

Caractérisation de la dynamique des oasis de Djérid Cherine Ben Khalfallah

▶ To cite this version:

Cherine Ben Khalfallah. Caractérisation de la dynamique des oasis de Djérid. Autre. Université Montpellier; Université de Tunis El Manar, 2019. Français. NNT: 2019MONTG010. tel-02166271

HAL Id: tel-02166271 https://theses.hal.science/tel-02166271

Submitted on 26 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

En Géosciences

École doctorale GAIA

Unité de recherche UMR ESPACE-DEV

En partenariat international avec l'Université de TUNIS EL MANAR, Tunisie

Caractérisation de la dynamique des oasis de Djérid (Tunisie) par télédétection

Présentée par Cherine BEN KHALFALLAH Le 12 mars 2019

Sous la codirection de Frédérique SEYLER et de Fadila DARRAGI

Devant le jury composé de

Vincent CHAPLOT, Directeur de recherche, IRD (France) Luc DESCROIX, Directeur de recherche, IRD (France) Mohamed OUESSAR, Maître de Conférences (HDR), IRA (Tunisie) Zohra LILI CHABAANE, Professeure, INAT (Tunisie) Frédérique SEYLER, Directrice de recherche, IRD (France) Fadila DARRAGI, Professeure, FST (Tunisie) Eric Delaître, Ingénieur de recherche, IRD (France) Dalel Ouerchefani, maître assistante, IRA (Tunisie) Président Rapporteur Rapporteur Examinatrice Directrice de thèse Directrice de thèse Invité Invité



Caractérisation de la dynamique des oasis de Djérid (Tunisie) par télédétection

Cherine Ben Khalfallah

Directrice de thèse : Frédérique SEYLER (IRD, France) Directrice de thèse : Fadila DARRAGI (FST, Tunisie) Co-encadrants : Eric DELAÎTRE (IRD, France) : Dalel OUERCHEFANI (IRA, Tunisie)













LISTE DE PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Publications dans des revues internationales à comités de lecture

Ben Khalfallah, C., Delaitre, E., Ouerchefani, D., Demagistri, L., Khebour-Allouche, F., Darragi, F., Seyler, F. **2018.** Monitoring vegetation dynamics in southern Tunisia using SPOT-5 (TAKE5) data – A case study of the Tozeur oases. *Journal of applied remote sensing.* 12 (4), 046002. [doi: 10.1117/1.JRS.12.046002].

Ben Khalfallah, C., Delaitre, E., Ouerchefani, D., Demagistri, L., Darragi, F., Seyler, F.
2018. Use of remote sensing data for monitoring environmental change in Tunisian Oases.
Canadian Journal of *Remote Sensing*. (Submitted).

Publications dans des actes de colloques

Ben Khalfallah, C., Ouerchefani, D., Mazouzi, K., Delaitre, E., Khebour-Allouche. F., **2017**. Land Cover Change detection in Tunisian Oases through MODIS data (Products: MOD13Q1). *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*. pp 1767-1769. [doi: 10.1007/978-3-319-70548-4_513]

Communications orales

Ben Khalfallah, C., Ouerchefani, D., Delaitre E., Demagistri, L., Khebour-Allouche, F., Darragi, F., Seyler, F. **2018**. Monitoring of the state of coastal oases in Tunisia by MOD13Q1 products (Case of the oasis of Gabes). International Conference on water, Environment, Energy and Society ICWEES'2018, Zarzis, Tunisie : 8 11 Mai 2018.

Ben Khalfallah, C., Ouerchefani, D., Mazouzi, K., Delaitre, E., Khebour-Allouche, F., **2017**. Land Cover Change detection in Tunisian Oases through MODIS data (Products: MOD13Q1). 1er Euro-Mediterranean conference for Environmental Integration (EMCEI), Sousse, Tunisie : 22_25 Novembre 2017.

Ben Khalfallah, C., Delaitre, E., Ouerchefani, D., Demagistri, L., Khebour-Allouche, F., Darragi, F., Seyler, F. **2017**. Use of remote sensing data for monitoring environmental change in Tunisian oases. 37 th EARSEL Symposium, Prague, Tchèquie: 27_30 juin 2017.

Communications par poster

Ben Khalfallah, C., Delaitre, E., Ouerchefani, D., Demagistri, L., Darragi, F., Seyler, F.
2018. Vegetation Changes detection in Tozeur oases using remotely sensed data. EGU General Assembly 2018, in Vienna, Austria, 08-13 Apr 2018.

Ben Khalfallah, C., Ouerchefani, D., Delaitre, E., Darragi, F., Seyler, F. **2018**. Monitoring the Spatio-Temporal Dynamics of Vegetation Cover in Tozeur oases, Tunisia. 1er International Conference on Soil Sciences (ICOSS), Hammamet, Tunisie, 17-19 Mars 2018.

Remercíements

Tout d'abord, mes remerciements s'adressent aux personnes qui m'ont proposé le sujet de thèse et qui m'ont encadrée tout au long de ces trois années. Elles ont su m'apporter, par leur disponibilité, leur complémentarité, leurs compétences professionnelles et leurs qualités humaines, tous les ingrédients nécessaires à la réalisation d'un travail de thèse dans des conditions excellentes.

A commencer par Monsieur Eric Delaître, mon encadrant, pour sa direction avisée, fidèle et exigeante à laquelle cette thèse doit beaucoup. Travailler avec lui m'a tout d'abord permis d'acquérir des nouvelles compétences pour avancer dans mon travail de thèse. Je le remercie énormément pour son aide, ses encouragements, et surtout pour son calme dont j'essaie de m'inspirer... mais cela ne fonctionne pas toujours. Et je tiens notamment à le remercier pour l'intérêt qu'il a porté à la valorisation de mes travaux de thèse que ce soit dans des revues scientifiques ou pour des colloques internationaux. J'ai ainsi eu la chance de voyager et de pouvoir présenter mes travaux à plusieurs reprises durant le doctorat ce qui m'a permis de rencontrer des personnes de divers horizons dans différents pays en Europe et en Afrique du Nord. Je suis consciente de l'investissement en temps et en énergie que cela a dû représenter. Je ne le remercierai jamais assez pour ça.

