dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont dues aux bandes d'absorption de l'eau. L'étude des propriétés spectrales des sols est toutefois particulièrement complexe car elle doit tenir compte de la nature hétérogène du sol qui contient à la fois des matières minérales et organiques, mais aussi une composante liquide ; tous ces éléments vont influencer la réflexion du rayonnement. (UVED, 2008)

I.5.2.1.2. Signature spectrale de l'eau

L'eau à une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde, elle absorbe cependant un peu moins les ondes les plus courtes, d'où sa couleur bleue. Sa signature spectrale dépend à la fois des molécules qui la constituent, mais aussi des éléments dissous ou en suspension dans la colonne d'eau, comme les organismes phytoplanctoniques, les sédiments ou les substances jaunes lorsque la couche de surface contient de fortes concentrations en phytoplancton, on observe une augmentation de la réflectance dans les longueurs d'onde du vert et l'eau nous paraît par conséquent plus verte (figure 5). Plus l'eau est turbide, plus elle contient de matériaux sédimentaires, plus sa réflectance augmente dans toutes les longueurs d'onde et notamment pour les ondes les plus longues - rouge (figure 6). (UVED, 2008)

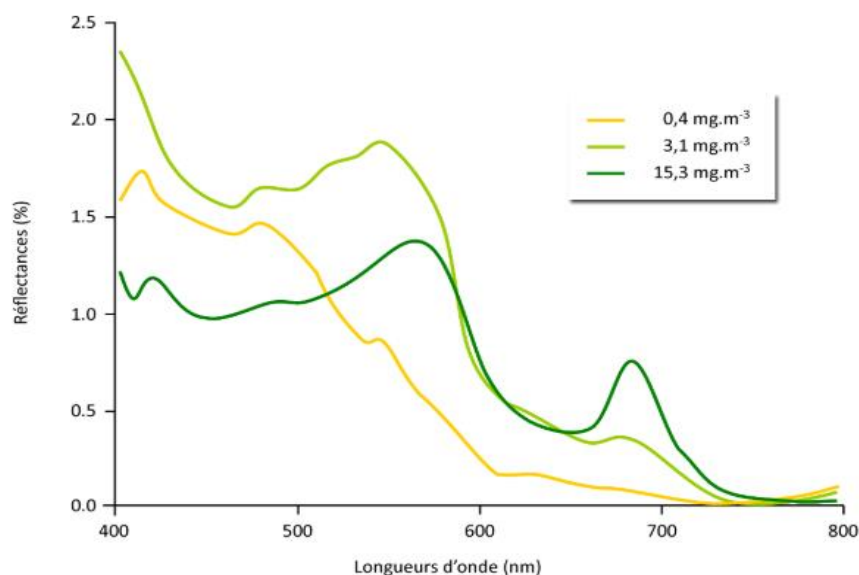


Figure 5 : réflectance de l'eau de mer en fonction de sa teneur en chlorophylle

(Grower, Borstadt, Gray, & Edel, 1988)

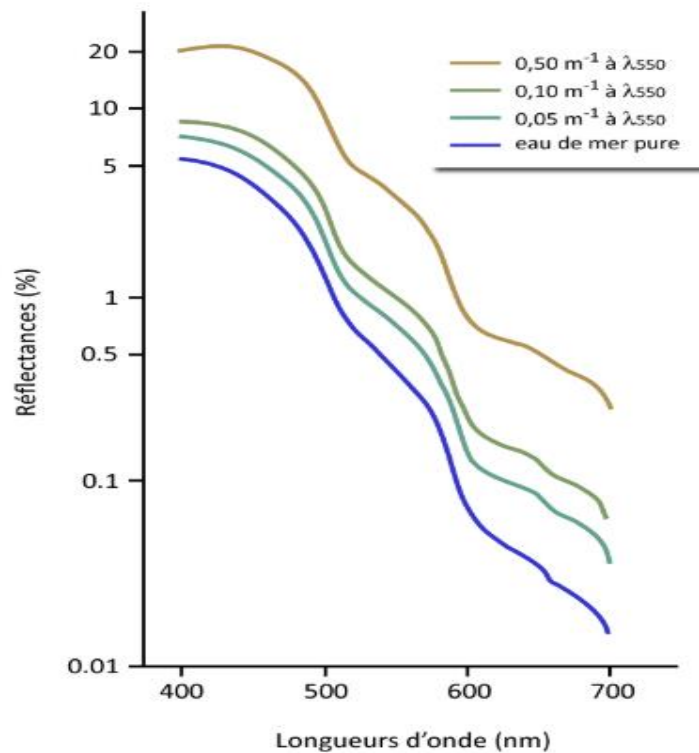


Figure 6 : réflectance de l'eau de mer pour diverses valeurs du coefficient d'atténuation

(Thomas, 1978)

Le coefficient d'atténuation de l'eau mesure la perte d'énergie du rayonnement (ici à 550 nm) traversant la colonne d'eau. Il permet d'apprécier la transparence de l'eau liée à la présence de particules en suspension, qui gênent la transmission de la lumière.

I.5.2.1.3. Signature spectrale de végétation

Les propriétés optiques des feuilles

Les propriétés optiques des feuilles sont liées à leurs caractéristiques biochimiques (teneur en pigments, structure cellulaire, teneur en eau, état physiologique, *etc.*). On distingue trois types d'éléments qui interviennent dans les propriétés optiques des feuilles et qui correspondent aux grands domaines spectraux du visible, du proche infrarouge et de l'infrarouge moyen.

- La teneur en pigments
- L'anatomie des feuilles, leur structure cellulaire
- La teneur en eau

Ces trois éléments varient au cours du temps et entraînent par conséquent des changements dans la structure et les caractéristiques des couverts végétaux. Plutôt que de parler de signature spectrale, on va parler de comportement spectral de la végétation.

I.5.2.2.1. Les pigments foliaires

Tous les végétaux renferment des pigments : chlorophylles (pigments verts), carotènes (pigment orangés) et anthocyanes (pigments bleus rouges), les pigments chlorophylliens étant de loin les plus abondants. La chlorophylle possède deux bandes d'absorption dans le bleu (450 nm) et dans le rouge (660 nm). La présence des pigments foliaires dans les végétaux est donc responsable de la forte absorption du rayonnement visible, avec un maximum relatif de réflectance autour du vert (550 nm).

I.5.2.2.2. La structure cellulaire des feuilles

La structure anatomique des feuilles joue un rôle très important dans la signature spectrale de la végétation. Si les pigments chlorophylliens absorbent la majeure partie du rayonnement visible qui leur parvient, ils sont en revanche totalement transparents au rayonnement de plus grande longueur d'onde. Le proche infrarouge traverse donc la feuille jusqu'à une couche cellulaire formée de cellules irrégulières et d'espaces intercellulaires dans lesquels sont stockés les gaz échangés entre la feuille et l'atmosphère, le parenchyme lacuneux ou mésophylle. C'est au niveau de cette couche, lieu d'échange entre l'oxygène et le dioxyde de carbone dans les processus de la photosynthèse et de la respiration, que le rayonnement proche infrarouge est fortement réfléchi (figure ci-dessous). Il est d'autant mieux réfléchi que le parenchyme lacuneux est bien développé.

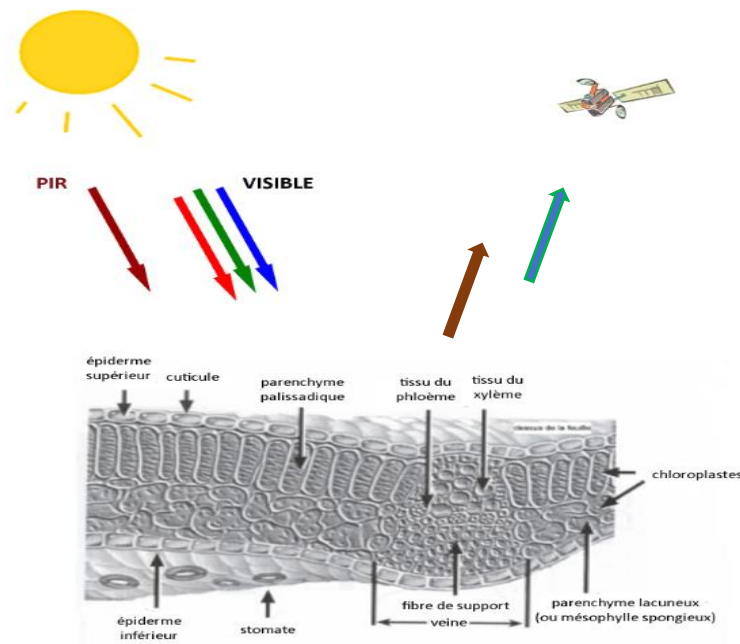


Figure 7 : influence de la structure cellulaire des feuilles sur leur signature spectrale

(Jenson, 2000)

Les longueurs d'onde bleue et rouge sont absorbées par la chlorophylle. Les vertes sont très faiblement réfléchies par la feuille. Le rayonnement PIR, lui, est fortement réfléchi par le parenchyme lacuneux. (Jenson, 2000)

La réflectance dans les bandes rouge et proche infrarouge est donc directement liée à la biomasse végétale. Il est donc possible de déterminer radiométriquement cette biomasse en utilisant l'information contenue dans ces deux bandes spectrales, en utilisant des indices de végétation.

I.5.2.2.3. L'influence de la teneur en eau

La teneur en eau des feuilles est également un facteur qui va fortement influencer la signature spectrale de la végétation, dans les longueurs d'onde de l'infrarouge moyen. Plus la teneur en eau est forte, plus la réflectance de la végétation diminue, en particulier aux longueurs d'onde 1450 nm et 1900 nm qui correspondent aux bandes d'absorption de l'eau. Ce domaine de longueur d'onde est très utile en télédétection des couverts végétaux, il permet notamment de détecter les plantes en état de stress hydrique.

La figure ci-dessous précise les facteurs prépondérants dans la signature spectrale d'un végétal sain, pour des longueurs d'onde allant du visible à l'infrarouge moyen.

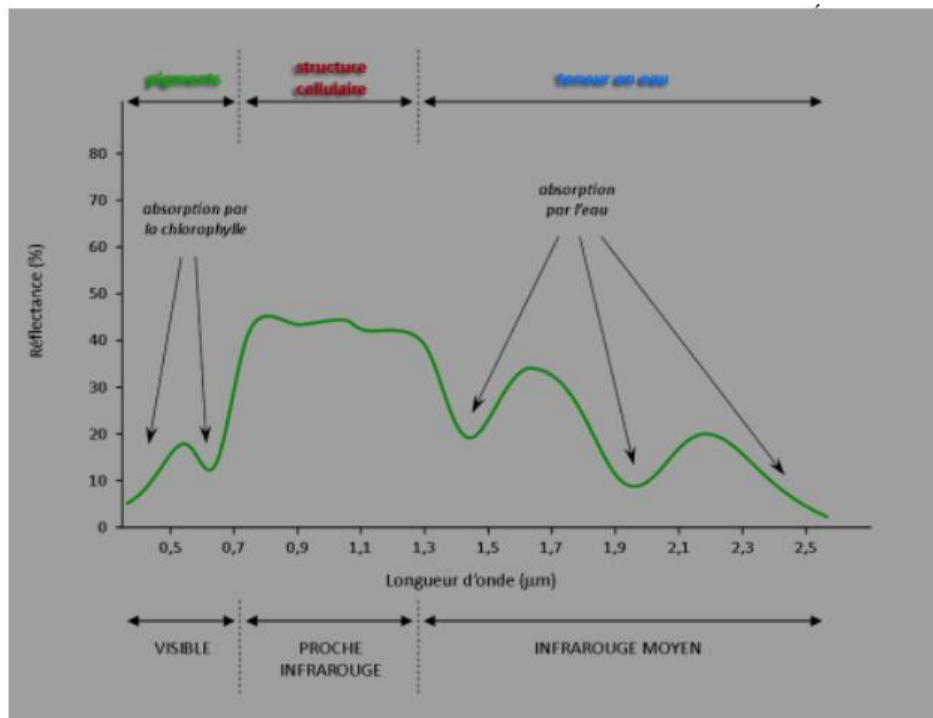


Figure 8 : principaux facteurs influençant la signature spectrale de la végétation dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge moyen

(UVED, 2008)

I.5.3. Type des capteurs

- Les capteurs photographiques : les données sont instantanées et immédiatement utilisables, ce sont les images analogiques.
- Les capteurs de type radiomètre à acquisition séquentielle construisant l'image à partir de mesure de pixel élémentaire d'analyse au sol. C'est le cas de SPOT équipé de capteurs H.V.R. (Haute, Visible, Résolution). (Guillet, 2005)

I.6. Domaines d'application de la télédétection

La télédétection pratiquement aidé l'homme pour l'utiliser à faire des inventaires tels que la cartographie de l'occupation du sol, etc..., ou bien pour la modélisation/simulation la déforestation, changement de climats, etc...

Parmi les domaines d'application de la télédétection on peut citer ce qui suit dans le tableau suivant :

Tableau 2 : les domaines d'application de la télédétection UNIGE (2004), Peduzzi (2009)

Domaines	Exemple d'application
Géosciences	Géologie, pédologie, géomorphologie...
Météorologie	Vitesse des vents, précipitations, températures, détection des cyclones, orages...
Océanographique	Couleur de l'eau, turbidité, hauteur des vagues, courant marine phytoplancton, pollution marine...
Foresterie	Couverture forestière, santé des forêts, impacts après ouragans...
Cadastre / urbanisme	Couverture du sol, urbanisation, contrôle des autorisations (piscines, zones bâties.)
Agriculture	Identification des plantations, évaluation de la production...
Environnement	Etudes d'impact, détection des changements...
Biologie / écologie	Types de végétaux, étude du corail, cartographie des habitats...
Télécommunication	Carte de répartition des antennes de téléphonie mobile...
Hydrologie	Comportements de l'eau à la surface du sol et dans le sol, cycle de l'eau...
Archéologie	Cartographie des sites archéologiques
Santé	Prévision des épidémies, relation avec les changements globaux.
Humanitaire	Pré-alerte de famines : réfugiés (camps)...
Catastrophes environnementales	Feux de forêts, éruptions volcanique, sécheresses, marées moires...
Changements globaux	Désertification, variation climatiques, compositions de l'atmosphère...

A l'initiative de nombreuses agences spatiales (notamment européenne comme l'ESA, japonaise, russe, nord-américaine, etc.), on a assisté à l'émergence de missions spatiales majeures pour l'observation de planète, parmi lesquelles on peut citer :

- SENTINEL, dans le cadre du programme Copernicus (appelé anciennement GMES pour *Global Monitoring for Environment and Security*), qui intervient dans de nombreux

domaines, dont la surveillance des terres et du milieu marin, la gestion des urgences (catastrophe naturelle par exemple), et le suivi du changement climatiques (imageries radar et optique) ;

- LANDSAT ;
- ALOS, de l'agence spatiale japonaise, en particulier pour le suivi de la déforestation ;
- SMOS et SMAP, en particulier pour la cartographie globale de l'humidité du sol ; Etc.

Cette expansion programmatique, même si la télédétection reste un domaine qui nécessite des connaissances pointues pour une meilleure analyse et interprétation des données, s'est indubitablement accompagnée d'un remarquable développement de l'utilisation de l'observation de l'utilisation de l'observation spatiale de la terre par un nombre croissant de laboratoires de nations développées ou émergentes. Une expansion également accompagnées par de nouvelles disciplines et thématiques, au rang desquelles on peut citer de très nombreuses composantes des sciences humaines et sociales, qui enrichissent et prolongent les fondements essentiellement physiques de la télédétection. (Zribi & Nicolas)

Chapitre II

Cartographie de l'occupation du sol à partir des images Sentinel 2

II.1. Introduction

Il existe aujourd'hui plusieurs moyens de décrire la surface terrestre grâce aux avancées sans précédent réalisées en matière de technologies d'information et d'observation, depuis l'apparition des UAV jusqu'à la création de satellites d'observation de la Terre. La télédétection par satellite constitue une source indiscutable d'informations sur les terres pour un large éventail d'utilisateurs à toutes les échelles géographiques. Toutefois, l'écart se creuse entre les producteurs de données de télédétection et les utilisateurs des cartes, un phénomène accentué par le fait que les infrastructures de données spatiales génèrent un important volume d'informations géographiques largement accessibles. Il est donc important de comprendre les divers concepts et contraintes qui régissent la cartographie de la couverture du sol dans le contexte des statistiques agricoles, d'autant plus que les cartes de couverture du sol sont souvent utilisées dans le cadre des enquêtes agricoles pour appuyer la stratification au niveau du plan d'échantillonnage. De simples cartes des terres cultivées ou des cartes plus précises illustrant l'intensité de culture peuvent en effet réduire considérablement la variance d'échantillonnage ou le fardeau lié au dispositif des opérations de terrain ainsi que leur coût.

Les cartes de couverture du sol peuvent mettre en évidence les strates non agricoles qui ne doivent pas faire l'objet d'un échantillonnage ou les strates qui pourraient être échantillonnées différemment. Comme le montre Delincé(2015)¹, si un tiers de la zone administrative étudiée correspond à une strate non agricole, la réaffectation de l'ensemble de l'échantillon aux strates restantes (terres cultivées, notamment) permettra d'atteindre une efficacité relative de la stratification équivalant à 1,51 pour un coût quasi nul². L'efficacité de la stratification dépend clairement de la pertinence de la carte (de couverture du sol) retenue pour la stratification. (Manuel sur l'application de la télédétection aux statistiques agricoles)

II.2. Système Sentinel-2 pour le suivi de l'agriculture

Le projet Sentinel-2 pour le suivi de l'agriculture (Sen2-Agri) de l'ESA, piloté par l'Université catholique de Louvain, entend répondre aux besoins définis par d'importantes parties prenantes internationales et soutenus par l'ESA en matière d'informations (Bontemps et al., 2016). Il a mis au point et diffusé un logiciel libre de traitement permettant de télécharger automatiquement l'ensemble des images Sentinel-2 et Landsat-8 enregistrées durant la saison de végétation et d'obtenir quasiment en temps réel quatre produits cartographiques nationaux d'une résolution de 10 m : i) synthèses mensuelles sans nuages des valeurs de réflectance de surface dans les dix bandes de Sentinel-2, d'une résolution de 10 ou 20 m selon la bande ; ii) masques mensuels des cultures d'une résolution de 10 m, fournis au cours de la saison agricole

afin de cartographier les cultures annuelles ; iii) cartes des types de cultures et indicateur précoces pour cinq grands types de cultures, fournis à la mi-saison et en fin de saison ;iv) état de végétation indiquant la croissance des cultures, fourni tous les sept jours sous réserve d'observations sans nuages. L'état de végétation se compose d'un ensemble de cartes d'indicateurs où figurent l'indice différentiel normalisé de végétation, la surface foliaire et les mesures de phénologie issues des profils temporels du NDVI.

Le système Sen2-Agri a fait l'objet de démonstrations nationales couronnées de succès en Afrique du Sud, au Mali et en Ukraine, ainsi que dans plus de neuf autres sites à travers le monde. Son fonctionnement nominal implique que les satellites Sentinel-2 A et B soient tous deux en orbite, de même que le satellite Landsat-8, afin d'améliorer la fréquence d'observation. Bien qu'il soit possible de produire un masque des cultures sans données in situ, la capacité à collecter rapidement des données in situ dont la qualité a été contrôlée s'est avérée essentielle à la réalisation de cartes des types de cultures au cours de la saison de végétation. Système de production opérationnel lancé en juin 2017 auprès du grand public, Sen2-Agri a vocation à devenir une source essentielle de produits de télédétection destinés à diverses applications en matière de surveillance en milieu agricole, mais également à une stratification précise du plan d'échantillonnage et à la compilation de statistiques sur les cultures précoces (Defourny et al., 2016). La particularité de ce système de production réside dans son fonctionnement quasiment en temps réel et dans ses outils automatisés permettant le traitement évolutif de séries temporelles d'images télédétectées tout au long de la saison, d'une résolution de 10m et couvrant intégralement certains territoires nationaux. (Manuel sur l'application de la télédétection aux statistiques agricoles)

II.3. Les images Sentinel -2

Sentinel-2 est une constellation de deux satellites multispectraux (Sentinel-2A et Sentinel-2B) à haute résolution spatiale et haute répétitivité temporelle (revisite de 10 jours chacun, 5 jours en combinant les deux satellites à partir de fin 2017). Elle est développée par l'agence spatiale européenne (ESA) dans le cadre du programme de surveillance de la terre Copernicus financé par l'Union européenne DRU 12. Sentinel-2 acquiert dans 13 bandes spectrales avec des résolutions spatiales de 10 m à 60 m (selon la bande considérée) permettant ainsi de nombreuses applications pour les surfaces continentales (en particulier, la caractérisation des surfaces végétales). (Nicolas, Clément, & Mehrez)

II.4. Propriétés des images satellitaires

Les possibilités d'application des images obtenues par télédétection sont surtout déterminées par les spécifications techniques des capteurs et par l'orbite des satellites.