Je remercie Madame Dalel Ouerchefani, ma seconde encadrante, pour sa vision synoptique de la thèse et des différentes questions de recherche que l'on a développées ensemble. Je la remercie pour ses encouragements et ses conseils techniques. J'apprécie sincèrement sa direction scientifique et sa vision du travail en partenariat qui ont grandement contribué à ce qui a été finalement réalisé dans cette thèse. Je la remercie également pour avoir mis à ma disposition les moyens matériels pour pouvoir mener à bien mes sorties tant sur le terrain et que lors de mes séjours en France.

Je remercie ma directrice de thèse en France, Madame Frédérique Seyler, pour la confiance qu'elle m'a témoignée en m'accueillant dans son unité de recherche et pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de diriger ce travail.

Je remercie ensuite ma directrice de thèse en Tunisie, Madame la professeure Fadila Darragi, qui m'a honorée de bien vouloir assurer l'encadrement de cette thèse. Ses conseils et ses directives m'ont permis de surmonter les moments de faiblesse et de doute. Je la remercie vivement.

Je remercie chaleureusement Messieurs Mohamed Ouessar et Luc Descroix d'avoir accepté d'être les deux rapporteurs de ce travail, en plus de leur charge de travail quotidienne.

Je remercie enfin Madame Zohra Lili Chabaane et Monsieur Vincent Chaplot d'avoir accepté de participer à ce jury malgré leurs nombreuses occupations.

Je remercie les membres de mon jury pour s'être déplacés parfois de loin pour assister à ma soutenance et pour m'avoir fait part de remarques constructives sur mon travail.

Cette thèse a été réalisée suite aux trois années, et quelques mois, que j'ai passé entre la Tunisie et la France dans le cadre du projet PHC-Utique intitulé « Oasis-images ». Ce travail a été élaboré grâce au soutien de plusieurs institutions :

- la Faculté des Sciences de Tunis ;

- l'Université de Montpellier ;

- l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) à Montpellier (UMR ESPACE-DEV);

- l'Institut des Régions Arides de Médenine (IRA) (Laboratoire d'érémologie et de lutte contre la désertification).

Je les remercie pour l'aide matérielle et les facilités qu'ils m'ont accordées pour accomplir à bien ce travail, en particulier Monsieur Houcine Khatelli, Directeur Général de l'Institut des Régions Arides, qui m'a accueilli pendant de nombreux mois dans le sud tunisien.

Puisque ces travaux de thèse ont bénéficié d'un financement, ce qui n'est hélas pas le cas de toutes les thèses, je tiens à remercier le Ministère des Affaires Etrangères et du Développement International (MAEDI) en France, le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique en Tunisie, l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) en France et l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO).

Mes remerciements s'adressent aussi aux Ministères, Organismes et Administrations qui ont permis l'acquisition des diverses données utilisées dans ce travail. Je cite en particulier les Commissariats Régionaux au Développement Agricole (CRDA) de Tozeur et de Gabès... Je tiens à remercier Madame Salwa Saidi, mon ancienne professeure, pour m'avoir encouragée à adopter un cursus de chercheure. Je la remercie également pour ses aides et ses conseils. Elle n'a jamais cessé de me pousser pour avancer. Je vous remercie ma chère.

Je suis très reconnaissante à Monsieur Laurent Demagistri pour ses aides au niveau de la partie de l'analyse statistique et dans la correction des publications. Je le remercie énormément.

Le temps que j'ai pu passer régulièrement chaque année à la Maison de la Télédétection de Montpellier, m'a permis de rencontrer beaucoup de personnes très différentes : elles seraient trop nombreuses à citer ici. Merci à elles pour les échanges scientifiques, ou personnels, que nous avons pu avoir ensemble.

Je remercie vivement ma sœur Ikhlass, pour m'avoir aidé dans la rédaction et la correction de l'anglais des publications : « Merci chère Khaloussa !».

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent à mes parents qui m'ont toujours soutenue dans ce projet. L'intérêt que vous avez porté à mon travail a été très important pour moi. Vous m'avez toujours fait confiance et suivi dans mes choix, et pour ça je vous en suis très reconnaissante.

Merci à mon frère Aziz pour ses encouragements infinis.

Merci à ma tante Gazoua pour son soutien inconditionnel, son encouragement et son amour.

Enfin, Merci à toutes les personnes qui m'aiment et qui m'entourent, leur amour est mon unique ressource, et la vie n'aurait tout simplement pas de sens sans eux.

Cheríne

Table des matières

Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Contexte et état de l'art	5
1. Éléments de contexte	6
1.1. Les problématiques et les enjeux de l'étude des oasis	6
1.2. L'oasis et le système oasien	7
1.3. Les composantes principales des oasis	8
1.3.1. Les oasis dans le monde	10
1.3.2. Les oasis en Tunisie	11
1.3.2.1. Le palmier dattier	13
1.3.2.2. La typologie des oasis en Tunisie	14
1.3.2.3. Les rôles et les fonctions des oasis	18
1.3.2.4. Les menaces qui pèsent sur la durabilité des oasis	19
1.3.2.5. La stratégie de développement durable suivie pour les	oasis
tunisiennes	21
2. Etat de l'art : télédétection et végétation	23
2.1.1. La télédétection	23
2.1.1.1. La télédétection passive et la télédétection active	24
2.1.1.2. Les données acquises dans le domaine optique	25
2.2. L'usage des images satellites pour la végétation	27
2.2.1. La signature spectrale de la végétation	27
2.2.1.1. Les données fournies par les images	28
2.2.2. Le suivi de la végétation par télédétection	30
2.2.3. Les variables dérivées des images optiques pour le suivi des oasis	32
2.2.3.1. Les indices de végétation	32
2.2.4. L'analyse d'une image	36
2.2.4.1. La classification non supervisée	36
2.2.4.2. La classification supervisée	37
2.2.5. L'analyse d'une série temporelle d'images	38
2.2.5.1. La classification de séries temporelles de données de télédétection	n38
2.2.5.2. Les méthodes de détection des changements	40
2.3. Le suivi de la végétation dans les systèmes oasiens par télédétection	41

3. Le site d'étude : La région du Djérid	41
3.1. Le cadre géographique	42
3.2. Le cadre géologique	
3.3. Les caractéristiques climatiques	
3.3.1. La température	45
3.3.2. Les précipitations	45
3.3.4. L'insolation	47
3.3.5. Les vents	
3.4. Les ressources en eaux souterraines	
3.5. La végétation	51
3.6. Les caractéristiques pédologiques	
4. Synthèse et conclusion du premier chapitre	
Chapitre 2 : Exploitation de séries temporelles d'images satellite à h	aute résolution
spatiale pour la caractérisation des oasis sur une courte période	56
1. Introduction	57
2. La série temporelle d'images SPOT5 (Take5)	
2.1. Les données et les outils	
2.1.1. Les images satellites de l'expérience SPOT5 (Take5)	
2.1.2. Les données SIG	60
2.1.3. Les observations de terrain propres à ce travail	60
2.1.4. Les logiciels utilisés	
3. Le suivi mensuel de la végétation par périmètre irrigué	
3.1. La méthodologie : indice de végétation, statistiques	descriptives et
classification	65
3.1.1. Le calcul du NDVI	65
3.1.2. Les boîtes à moustaches	70
3.1.3. La classification hiérarchique ascendante des courbes de	e NDVI moyen
par périmètre irrigué	73
4. Résultats et discussion	76
4.1. Les profils temporels de NDVI des périmètres irrigués	76
4.1.1. Les groupes de périmètres obtenus par CAH	76
4.1.2. Les profils temporels des 7 groupes	
4.2. La cartographie des dynamiques de végétation des oasis	

5. Synthèse et conclusion du deuxième chapitre92
Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images satellites à moyenne résolution
spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période
1. Introduction96
1.1. Détermination des paramètres traduisant la dynamique de végétation des
oasis
2. La série temporelle des produits MOD13Q1-NDVI
2.1. Le produit MOD13Q1-NDVI
2.2. Les données de référence102
3. Le suivi pluriannuel de la végétation à partir de sites individuels102
3.1. La méthodologie : décomposition temporelle des séries MOD13Q1-NDVI
3.1.1. Repérer les stades phénologiques clés105
3.1.2. La courbe de tendance du NDVI issue d'une décomposition temporelle
3.1.3. Les apports du produit MOD13Q1-NDVI pour le suivi pluriannuel des
oasis116
3.2. Résultats et discussion117
3.2.1. La classification ascendante hiérarchique des courbes de tendances117
3.2.2. Une proposition de graphiques de référence pour un suivi pluriannuel .131
3.2.3. Discussion
4. Le suivi pluriannuel de la végétation par des cartes de synthèse136
4.1. La méthodologie : cartographie de synthèse pluriannuelle des NDVI des
oasis
4.1.1. La cartographie comparative classique de la végétation des oasis137
4.1.2. La cartographie de synthèse testée pour une série temporelle d'images 139
4.1.2.1. La mise en forme des données MODIS
4.1.2.2. Le calcul des moyennes annuelles et de la moyenne pluriannuelle sur
la période 2000-2016141
4.1.2.3. La carte de synthèse obtenue par classification non supervisée K-
means de la série des moyennes annuelles de NDVI142
4.1.2.4. La cartographie des anomalies annuelles de NDVI pour la période
2000-2016 150

4.2. Résultats et discussion152
4.2.1. Les tendances du couvert végétal à partir des séries de moyennes
annuelles152
4.2.2. Les dynamiques du couvert végétal à partir des anomalies annuelles154
5. Synthèse et conclusion du troisième chapitre166
Conclusion Générale168
Bibliographie
Annexe

Liste des Figures

Figure 1 : Répartition géographique des oasis à palmier dattier dans le monde (surface
relative par continent donnée en pourcentage)11
Figure 2 : Carte de localisation des oasis en Tunisie12
Figure 3 : (a) Oasis traditionnelle et (b) oasis moderne16
Figure 4 : (a) Oasis traditionnelle de la région de Gabès, (b) Oasis moderne de la région de
Tozeur
Figure 5 : Télédétection passive (a) et télédétection active (b)25
Figure 6 : Répartition dans l'espace rouge/proche infrarouge (a) de pixels avec et sans
couverture végétale et (b) d'un pixel de végétation au cours de la saison végétative (Source :
Jensen, 2000)
Figure 7 : Principaux capteurs de la basse à la très haute résolution spatiale fournissant des
images dans le domaine du visible et de l'infrarouge (Source : Jacquin, 2010)30
Figure 8 : Exemple d'image de NDVI calculé sur des périmètres irrigués oasiens à partir de
l'image SPOT5 (Take5) du 12/04/2015
Figure 9 : Localisation de la zone d'étude43
Figure 10 : Carte géologique de la région de Djérid (Source : CRDA Tozeur « Carte
géologiques 1/500000 » 2015)
Figure 12 : Courbe d'Heure de soleil de la région de Tozeur (CRDA, 2013)48
Figure 13 : Carte des nappes phréatiques de la région de Djérid (Source : CRDA Tozeur
« Carte géologiques 1/500000 » 2015)
Figure 14 : Zone de recherche des données satellitaires SPOT sur le site CNES/ESA60
Figure 15 : Carte de localisation des enquêtes de terrain effectuées dans les oasis de la
région du Djérid62
Figure 16 : Image SPOT5 (Take5) de la région d'étude prise le 26 juin 2015 : (a) en fausses
couleurs (RVB : NIR, R, G) et (b) valeurs calculées de NDVI, avec un zoom sur un PPI64
Figure 17 : Méthodologie générale appliquée sur la série d'images satellites SPOT5
(Take5) pour le suivi des oasis du Djérid67
Figure 18 : Composition colorée en fausses couleurs de l'image SPOT5 (Take5) du 12
avril 2015 avec un zoom sur la région de Nefta69
Figure 19 : Exemple de calcul du NDVI avec le logiciel ENVI69