4.1. Résolution spatiale

Etant l'indication de la taille du pixel de l'image de télédétection, et la séparation entre les objets qui peuvent être résolus par le capteur. La taille des pixels varie en fonction des caractéristiques techniques des capteurs :

- Haute résolution spatiale : 0.5 – 4 m
- Moyenne résolution spatiale 4 – 30 m
- Faible résolution spatiale 30 – 100 m

4.2. La résolution spectrale

Indiquent le nombre de bandes spectrales dans lesquelles le capteur peut capturer radiations. Le nombre de bandes n'est le seul aspect important de la résolution spectrale, la position des bandes dans le spectre électromagnétique est un aspect clé.

4.3. Résolution radiométrique

C'est la sensibilité d'un détecteur aux variations de l'intensité de l'énergie électromagnétique émise, réfléchi ou diffusée qui est détectée, déterminée par les différents niveaux d'intensité qui peuvent être discriminés par le capteur dans une bande.

4.4. Résolution temporelle

Elle précise la fréquence de revisite du satellite pour un emplacement spécifique (en fonction de l'altitude et de la largeur de fauchée).

- Haute résolution temporelle < 1 – 3 jours
- Moyenne résolution temporelle 4 – 16 jours
- Faible résolution temporelle > 16 jour hvjkgklrfs

II.5. Nature de l'image

L'image est une représentation spatiale de la réalité. Elle joue, dès l'invention de la photographie, un rôle prépondérant dans tous les domaines s'intéressant à l'étude de la surface terrestre, car elle est l'une des sources importantes de description, de différenciation spatiale des phénomènes survenant à la réalité proche de celle de la vision humaine.

Elle a exercé un rôle majeur dans les développements de la cartographie et a de ce fait fourni un instrument essentiel à la gestion du territoire. L'histoire de la cartographie s'écrit en parallèle avec celle de la photographie aérienne.

L'imagerie aérienne repose encore, dans la majorité des cas, sur la photographie. Pour des raisons évidentes de transmission de données, l'imagerie satellitale ne pouvait se contenter de la prise de vue sur pellicule, elle devait nécessairement passer par un signal électrique. Les premières caméras basées sur la technologie du tube à rayon cathodique, similaire à celles mises au point pour les images télévisées, produisaient un signal analogique qui ensuite était transformé en une photographie. L'exploitation était réalisée par photo-interprétation.

Mis à part l'avantage de la vue synoptique, c'est-à-dire portant sur une grande portion du territoire, ces images ne suscitaient encore aucun développement majeur pour leur traitement. La révolution est venue de la production d'images numériques. Pour la télédétection satellitale, l'histoire commence en 1972, lorsque le premier satellite consacré à l'étude des ressources terrestres, ESR 1 (rebaptisé plus tard Landsat 1), a commencé à fournir des images numériques. Ce type d'image offre les mêmes possibilités d'interprétation qu'auparavant et bien d'avantage. En premier lieu il est devenu possible de modifier avec beaucoup plus de richesse les aspects visuels de l'image en vue de favoriser son interprétation. Ensuite, en puisant dans les ressources algorithmiques de la statistique, il est devenu possible d'extraire des informations à l'aide de l'ordinateur.

L'image numérique a connu des développements dans de très nombreux domaines tels que la médecine, la biologie, la minéralogie et la robotique. Les bases algorithmiques sont sensiblement les mêmes avec bien entendu des spécificités. Parfois seul le rehaussement est important parfois c'est la reconnaissance de forme ou encore l'extraction d'information par segmentation de l'image qui importe. (Règis & Collet, 2001)

Le principe général de la méthode consiste à chercher une correspondance entre les données radiométriques analysées et un modèle descriptif simplifié régional de la végétation (issu des connaissances de terrain), ayant une signification et une cohérence physiologique et agroécologique. Cette contrainte explique pourquoi dans les milieux de montagne à végétation complexe et variée, les meilleurs résultats peuvent être attendus lors de cartographie locales ou régionales de zones présentant une forte homogénéité phytogéographique. (Josette)

II.6. Les méthodes de classification thématique des images satellitaires sur ordinateur

6.1. Les classifications non dirigées

Elles sont basées uniquement sur les données radiométriques utilisées et ne font pas appel à des informations externes. Les valeurs numériques des pixels de (ou des) l'image(s) d'origine sont traitées par algorithmes pour obtenir une image plus contrastée ou classée (regroupement des pixels ayant un comportement radiométrique analogue). Ces traitements sont souvent préliminaires à l'analyse thématique proprement dite ; on peut citer :

- L'analyse en Composantes principales utilisée notamment pour décorrélérer l'information redondante pouvant exister entre certains canaux ; elle permet aussi de condenser en 2 ou 3 canaux l'information contenue dans plus de trois canaux et permettre ainsi l'affichage vidéo des données radiométriques pertinentes pour le thème étudié.
- la classification Ascendante Hiérarchique et la segmentation utilisée pour partitionner l'image en classes de pixels de même comportement radiométrique.

6.2. Les classifications dirigées

Le principe de base consiste à utiliser des informations thématiques externes (cartes préexistantes, investigation sur le terrain, typologies...), pour établir par logiciel l'affectation de chaque pixel de l'image dans une catégorie de végétation prédéterminée. Les étapes principales sont les suivantes :

- identification de zones représentatives des types de végétation recherchés (zones test t).
- recherche du meilleur algorithme de classification de ces zones test et validation.
- application de l'algorithme retenu aux pixels de tout la zone à cartographier.
- validation de la cartographie finale (à partir de documents et d'investigation de terrain).

II.7. Indices de végétation

En télédétection, les indices font parties des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multispectrales. Ils consistent à convertir les luminances mesurées au niveau du capteur satellitaire en grandeurs ayant une signification dans le domaine de l'environnement.

Les indices de végétation comme tous les autres indices, reposent sur une approche empirique basée sur des données expérimentales. Ils sont très utilisés d'une part pour

identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux (la biomasse, l'indice de surface foliaire ... etc)

II.7.1. Principe

Le calcul des indices s'appuie essentiellement sur les écarts de réflectance constatés dans les différentes bandes spectrales, ainsi que sur la variabilité des réflectances au sein d'une même bande spectrale, qui traduisent des surfaces de nature différente. Par conséquent, on utilise principalement les différences des propriétés optiques de la végétation dans le rouge et le proche infrarouge.

Les réflectances dans le proche infrarouge augmentent avec la présence de la végétation (forte réflexion par le parenchyme lacuneux), tandis que celles dans le rouge diminuent (pic d'absorption de la chlorophylle).

L'indice de végétation par différence normalisé ou indice de tucker (NDVI en anglais) (Rouse et Haas, 1973 ; Tucker ,1979), le plus connu et le plus utilisé. Son expression est la suivante : $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R) \dots\dots$ (Rouse et al., 1974).

La normalisation par la somme des deux bandes permet de réduire les effets d'éclairement global, contrairement à la simple différence qui est très sensible aux variations d'éclairement.

Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et + 1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses. (ABDELBAKI, Septembre 2012)

II.8. Finalité du traitement numérique d'image (TNI)

Le but de traitement d'images satellitaires ou aériennes est d'extraire de celles-ci des informations utiles pour la compréhension et la modélisation de phénomènes se déroulant à la surface terrestre.

En résumé l'homme seul procède par interprétation visuelle. L'ordinateur quant à lui est capable de rechercher dans l'image des informations selon des procédures programmées et des références que l'opérateur lui a fournies de sorte qu'avec la machine l'homme automatise une partie au moins de l'interprétation ou amène l'image à un stade qui facilite cette opération. Sous cet éclairage, le numérique n'est qu'une forme transitoire offrant des facilités puissantes de traitements. Ces derniers sont de fait un formidable laboratoire photographique dans lequel les processus optiques et chimiques sont remplacés par des procédures numériques plus aisément reproductibles. Cependant tôt ou tard l'information se présentera sous forme analogique à l'écran ou sur support papier. Ceux-ci deviennent alors le support privilégié pour communiquer les résultats définitifs des analyses. Toutes les connaissances expériences acquises en sémiologie graphiques retrouvent à ce stade toute leur pertinence. (Règis & Collet, 2001)

Partie expérimentale

Chapitre III

Présentation de la zone d'étude

Partie expérimentale

III. Présentation de la zone d'étude

III.1. Choix de la commune de Magrane

Le choix de la commune de Magrane pour la réalisation de ce travail a été motivé par le fait que cette commune constitue parmi les espaces agricoles les plus importants de la wilaya d'El Oued.

III.2. Présentation générale du commun de Magrane

III.2.1. Situation géographique

La wilaya d'El Oued est située au Sud-Est de l'Algérie, elle a une superficie de 44 586.80 Km². La longueur de sa frontière avec la Tunisie est de 300 Km environ. Elle est couverte par le grand Erg Oriental sur les 2/3 de son territoire. La wilaya d'El Oued est délimitée :

Au nord, par les wilayas de Tébessa et Khenchela

Au nord et au nord-ouest par la wilaya de Biskra

Au sud et au sud-est par la wilaya de Ouargla

À l'est par la Tunisie.

III.2.2. Conditions climatiques

Pluviométrie

La pluviométrie est un élément les plus significatifs lors de l'examen et de l'étude de l'évolution de climat.

La pluviométrie moyenne varie entre 10 et 14 mm/an (période d'Octobre à février), (série de 10 ans).