Figure 21 : Exemple de deux périmètres irrigués montrant des évolutions des valeurs médianes, des Q1 et Q3 de NDVI très différentes (Avril-Septembre 2015).....72 Figure 23 : Les courbes moyennes des NDVI (Avril-Septembre 2015) des 7 groupes de PPI obtenus par CAH avec la méthode Ward75 Figure 24 : Distribution spatiale des NDVI moyens calculés pour chaque pixel des PPI sur la période d'avril à septembre 2015 dans les oasis de Djérid. Les photos montrent des Figure 25 : Carte de la répartition spatiale des 7 groupes obtenus par CAH, et interprétation des 7 groupes d'après les observations de terrain77 Figure 26 : Exemples photographiques des oasis du groupe 121 et 12179 Figure 27 : Exemples photographiques des oasis du groupe 112 et 11180 Figure 29 : Exemples photographiques des oasis des groupes 211 et 212......82 Figure 30 : Variations des valeurs de NDVI moyen des sites de références sélectionnées Figure 31 : Carte du NDVI moyen calculé pour les 26 dates sur l'ensemble des PPI86 Figure 34 : Carte de l'écart moyen du NDVI calculé pour les 26 dates sur la région de Figure 35 : Écart moyen de NDVI en fonction du NDVI moyen pour l'ensemble des pixels Figure 36 : Carte synthétique des variations spatio-temporelles de l'activité chlorophyllienne des PPI de la région de Nefta, basée sur les valeurs moyennes et les écarts

Figure 40 : Profil des variations saisonnières de NDVI d'une végétation de type oasis et ses
métriques phénologiques (adapté de Ben Khalfallah et al., 2017)107
Figure 41 : Principe de la décomposition temporelle d'après Jacquin (2010)109
Figure 42 : Exemple de modèle additif où les composantes tendance, saison et résidus sont
indépendantes les unes des autres111
Figure 43 : Traitement des séries temporelles de MOD13Q1-NDVI112
Figure 44 : Exemple de résultats de décomposition temporelle d'une série de MOD13Q1-
NDVI obtenus à partir de la fonction decompose de R-project114
Figure 45 : Localisation des 92 sites sélectionnés pour l'extraction des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI
Figure 46 : Analyse statistique de clustering par CAH des 92 courbes de tendances
obtenues après la décomposition temporelle, avec un regroupement en 9 familles119
Figure 47 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe G1 de la CAH120
Figure 48 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe G2 de la CAH
Figure 49 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe G3 de la CAH
Figure 50 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe G4 de la CAH124
Figure 51 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe 5 de la CAH125
Figure 52 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe 6 de la CAH126
Figure 53 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe 7 de la CAH127
Figure 54 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe 8 de la CAH128
Figure 55 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles
MOD13Q1-NDVI pour le groupe 9 de la CAH129
Figure 56 : Les courbes moyennes de tendance des séries MOD13Q1-NDVI pour les 9
groupes de la CAH

Figure 57 : Graphiques de référence pour les observations en cours en prenant l'exemple de l'oasis traditionnelle d'Abbes sur la période 2000-2016 (Source : MODIS Global Subsets) Figure 58 : Suivi de la dynamique de la végétation en comparant les valeurs moyennes annuelles de MOD13Q1-NDVI en 2000 et en 2016, à partir de quelques exemples......138 Figure 59 : Filtrage des données MOD13Q1-NDVI par l'algorithme Savizky-Golay réalisé Figure 60: Exemple de résultat obtenu par extraction de la zone d'étude à partir d'une tuile Figure 61 : Processus de calcul des indicateurs phénologiques dérivés des MOD13Q1-Figure 62 : Exemples de profils des variabilités interannuelles des moyennes annuelles de MOD13Q1-NDVI pour quelques pixels et sur la période 2000-2013144 Figure 63 : Répartition des 1200 pixels entre les 12 groupes obtenues par la méthode de Figure 64 : Profils moyens des 12 classes des moyennes annuelles des MOD13Q1-NDVI obtenus à partir de la classification par K-means pour la période 2000-2015.....146 Figure 65 : Carte de la répartition des 12 groupes de pixels MODIS obtenus par K-means à partir des moyennes annuelles MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2015147 Figure 66 : Regroupement des 12 classes obtenues par K-means en 7 classes par CAH représentée ici par le dendrogramme......149 Figure 67 : Profils moyens des 7 classes des MOD13Q1-NDVI obtenues à partir de la CAH pour la période 2000-2015......150 Figure 68 : Exemple de carte d'anomalies obtenue à partir du MOD13Q1-NDVI pour l'année agricole 2000-2001 par rapport à la période 2000-2015151 Figure 69 : Répartition spatiale des 7 classes obtenues par CAH pour la période 2000-2015 Figure 70 : Cartes des anomalies temporelles de NDVI montrant différentes dynamiques globales et locales sur la période 2000-2015155 Figure 70 : Cartes des anomalies temporelles de NDVI montrant différentes dynamiques Figure 71 : Pluviométrie annuelle (mm) à Tozeur entre 2000 et 2015......158 Figure 72 : Cartes des anomalies MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2015 pour l'oasis de Nefta......160

Figure 72 : Cartes des anomalies MOD13Q1-NDVI pour la période 200	0-2015 pour l'oasis
de Nefta	161
Figure 73 : Cartes des anomalies MOD13Q1-NDVI pour la période	2000-2015 pour la
zone nord-est à proximité de l'oasis d'El Ouedienne	163
Figure 73 : Cartes des anomalies MOD13Q1-NDVI pour la période	2000-2015 pour la
zone nord-est à proximité de l'oasis d'El Ouedienne	164

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques d'une oasis moderne et d'une oasis traditionnelle .15
Tableau 2 : Oasis concernées par le Plan directeur des eaux du Sud –PDES (1980-91)22
Tableau 3 : Répartition mensuelle de la température (°C)45
Tableau 4 : Répartition mensuelle de la pluviométrie (année 2003/2004) pour la station de
Tozeur
Tableau 5 : Répartition mensuelle de la pluviométrie (année 2003/2004) pour la station de
Tozeur47
Tableau 6 : Caractéristiques du capteur MODIS (Source : MODIS website)100
Tableau 7 : Descriptif des produits MODIS utilisés
Tableau 8 : Exemples de métriques phénologiques issus du profil MOD13Q1-NDVI
annuel et interprétation phénologique106
Tableau 9 : Définition des classes de tendance du NDVI 116

Liste des annexes

Annexe 1 : Liste des images SPOT5 (Take5)
Annexe 2 : Les images SPOT5 (Take5) utilisées dans ce travail
Annexe 3 : Les séries temporelles de boîtes à moustaches illustrant les variations
saisonnières de NDVI des 38 périmètres irrigués195
Annexe 4 : Fiche de terrain élaboré pour la caractérisation du milieu et des états de
surfaces199
Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-
NDVI sur la période 2000-2015201

LISTE DES SYMBOLES, ABREVIATIONS ET ACRONYMES

Symboles

(Dt) : série désaisonnalisée

- (Yt)t : série temporelle
- Ŷt : série ajustée
- S'j : variations saisonnières
- L : le paramètre d'ajustement
- t : nombre de mois à partir de la date 0
- i : numéro de l'année
- j : numéro du mois dans l'année i
- γ : facteur d'autocorrection atmosphérique

Abréviations

ARVI : Atmospherically resistant vegetation index AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometry. Miscellaneous BRS : basse résolution spatiale CAH : Classification ascendante hiérarchique CVA : Analyse Vectorielle des Changements CV-MVC : Constraint View - Maximum Value Composite CNES : Centre national d'études spatiales CRDA : Commissariats Régionaux au Développement Agricole **DVI** : Difference Vegetation Index ESA : Agence Spatiale Européenne ETM : Enhanced Thematic Mapper EVI : Enhanced Vegetal Index FAO : L'Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture HDF: Hierarchical Data Format HR : High Resolution IRA : Institut des Régions Arides IRD : Institut de Recherche pour le Développement LiDAR : Light Detection And Ranging MIR : Moyen Infrarouge MOD13Q1 : Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer MSAVI : Modified Soil-Adjusted Vegetation Index MVC : Maximum Value Composite NASA : National Aeronautics and Space Administration

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index

NDWI : Normalized Difference Water Index

NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

P : Pluviométrie

PIR : réflectance du proche infrarouge

PPI : Périmètre Public Irrigué

R : rouge

RADAR : Radio Detection And Ranging

RADDO : Réseau associatif de développement durable des oasis

RVI : Ratio Vegetation Index

SAVI : Soil-Adjusted Vegetation Index

SIG : Système d'information géographique

SIPAM : Système Ingénieux du Patrimoine Agricole Mondiale

SPOT5 : Satellite Probatoire d'Observation de la Terre

TSAVI : Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index

VIIRS : Visible Infrared Imaging Radiometer Suite

Introduction Générale

Les oasis tunisiennes couvrent plus de 40 000 ha dans le sud désertique de la Tunisie. Elles se répartissent entre quatre gouvernorats différents : Gafsa, Gabès, Kébili, et Tozeur. Les oasis sont des écosystèmes élaborés par les sociétés qui les habitent, sous des contraintes sociales, écologiques et économiques très complexes (Toutain *et al.*, 1988). Elles sont marquées par l'aridité du climat saharien.

Or, les oasis du sud tunisien connaissent une dégradation lente qui s'est accélérée de façon vertigineuse depuis le déclenchement de la révolution tunisienne en 2011 (Caprentier, 2017 ; Gana, 2013). Les exploitants cultivent leurs parcelles suivant les moyens fonciers, financiers et les disponibilités en eau d'irrigation. Malgré l'intervention de l'Etat et la création de plusieurs projets de développement et de sauvegarde des oasis, les systèmes de production sont encore très mouvants et très fragiles : les oasis tunisiennes se trouvent de plus en plus abandonnées par leurs propriétaires. Pour améliorer les productions et rembourser les charges de l'exploitation agricole, les agriculteurs changent souvent leurs systèmes de culture et utilisent plusieurs stratégies de développement agricole (Abdedayem, 2015).

Suite aux changements sociaux, économiques et culturels de ces dernières années, les oasis en Tunisie sont confrontées à plusieurs défis, mais le principal reste la diminution des ressources en eau dont dépend la vie de l'oasis (Kassah, 2010). La première cause de cette diminution est la création de nouvelles exploitations agricoles non loin des anciennes oasis, ce qui constitue une surcharge pour les nappes phréatiques et profondes fragiles qui va jusqu'à menacer de disparition les oasis traditionnelles.

Les oasis tunisiennes offrent une grande diversité de cultures ; les oasis traditionnelles se caractérisent par une polyculture vivrière sur 3 étages (maraîchage, fruitiers, palmiers) comme règle de pratique alors que les oasis modernes de type industriel monospécifique sont tournées vers l'unique production de dattes de type Deglet Nour à forte valeur ajoutée via l'exportation. En faisant le bilan des interventions de l'Etat depuis les années 70, on se rend compte aussi que toutes les régions oasiennes n'ont pas connu le même développement : pour les régions autour du chott El Djérid, c'est-à-dire celles du Nefzaoua et du Djérid, les surfaces couvertes par les périmètres irrigués ont plus que doublé, alors que pour d'autres régions elles sont restées pratiquement stables (les oasis de montagnes par exemple). Dans certains cas, ces surfaces ont régressé sous la pression urbaine comme à Gabès par exemple.

1

Tous ces facteurs influent négativement sur l'équilibre fragile qui règne au sein des oasis et interpelle toutes les parties concernées à concevoir une stratégie et à mettre en œuvre des actions pour limiter les effets néfastes et permettre la sauvegarde des oasis.

Vu l'importance des oasis en Tunisie notamment pour ce qui est des biens et des services qu'elles fournissent, il faut accroître les efforts régionaux de préservation et de développement durable des oasis du sud Tunisien, et rejoindre ceux fournis internationalement à l'échelle du continent africain, pour préserver l'environnement et améliorer les conditions de vie et les sources de revenu des populations et assurer la sécurité alimentaire en milieu désertique.

Dans ce contexte, la mise au point d'un dispositif de suivi-surveillance des oasis à partir des systèmes d'observation de la Terre depuis l'espace est un atout important, pour mieux comprendre ce qui se passe afin de pouvoir anticiper.