Tableau 3 : Moyennes des précipitations (moyennes sur 10 ans)

Mois	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUI	JUI	AOU	SEP	OCT	NOV	DEC
Moyenne annuelle	13,207	6,91	8,913	10,54	1,881	0,686	0	0,737	10,72	2,57	7,366	1,07

TuTiempo.net

La figure illustre la répartition mensuelle des pluies moyennes de la période allant de l'année 2009 à 2019

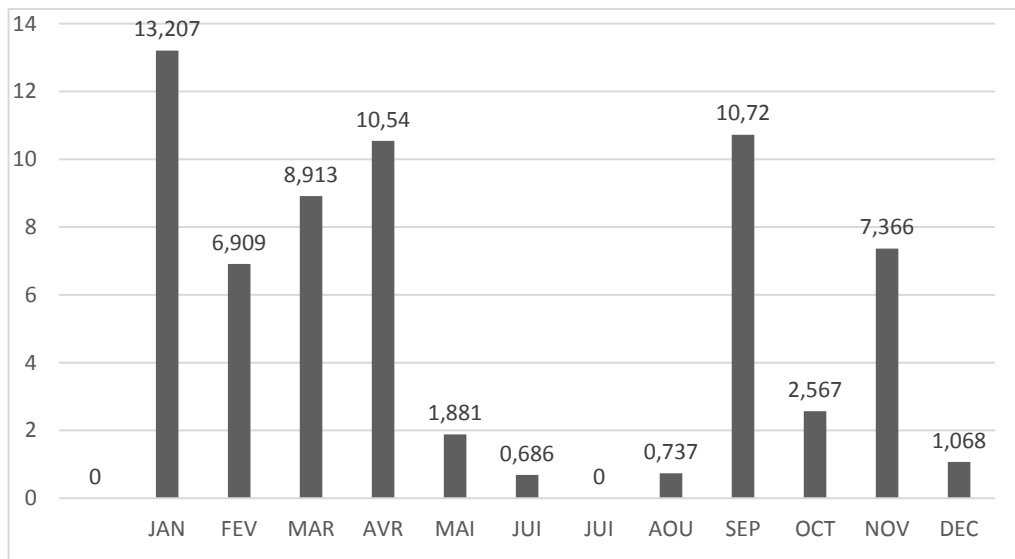


Figure 9 : Répartition mensuelle interannuelle de la pluie moyenne caractéristique de la commune calculée entre 2009-2019

La température

La région d'El Oued se caractérise par un climat aride de type saharien désertique, en hiver la température baisse au-dessous de 0°C alors qu'en été elle atteint 50°C ;

Le Sirocco (vent chaud et sec) peut être observé durant toute l'année. Le Sirocco peu provoqué des dégâts très importants (dessèchement, déshydratation). Les vents de sables envahissent régulièrement les cultures

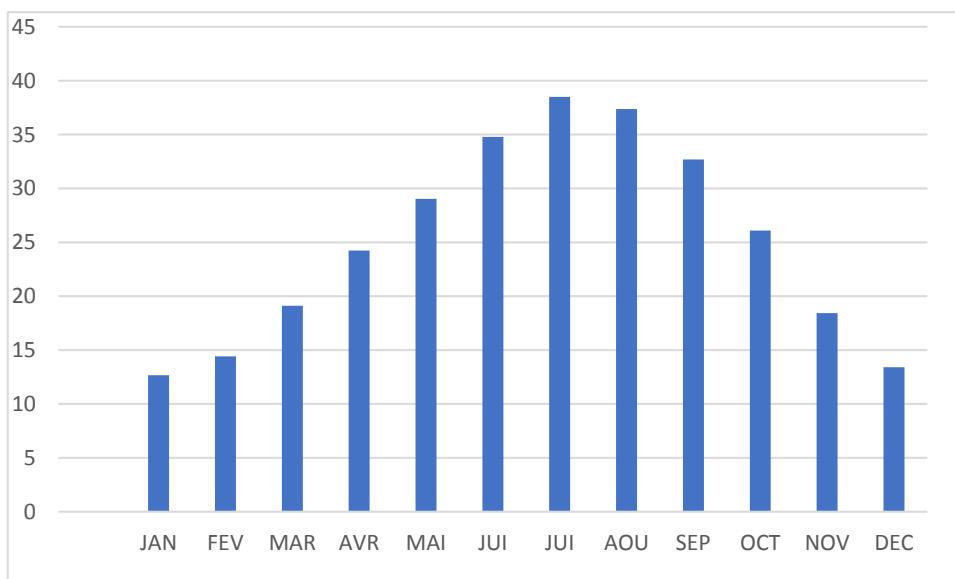


Figure 10 : Répartition mensuelle interannuelle de la température moyenne caractéristique de la commune calculée entre 2009-2019

Chapitre IV

Matériels et méthodes

IV. Matériels et méthodes

IV.1. Matériels

IV.1.1. Collecte et consultation de la documentation

Cette étape constitue une phase importante dans la réalisation de ce travail, elle s'est reposée sur la collecte et la synthèse d'informations provenant de sources différentes

- Livres publiés sur internet
- des thèses de Master
- Sites internet.
- Des cartes numériques des domaines agricoles.

IV.1.2. Logiciel utilisé

D'après Pour réaliser notre travail, nous avons eu recours à trois logiciels qui nous ont permis d'effectuer la suite d'opérations conçues pour avoir les résultats souhaités :

Les logiciels Google Earth, Arc View GIS 3.3 et ENVI 4.2 et 5.3 avec leurs multiples extensions pour la numérisation et le géoréférencement et l'élaboration des cartes thématiques d'occupation du sol ;

a. ArcView

ArcView est un logiciel utile ou SIG de bureau et de la cartographie. Il est un produit de Environmental System Research Institute, Inc. (ESRI). ArcView GIS est un logiciel puissant qui fournit pour la visualisation, l'interrogation, l'exploration et l'analyse des données géographiques. ArcView est un outil SIG puissant qui peut afficher des informations (qui réside localement ou sur un réseau distribué), lire des informations spatiales et tabulaire à partir d'une variété de formats de données, accéder à des bases de données externes, produire des cartes thématiques (utilisez des couleurs et des symboles pour représenter des caractéristiques aussi bien pour représenter les entités en fonction de leurs attributs), effectuer des requêtes spatiales, connectez l'information spatiale aux attributs de base de données, fournir plusieurs outils d'analyse, et permet un degré élevé de personnalisation en utilisant ArcView.

b- Google Earth

Google Earth est un logiciel, propriété de la société Google, Apparues en début d'année

2000, Le support Google Earth à haute résolution spatiale permet principalement la détermination de la position tridimensionnelle (altitude, latitude et longitude) et aussi la reconnaissance visuelle des classes considérées ainsi qu'une visualisation de la Terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires. Anciennement produit par Keyhole inc, alors d'accès payant, ce logiciel permet à tout utilisateur de survoler la Terre et de zoomer sur un lieu de son choix. Selon les régions géographiques, les informations disponibles sont plus ou moins précises.

c- ENVI 5.3

ENVI est un logiciel utilisé par les scientifiques, chercheurs et spécialistes de l'analyse d'images ou des SIG pour traiter et analyser les images géospatiales. Le logiciel ENVI intègre les dernières technologies de traitement et d'analyse d'images, au sein d'une interface intuitive et simple d'utilisation, qui permet d'extraire rapidement des informations pertinentes à partir des images. Le logiciel propose une approche guidée et automatisée qui permet aux utilisateurs de réaliser simplement les tâches complexes.

IV.2. Méthodes

IV.2.1. Délimitation de la commune de Magrane

La délimitation de la commune de Magrane s'est réalisée à l'aide du logiciel géographique « Google Earth » tout en se référant aux cartes topographiques pour accomplir la tâche. Le but de cette étape est seulement la localisation exacte de la commune de Magrane ainsi que la définition de ces contours.

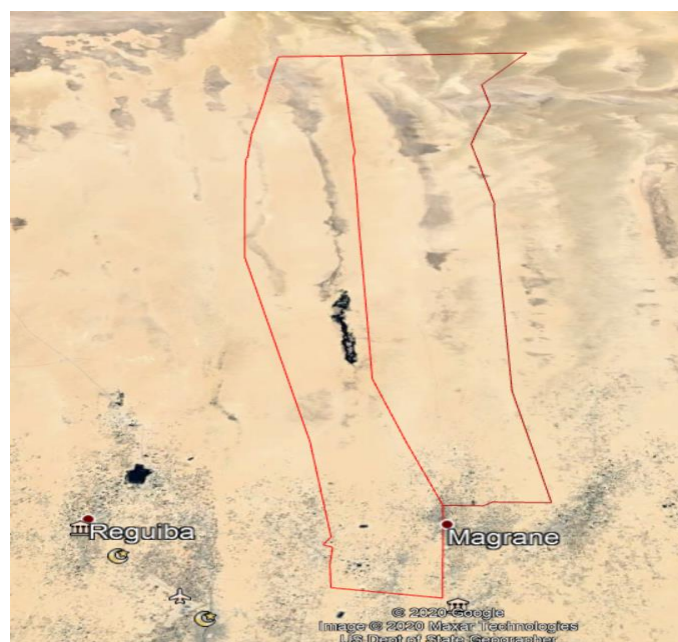


Figure 11 : Exemple de délimitation du commun de Magrane

KHADDAR.H.2020

IV.2.2. Enregistrement des photos satellite « Google Earth »

Notre méthode de travail consiste à enregistrer un ensemble d'images, et à chacune on prend quatre points de coordonnées pour les utiliser au calage.

L'assemblage/calage de ces photos permet une superposition des différentes cartes de la commune.

NB : Les images de Google Earth fournissent les coordonnées géographiques, Il suffit d'utiliser l'outil ajouter un repère pour avoir les coordonnées exactes de n'importe quel point. (Google Earth.com)

IV.2.3. Digitalisation de la commune avec ArcView 3.3

Une fois les cartes cadastrales géoréférencées, la digitalisation des limites des exploitations et des autres objets occupant le sol sur cette commune a été réalisée à l'aide du logiciel « ArcView 3.3 ». Plusieurs couches thématiques ont été produites (palmeraies et serres ...).