La télédétection, et plus particulièrement l'observation spatiale de le Terre, qui permet d'étudier l'état et l'évolution des surfaces terrestres, peut être envisagée pour répondre au moins en partie à cet enjeu. Elle permet de suivre et d'étudier les systèmes agricoles mis en place sur des territoires plus ou moins étendus en fonction des données utilisées et ainsi de comprendre les dynamiques agricoles à travers un suivi de la végétation à l'échelle d'une exploitation, d'une région voire d'un pays tout entier (Matchanov et al., 2016; Beuchle et al., 2015 ; Atzberger, 2013). La mise en place d'un suivi des régions oasiennes par télédétection se heurtait à deux difficultés : 1. la faible capacité de revisite des capteurs à haute résolution spatiale qui permettent d'identifier les contours des parcelles agricoles et de caractériser les oasis et 2. la faible précision spatiale des capteurs à basse résolution, qui mettent en évidence des évolutions d'îlots parcellaires grâce à leur forte répétitivité (Lecerf, 2008) mais sans pouvoir toujours identifier les oasis et rarement les caractériser (confusion entre les différents types d'oasis, le développement de la végétation...). En outre, étant données la diversité spatiale et structurelle des oasis et leurs compositions très diverses, des données acquises à hautes résolutions spatiales et temporelles sont nécessaires pour les étudier. Pareillement, des données à moyenne résolution spatiale devaient mettre en évidence au moins une partie du fonctionnement des régions oasiennes grâce à leur répétitivité temporelle. Elles permettent de caractériser l'impact du cycle des saisons sur le fonctionnement des oasis. De plus, étant donnée la profondeur historique de certaines données, on devait également mettre en évidence l'impact d'une année exceptionnellement sèche ou humide sur le fonctionnement de ces milieux. De plus, certaines dynamiques temporelles particulières comme celles avec un pas de temps pluriannuel peuvent certainement encore être repérées comme par exemple l'implantation de nouveaux périmètres avec le développement des palmiers d'année en année (croissance de la couronne, augmentation de la phytomasse), ou bien comme la convergence des axes de drainage en aval des oasis en liaison avec des processus d'hydromorphie et de salinisation. On cherche donc à distinguer les variations saisonnières des dynamiques interannuelles.

Les techniques d'observation spatiale ont beaucoup progressé ces dernières années et la disponibilité de séries temporelles d'images à haute résolution spatiale à forte capacité de revisite, ouvre de nouvelles perspectives pour l'étude des oasis à des échelles spatiotemporelles fines. Ainsi, la disponibilité de séries temporelles d'images satellites à moyenne ou basse résolution spatiale mais haute répétitivité et ceux à haute résolution et haute répétitivité constituées aujourd'hui à partir de données acquises par plusieurs capteurs permet désormais d'envisager l'identification précise des oasis et de les caractériser. Elle pose aussi la question de l'approche méthodologique à adopter pour traiter ces séries temporelles d'images.

L'objectif principal de cette thèse est de tester l'apport des séries temporelles d'images produites par les satellites d'observation de la Terre pour la mise en place d'un système de surveillance des systèmes oasiens en Tunisie et d'élaborer une typologie des oasis en fonction de leurs caractéristiques propres (diversité des espèces cultivées, organisation spatiale des plantations et des parcelles, âge, systèmes et tours d'irrigations...). Pour cela, cette thèse s'attache à répondre au moins en partie aux trois sous-objectifs suivants :

- Mettre en évidence les évolutions qui marquent les oasis à l'échelle du sud tunisien sous l'impact des changements globaux, qu'ils soient d'ordre climatique, environnemental, social ou économique, et ce pour la période récente, de 2000 jusqu'à aujourd'hui.

- Extraire de ces séries temporelles des types de signatures en relation avec les variations saisonnières et interannuelles de la végétation qui renseignent les causes de ces variations (phénologie, pratiques culturales, stress hydrique ou salin, phytopathologie...)

Cette thèse est structurée en trois chapitres :

 Le premier chapitre décrit le contexte général, développe la problématique et dresse un état des données et des méthodes permettant d'étudier les oasis à l'aide des séries temporelles d'images satellites. L'objectif est de mettre en évidence l'ensemble des enjeux liés à

3

l'identification et à la caractérisation des oasis et de montrer l'importance d'un suivi interannuel et saisonnier des régions oasiennes. Un bilan des méthodes permettant de suivre les oasis à l'aide de séries temporelles d'images satellites et un état de l'art sur ce qui se fait avec les séries temporelles d'images pour le suivi de régions agricoles sont exposés, avant la présentation du site d'étude ainsi que des données et de leurs traitements.

- Le second chapitre est focalisé sur l'évaluation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale (10m) et forte répétitivité (5 jours) pour caractériser la dynamique de la végétation des oasis sur une courte période, d'avril à septembre 2015. La série d'images exploitée est celle produite par l'expérience SPOT5 (Take5) que l'Agence Spatiale Européenne a mis en place sur une centaine de sites à travers le monde. Cette expérience préfigurait l'arrivée des images produites par les satellites Sentinel2 à partir de décembre 2015.

– Le troisième chapitre porte sur l'évaluation d'une série temporelle d'images à moyenne résolution spatiale (250m) et forte répétitivité (16 jours), le produit MOD13Q1-NDVI, fournie par le capteur MODIS. L'intérêt de ce produit est la longueur de la période temporelle qu'il couvre, puisqu'il existe depuis février 2000.

A travers ces deux jeux de données, ceux sont donc deux échelles spatio-temporelles très différentes qui vont être analysées sur une même région oasienne, celle du Djérid, dans le sud tunisien.

Chapitre 1 : Contexte et état de l'art

Sommaire

1.	Éléments de contexte	6
2.	Etat de l'art : télédétection et végétation	23
3.	Le site d'étude : La région du Djérid	41
4.	Synthèse et conclusion du premier chapitre	54

1. Éléments de contexte

1.1. Les problématiques et les enjeux de l'étude des oasis

Au cours des dernières décennies, les parcelles oasiennes sont confrontées à un certain nombre de problèmes : l'abandon des parcelles, la mauvaise gestion de l'eau, la salinité la diminution des ressources en eau et l'évolution des conditions climatiques.