A partir du logiciel « google earth », la digitalisation des palmerais et les serres qui nous permettra de les supprimer de notre masque construire car ses des superficies qui reste de couleur vert tout l'année.

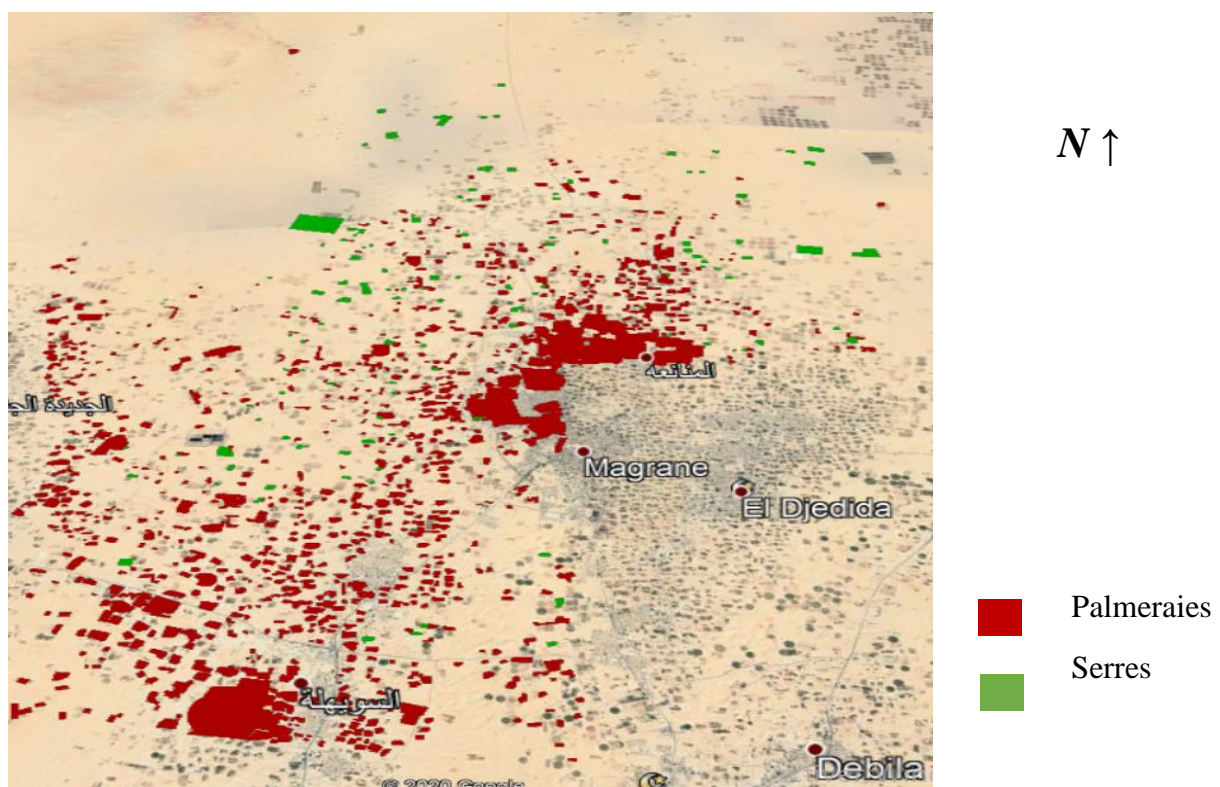


Figure 12 : Exemple de digitalisation des palmerais et les serres

KHADDAR.H.2020

IV.2.4. Mosaïque des images satellitaires

Cette étape permet de grouper deux images de mêmes dates pour y avoir notre masque de zone d'études.

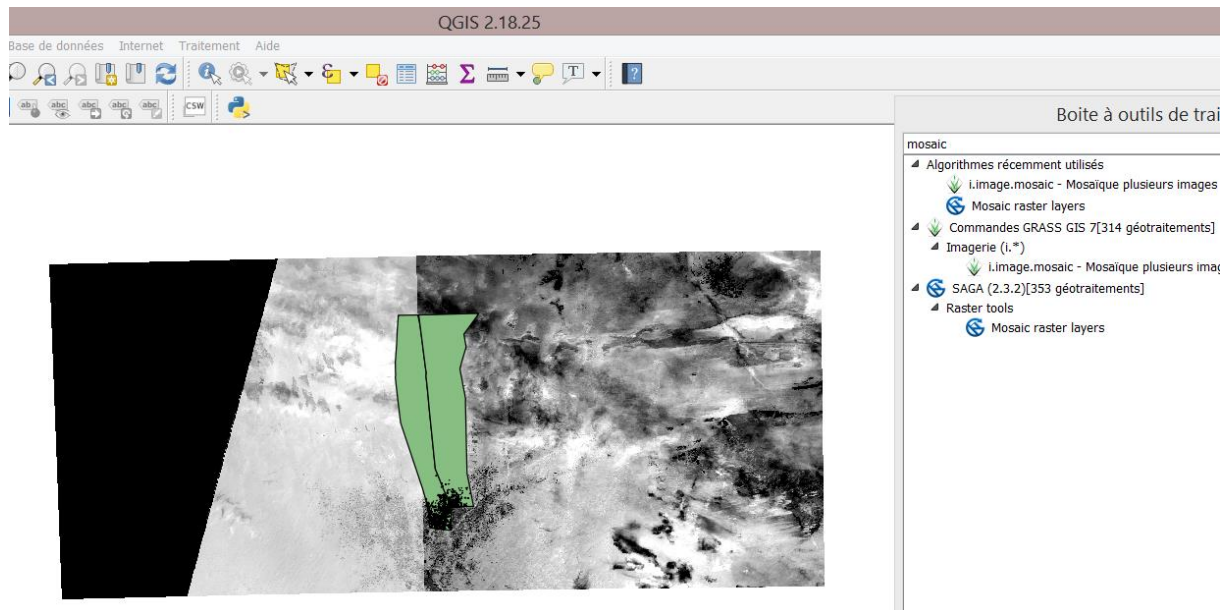


Figure 13 : Exemple de mosaïque deux images satellitaires

KHADDAR.H.2020

IV.2.5. Définition du masque

Le masque est une sorte de grille métallique qui a pour but de jouer le rôle de filtre en évitant ainsi la création de points parasites.

I.V.2.6. Interprétation visuelle

L'interprétation et l'identification des cibles en télédétection sont souvent faites de façon visuelle, c'est-à-dire par un interprète humain. Dans plusieurs cas, l'imagerie est présentée dans un format photographique, indépendamment du type de capteurs et de la manière dont les données sont acquises. Dans ce cas, nous dirons que les données sont en format analogique. Les images de télédétection peuvent être représentées au moyen d'un ordinateur par une matrice de pixels, où chaque pixel correspondant à un nombre, représentant le niveau d'intensité du pixel. Dans ce cas, les données sont en format numérique.

L'interprétation visuelle peut aussi être faite en examinant l'imagerie numérique sur un écran d'ordinateur. Les imageries analogique et numérique peuvent toutes deux être représentées en noir et blanc (images monochromatiques) ou en composés couleurs, en combinant différents canaux ou bandes représentant différentes longueurs d'onde.

IV.2.7. Construction et l'application du masque

La construction ou *building mask* et l'application du masque qui est *apply Mask* sera effectué par logiciel « ENVI 4.2 »

A partir de logiciel « ENVI 4.2» on fait construire notre masque qui couvre les surfaces de végétation annuelles comme les palmerais (**Figure 14**).

D'après logiciel « ArcView 3.3» on fait ce masque après digitalisation des palmeraies et les serres pour but de faire notre étude sur les images sentinelles 2 (**Figure 15**).

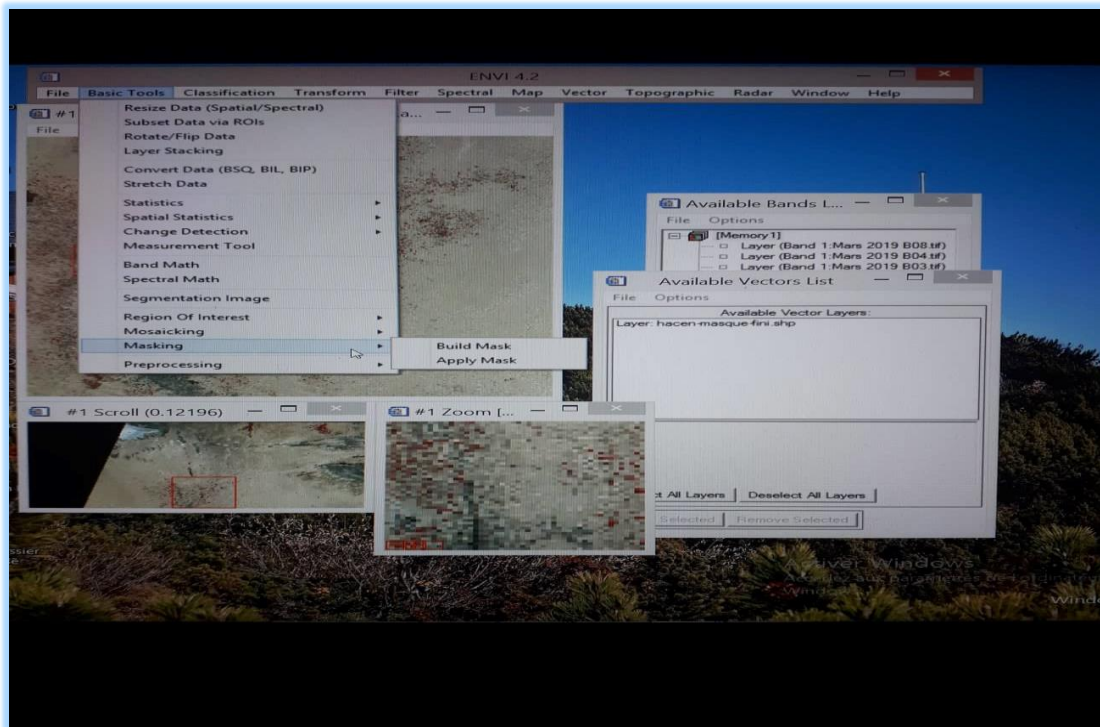


Figure 14 : Exemple de construction du masque

KHADDAR .H .2020

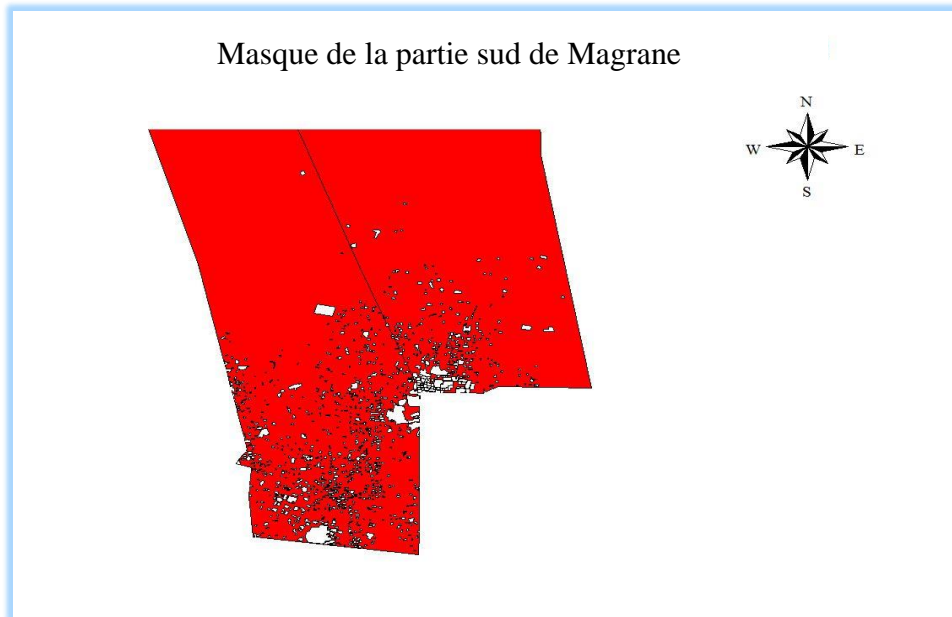


Figure 15 : masque de la partie sud du commun de Magrane
KHADDAR.H.2020

IV.2.8. La composition colorée

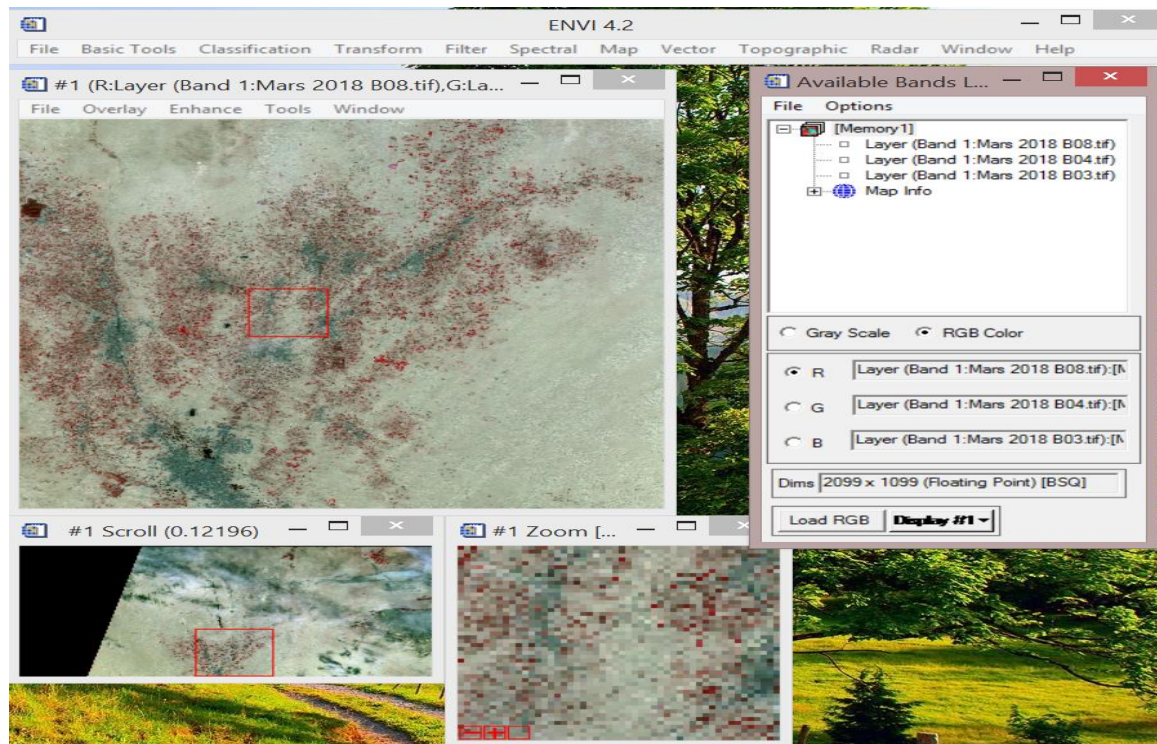


Figure 16 : composition colorée

KHADDAR.H.2020

IV.2.9. NDVI

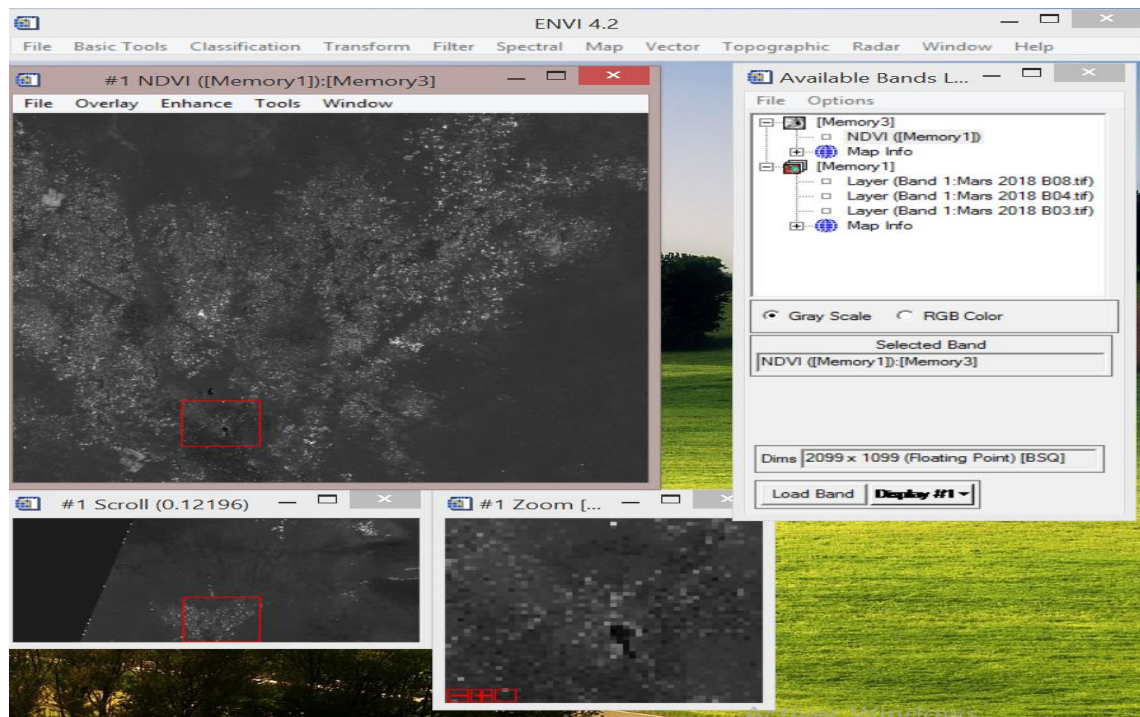


Figure 17 : NDVI

KHADDAR .H .2020

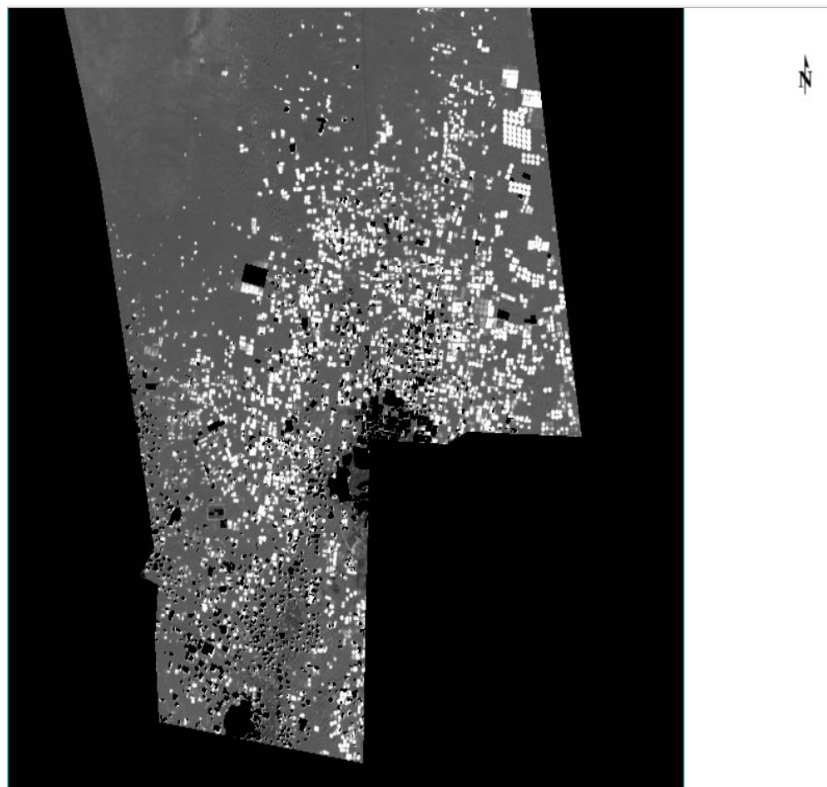


Figure 18 : NDVI masqué

KHADDAR .H .2020



Figure 19 : Segmentation a seuil contrôlé
KHADDAR .H .2020

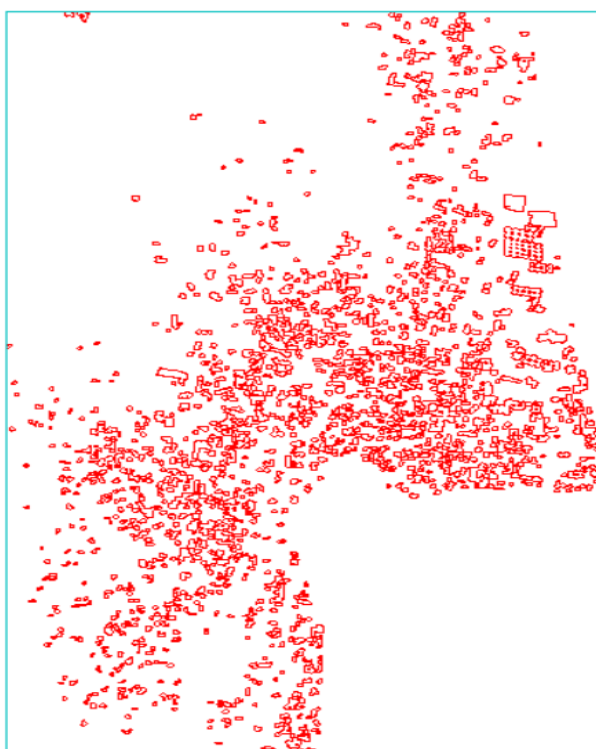


Figure 20 : Shp du commun de Magrane
KHADDAR .H .2020

IV.2.10. Calcul de l'indice d'NDVI des images culturelles

Le calcul de l'indice des images sentinelles fait à partir de logiciel « ENVI 4.2 »