La problématique, située à la charnière de la sphère socioéconomique et écologique, se manifeste notamment à travers 1) l'acuité de la dégradation qualitative et quantitative des ressources naturelles, dont particulièrement le sol, la biodiversité, l'eau, 2) la disparition progressive des conditions favorables à la petite exploitation agricole majoritaire dans les oasis, aggravée par les changements climatiques, 3) l'amplification du phénomène de désertification, ainsi que par 4) la prolifération des foyers de pollution. Tout ceci fait que le rôle social, économique et écologique des oasis est aujourd'hui en péril. Le cadre de vie et les moyens de subsistance des populations qui en dépendent sont sérieusement affectés, voire détériorés. La perte par l'abandon d'oasis entières est inévitable si rien n'est fait d'urgence (Abdedayem, 2015 ; Ministère de l'Environnement, 2015).

Les travaux de recherche qui ont tenté de comprendre le fonctionnement actuel ainsi que l'évolution de ces territoires sont la plupart du temps globalisants (Battesti, 2011). Ils s'accordent presque tous sur le fait que ces espaces hérités sont frappés par un processus de déclin et que leur devenir est en doute. Les formes d'adaptation et de reconversion de ce système dit en difficulté étaient minimisées voir écartées. De plus, la diversité des situations d'une oasis à l'autre est très peu mise en évidence, voire négligée dans la plupart des études. La réflexion menée dans le cadre de ce travail cherche alors à étudier les dynamiques spatiotemporelles des oasis à travers un cas plus précis, celui des oasis de la région de Tozeur et ce afin de cerner non uniquement la réponse de ces oasis aux changements du contexte socio-économique qui l'entoure mais aussi de mettre en évidence les évolutions qui marquent les oasis à l'échelle des oasis de Djérid sous l'impact des changements globaux, qu'ils soient d'ordre climatique, environnemental, social ou économique (Fargette et *al.*, 2017a ; Fargette et al., 2017b ; Conforti & Tonneau, 1999).

La faible densité de réseaux d'observations de l'état de la végétation des oasis a motivé l'utilisation de la télédétection comme source de données pour suivre au mieux la dynamique et les changements du couvert végétale. Les images satellitaires offrent la possibilité de mesurer et de suivre de manière systématique à différentes échelles spatiale et temporelle l'état de couverts végétaux. L'option méthodologique choisie consiste à analyser les variations spatio-temporelles de la dynamique du couvert végétal des oasis. L'évolution de l'informatique a permis d'envisager une interprétation numérique des données toujours en terme quantitatif.

Le développement de méthodes d'évaluation et de suivi de l'état de l'environnement et de l'impact des actions de lutte contre la dégradation des terres repose sur la mise en place de réseaux d'observation utilisant des méthodologies de collecte et de transfert de données compatibles. L'intérêt de ces observatoires est de collecter les données nécessaires, sur une base harmonisée, de suivre dans le temps l'évolution de processus et de permettre la définition de situations de références. Ils permettent de développer des indicateurs et de les tester, d'élaborer des outils d'aide à la décision intégrant ces indicateurs (Fargette et *al.*, 2017a).

Dans ce contexte, la mise au point d'un dispositif de suivi-surveillance des oasis à partir des systèmes d'observation de la Terre depuis l'espace sera un atout important, pour mieux comprendre ce qui se passe ou est en train de se passer afin de pouvoir anticiper. La télédétection se révèle être un outil tout à fait approprié pour étudier le fonctionnement et suivre l'évolution de la végétation. Grâce aux satellites il est possible en effet de cartographier les couverts végétaux à des échelles de temps et d'espace très variés (Atzberger, 2013 ; Pei et *al.*, 2018 ; King et *al.*, 2014). Outils d'une meilleure compréhension des processus physiques et biologiques qui gouvernent la dynamique des écosystèmes végétaux, les données de télédétection peuvent aussi être utilisées pour informer les politiques sur les conséquences d'éventuels changements de la répartition des couverts végétaux, de façon à mettre en place des solutions de gestion plus durables.

Plusieurs questions peuvent donc se poser : comment mettre en évidence cette dynamique d'évolution des plantations de palmiers dattiers ? A partir des signatures spatio-temporelles, peut-on élaborer une typologie des oasis en fonction de leurs caractéristiques propres (diversité des espèces cultivées, organisation spatiale des plantations et des parcelles, âge, les systèmes et les tours d'irrigations), est ce qu'on peut faire des groupements (clusters) à partir de ces signatures. Peut-on relier les variations saisonnières et interannuelles de NDVI à leurs fonctionnements (végétation, eau et sol) ? Pour tenter de répondre à tout cela nous verrons dans un premier temps comment ont été choisi puis traitées les données et quels résultats en ont découlés.

1.2. L'oasis et le système oasien

Les régions arides et semi-arides qui couvrent plus de 30% de la surface de la terre (Song et al., 2015) abritent les écosystèmes oasiens autour de points d'eau naturels (sources) ou

7

artificiels (forages, puits, etc.). L'oasis est une zone de terre qui a été transformée en zone de cultures verdoyantes avec un taux d'humidité élevé et avec une nappe d'eau souterraine qui est parfois suffisamment proche de la surface du sol et assez abondante pour que l'on puisse les exploiter, ces oasis se trouvent placées dans les milieux désertiques et semi-désertiques (Matchanov et al., 2016). Les oasis sont des espaces mis en culture par irrigation et donc parfaitement artificiels (Bai et al., 2014). Ces régions se définissent comme des espaces cultivés intensivement dans un milieu désertique ou fortement marqué par l'aridité (Jouve, 2012). Selon Kassah (2009), l'oasis peut être définie comme étant un espace irrigué intensivement cultivé dans des régions arides où l'agriculture en sec est impossible. Les régions arides ne portent pas de cultures sans irrigation ou arrosage : donc l'oasis désigne ces régions de cultures irriguées permanentes et de surfaces très restreintes par rapport à l'étendue désertique. Parmi les systèmes interactifs entre les hommes et leurs milieux, les agrosystèmes et les systèmes de culture (Sébillotte, 1990) qui leur sont associés, évoluent rapidement. Les systèmes et paysages oasiens sont donc principalement liés à l'action de l'homme. Dans ces régions que l'on croyait inhabitables, un monde nouveau réussit à se développer. De surcroît, l'oasis se dresse face aux déserts : ordre contre chaos, fraîcheur et limpidité contre chaleur et poussière (Cournoyer, 2004). Dans les oasis, les systèmes d'utilisation des eaux constituent une forme très élaborée d'irrigation collective dont la conception est très ancienne, basée sur la mise en commun et le partage des ressources. Les écosystèmes oasiens qui se définissent comme des entités écologiques de conception humaine pour assurer un tant soit peu une stabilité socio-économique locale, pourraient subir les impacts les plus menaçants au vu de leur extrême vulnérabilité face aux changements socioéconomiques et environnementaux (notamment climatique) (Sghaier, 2014).