IV.2.11. Extraction des cartes à partir des différents attributs

La réalisation des cartes d'occupation des sols sera effectuée dans le logiciel de l'ArcView 3.3 qui nous permettra de réaliser une meilleure mise en page.

Une fois les étapes sont terminées, les cartes de l'occupation du sol sont ensuite exportées sous la forme « JPEG » pour être utilisable dans un document Word.

Ces deux dernières étapes sera au chapitre suivant qui est intitulé résultats et discussion.

Chapitre V

Résultats et discussion

V. Résultats et discussions

L'objectif de notre travail étant de créer à base du calendrier culturelle du commun de Magrane situé à la wilaya d'El Oued

V.1. Analyse de l'indice d'NDVI des images sentinelles 2

Après calculations des indices d'NDVI avec logiciel ENVI on obtient ses résultats dans le tableau suivant de deux saisons qu'on est traité

Tableau 4 : Les indices d'NDVI des images sentinelles 2

Année	Mois	Résultats obtenus
2018/2019	Mars	0.1 à 0.7
	Juin	0.06 à 1
	Aout	0.1 à 1
	Octobre	0.15 à 1
2017/2018	Mars	0.15 à 0.5
	Mai	0.08 à 0.5
	Septembre	0.1 à 0.5
	Octobre	0.2 à 0.7

Ce tableau représente les différentes valeurs de NDVI sachant que la classification sera être comme suit :

- 0.7 représente une forte absorption dans le proche infrarouge qui signifie une bonne présence de la végétation.
- 0.5 représente une moyenne absorption dans le proche infrarouge qui signifie une moyenne présence de la végétation.
- 0.1 représente une faible absorption dans le proche infrarouge qui signifie une faible présence de la végétation.

V.2. Extraction des cartes à partir des différents attributs

A partir des images satellites nous avons pu faire ressortir les cartes d'occupation du sol ; Cette carte représente les cultures saisonnières de notre zone d'étude ; qui contiennent les cultures suivantes : arachides au mois de Septembre ; pomme de terre et la tomate au mois d'octobre ; l'ail, pomme de terre et les céréales au mois de Mars ; l'ail et l'arachides au mois de Mai.

On remarque que les parcelles travaillent deux fois par saisons ; c'est-à-dire lorsqu'ils récoltent la culture de la première saison ils semis la culture de saison prochaine.

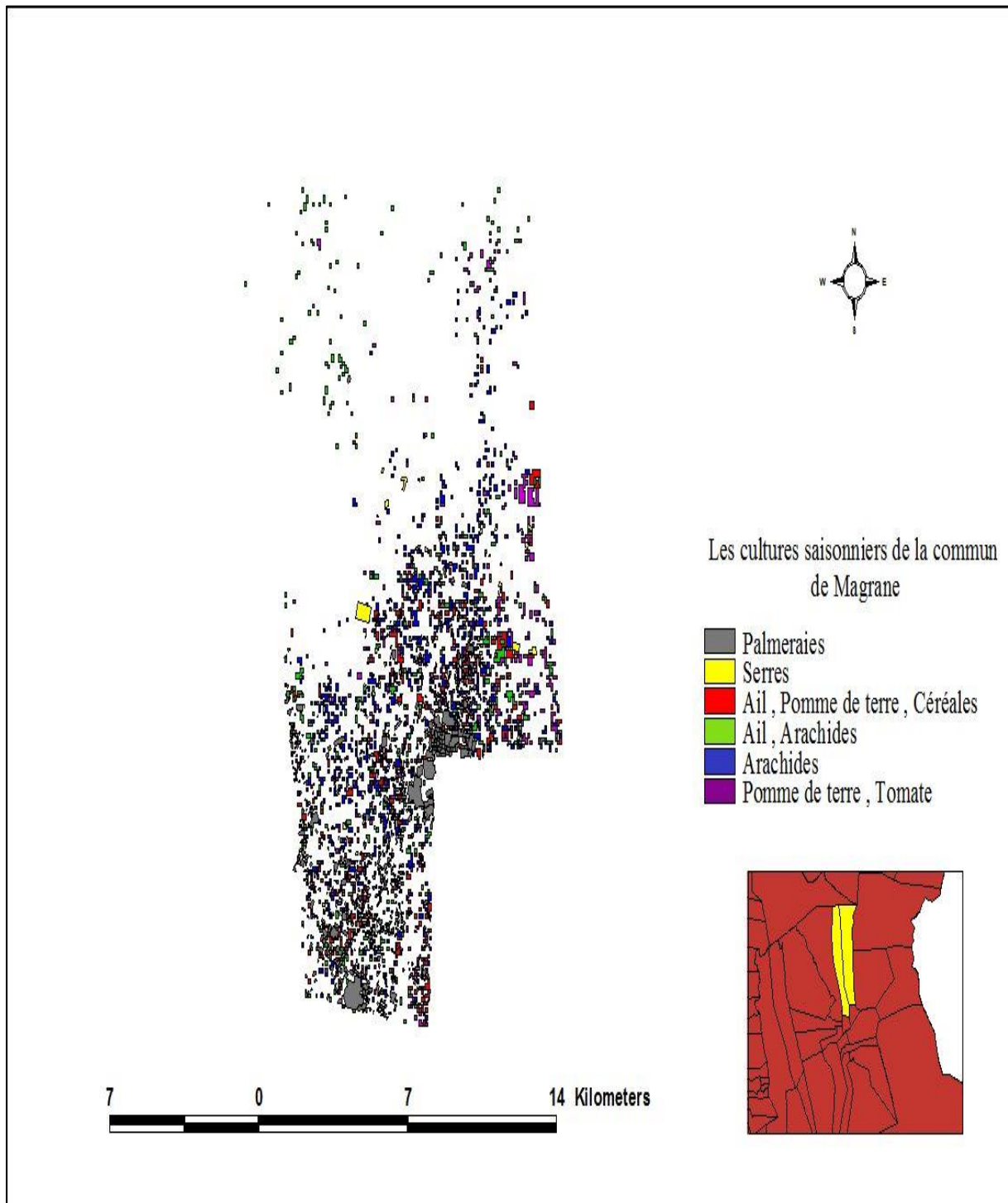


Figure 21 : Carte d'occupation du sol dans le sud du commun de Magrane saison 2018/2019

KHADDAR.H.2020

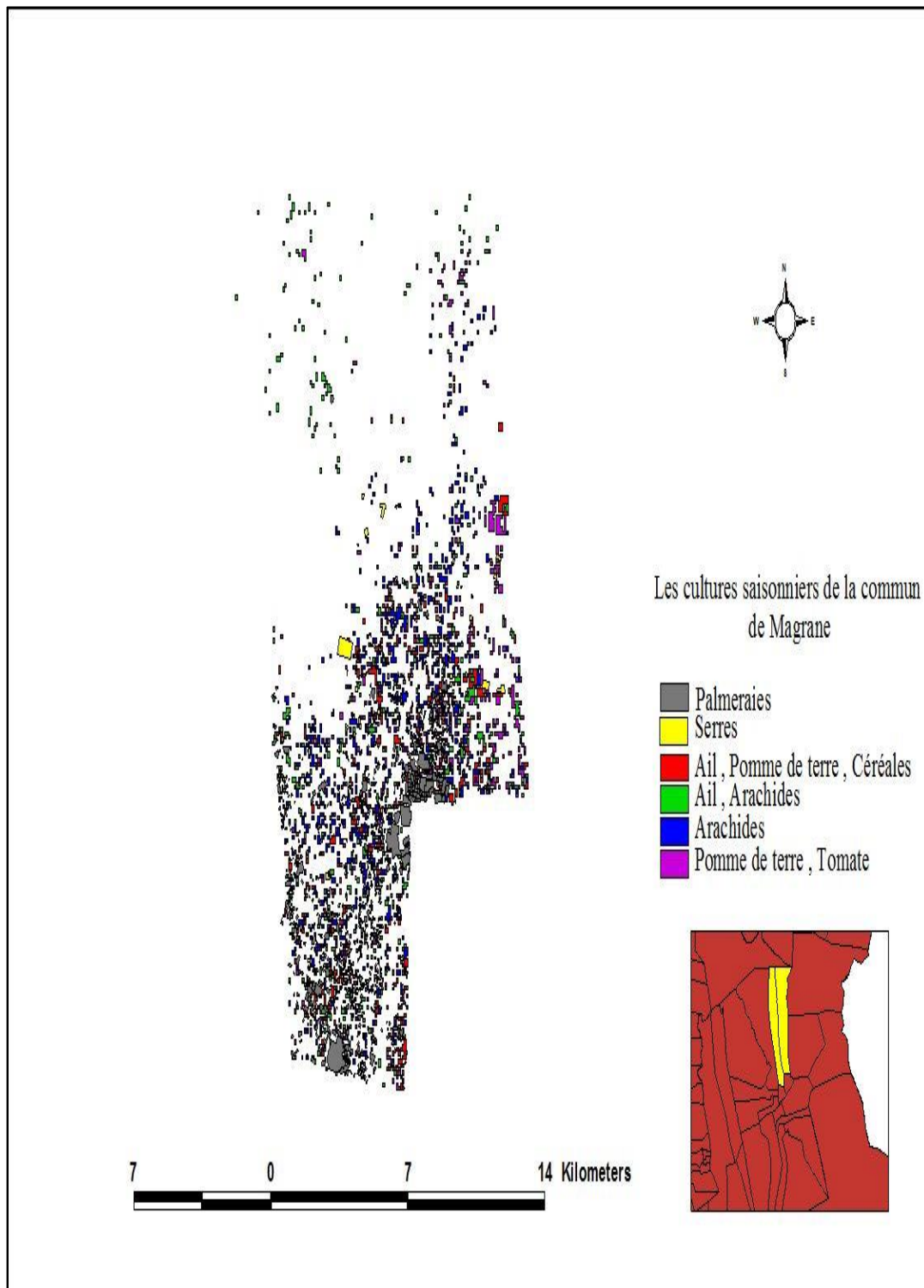


Figure 22 : Carte d'occupation du sol dans le sud du commun de Magrane saison 2017/2018

KHADDAR.H.2020

Ces diagrammes ci-dessus représente les superficies des cultures saisonnières et les palmeraies et les serres de la partie sud de la commune de Magrane ; dont on constate qu'ils ont des superficies acceptables par à port aux superficies générale de la commune ; aussi que l'agriculture se située au sud de la commune.

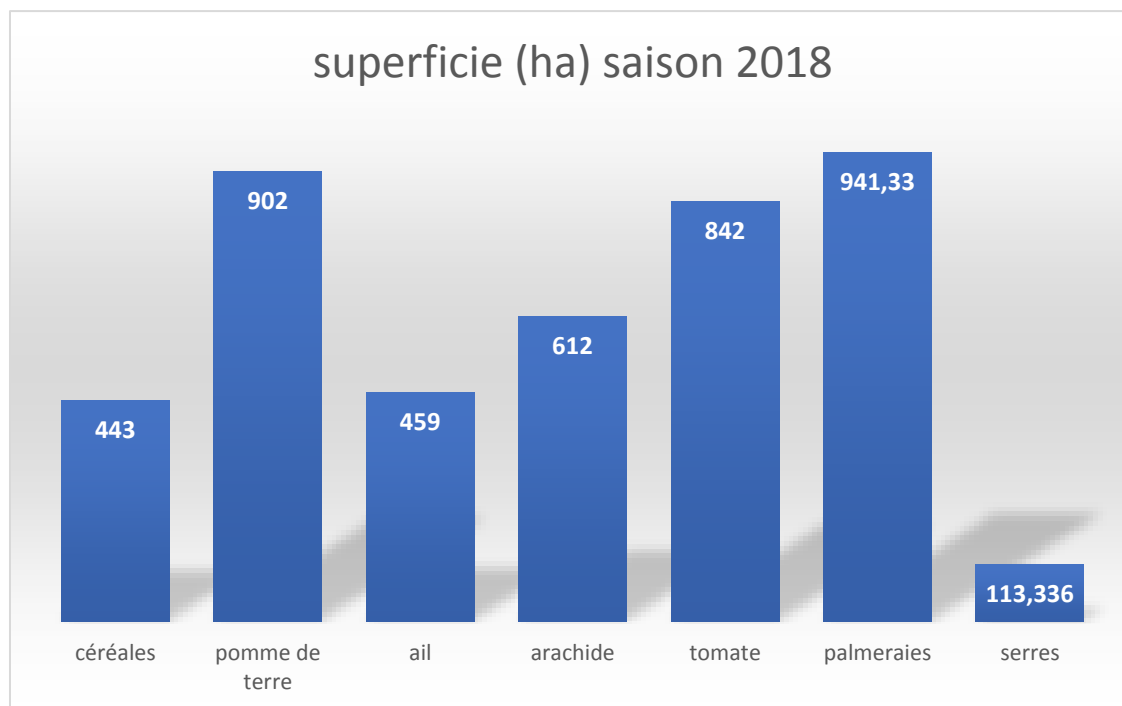


Figure 23 : statistiques agricoles des cultures saisonnières de la commune de Magrane de saison 2017/2018

KHADDAR.H.2020

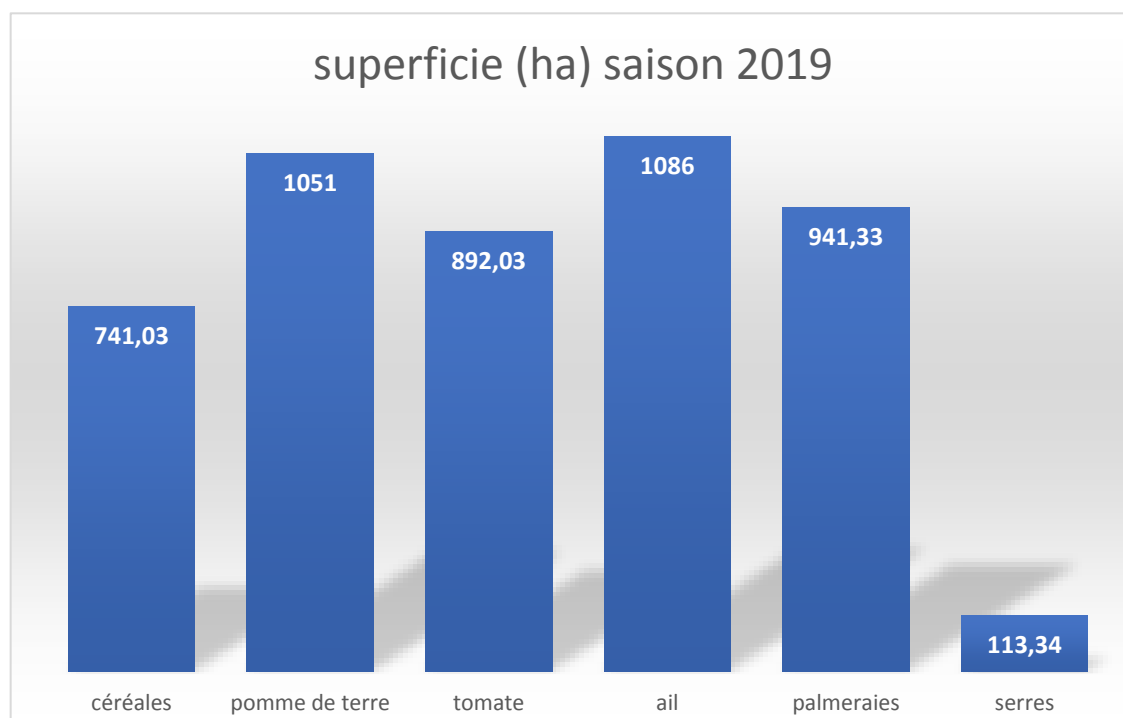


Figure 24 : statistiques agricoles des cultures saisonnières de la commune de Magrane de saison 2018/2019

KHADDAR.H.2020

Les superficies des cultures de l'année 2019 sont élevées par rapport à celles de l'année 2018 alors c'est un bon résultat observé.

Par l'option d'intersection de deux images Mars et Mai on obtient des zones qui contiennent deux ou trois cultures.

Conclusion

Conclusion

En conclusion la télédétection en agriculture est un outil auxiliaire pour les différents stades de développement de cultures.

Le but visé dans cette étude est de créer des cartes d'occupation des sols à partir des images sentinelles 2 à l'aide du calendrier culturale de la commune. Il a été fait pour mettre en évidence les états successifs du couvert végétal pour discriminer son évolution durant les campagnes culturales 2017/2018 et 2018/2019, malgré la situation de covid-19 qui nous a perturbés et ne nous a pas permis d'effectuer les recherches d'une meilleure façon.

Dans le contexte saharien ; la méthode a répondu avec efficacité et simplicité pour l'extraction des statistiques agricoles au sein d'une commune aussi vaste que Magrane:

- Statistiques des plus grandes cultures
- Statistiques des terres qui connaissent 2 ou 3 cultures
- Les serres et palmeraies

Perspectives : Grâce à la forme des surfaces semées, il est possible de faire la distinction entre la tomate et la pomme de terre (cultures stratégiques) ; de plus, le fait que les parcelles de la pomme de terre présentent une forme ronde (Pivot) et celles de la tomate ont une forme rectangulaire (irrigation goutte à goutte).

Références bibliographies

ABDELBAKI, A. (Septembre 2012). Mémoire.

Bonn, F., & Rochon, G. (1992). *Précis de télédétection. Volume 1 : Principes et méthodes. AUPELF-UREF, 1992. coll.* Presses Universitaires du Québec, Montréal.

Centre Canadien de Télédétection. (s.d.). Récupéré sur <http://www.ccrs.nrcan.ca>.

El-Oued : Pôle agricole en tête des wilayas du Sud productrices de primeurs. (2019). *LE MAGHREB.*

Grower, J., Borstadt, G., Gray, L., & Edel, H. (1988). *The fluorescence line imager resolution imaging spectroscopy over water and land. spectral signatures of objects in remote sensing.* France.

Guillet, J. (2005). *La télédétection et ses applications pédagogiques.*

Jenson, J. (2000). Remote sensing of the environment. *an earth resource perspective*, p. 544p.

Josette, B. (s.d.). *montagne, laboratoire de la diversité.*

Manuel sur l'application de la télédétection aux statistiques agricoles. (s.d.).

Nicolas, B., Clément, M., & Mehrez, Z. (s.d.). *QGIS et applications en agriculture et foret.*

Règis, C., & Collet, C. (2001). *Précis de télédétection.*

Shrestha, D. (28 Mai 2020). Application de la télédétection en agriculture.

Thomas. (1978). Récupéré sur <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvcal/envcal/medias/navigation/cours/reference.png>.

UVED. (2008). ENVCAL suivie de l'environnement par télédétection.

Zribi, M., & Nicolas, B. (s.d.). *observation des surfaces continentales par télédétection I: agriculture et foret.*