Généralement, le mot oasis est lié à l'existence du palmier dattier, du moins en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Élément essentiel pour la création du microclimat oasien selon les spécialistes de bioclimatologie (Riou, 1988). Dans le sud tunisien, le palmier dattier constitue le pilier du système oasien par la création d'un microclimat favorable au développement des arbres fruitiers et des espèces maraîchères et fourragères. Plus de 250 cultivars de dattier ont été répertoriés et distingués sur la base morphologique et agronomique (Bensalah et Hellali, 2006 ; Ferchichi et Hamza, 2008).

1.3. Les composantes principales des oasis

Les oasis constituent des écosystèmes uniques, artificialisés, qui sont en fait des agrosystèmes, dont les différentes composantes, climat-sol-eau-végétation-faune, hommes, sont fortement interdépendantes.

Climat

Le climat est le premier facteur à prendre en considération. L'aridité est le point commun à l'ensemble des systèmes oasiens mais ses caractéristiques varient d'une zone à une autre en fonction de différents paramètres (continentalité, topographie, caractéristiques des vents...). L'oasis est la résultante de modifications induites par l'homme par l'introduction de l'irrigation qui a permis de développer un couvert végétal dense, l'ensemble conduisant à la création d'un microclimat local particulier (Lasram, 1990). Le microclimat oasien permet l'existence d'une importante diversité végétale et animale (Ben Salah, 2012), les caractéristiques bioclimatiques de l'oasis dépendent de la nature et de la structure de la végétation qui y est installée.

Sol

Les sols d'oasis sont aussi une richesse locale dans un milieu pauvre. Gvozdetskiy et Mikhaylov (1963) ont déclaré que les oasis sont généralement cultivables avec des sols fertiles et à grains fins, confinés principalement aux parties périphériques des ventilateurs alluviaux à l'intérieur des terrasses des rivières et des deltas. Les sols d'oasis sont des sols développés par l'intervention humaine sur des substrats variés (par ajout de matières organiques et de sables et par drainage) de manière à modifier leurs propriétés et les rendre aptes aux cultures. Les sols oasiens varient nettement d'un secteur à l'autre de l'oasis. En fonction de leur localisation par rapport à la pente générale du relief local, ils diffèrent par leur texture, leur exposition à l'hydromorphie et à la salinisation, et surtout par leur degré d'évolution.

Ressources en eau

Oasis : dans les déserts, petite région où la présence de l'eau permet la culture (Battesti, 1993). Les oasis traditionnelles ont été établies à partir de ressources en eau plus ou moins facilement mobilisables (sources, puits de surfaces, foggaras...). Les techniques modernes de captage, de forage et de stockage de l'eau ont permis d'accroitre considérablement les ressources disponibles pour l'irrigation.

Végétation

Sur le plan agronomique, l'oasis est définie comme étant un agrosystème intensifié établi dans un espace isolé en milieu désertique (Skouri, 1990). Il existe une grande diversité des plantes selon les régions, cette biodiversité culturale est très importante, d'autant que beaucoup des plantes cultivées dans une région se retrouvent dans l'enceinte de la même oasis. Ces oasis ne sont pas spécialisées mais en polyculture. On définit classiquement l'oasis par trois strates : la première est constituée par le palmier dattier qui fait partie des grandes plantes oasiennes, c'est l'arbre de base du système oasien ; la seconde strate arborée contient

9

les arbres fruitiers ; et pour finir, les cultures fourragères et maraîchères constituent la troisième et dernière strate (Battesti, 2005).

- Le palmier dattier est un arbre à très forte symbolique, et d'une grande ancienneté en Asie et Afrique, il forme l'étage supérieur du couvert végétal. Dans toutes les oasis, il existe une diversité très grande des cultivars sélectionnés : il existe près de 2000 cultivars dans le monde (El Bekr, 1972).

- Les arbres fruitiers : une multitude d'espèce d'arbres fruitiers poussent à l'ombre des palmiers dattiers et constituent le deuxième étage de ce système de culture, il s'agit essentiellement d'arbres fruitiers méditerranéens tel que le grenadier, le pécher, l'abricotier, la vigne, le pommier, le prunier, etc.

- Les cultures de l'étage inférieur : les oasis sont très riches en diverses cultures et plantes maraichères, fourragères et aussi industrielles. L'oasis se caractérise par la diversification de la production agricole (OSS, 2014). Traditionnellement, les exploitants associent sur une superficie souvent limitée, des espèces et des variétés répondant à leurs besoins et dans la production couvre la demande de la famille tout au long de l'année. La diversité phytogénétique est très importante.

L'élevage oasien

L'élevage est une composante essentielle des systèmes de production agricole dans les oasis. Il permet d'entretenir la fertilité des sols à travers les épandages des déjections des animaux (Sraïri *et al.*, 2011). L'homme a sélectionné et domestiqué des espèces animales qui lui permettaient d'avoir une autonomie dans ces îlots de vie. Les espèces traditionnellement domestiquées sont, les caprins, les ovins, les chevaux, les ânes, les mulets, les lapins et les volailles (Sraïri *et al.*, 2017 ; Alary et *al.*, 2012 ; CNEA, 2009a).

1.3.1. Les oasis dans le monde

Les oasis existent au-delà du Sahara, sur les cinq continents (Figure 1: Répartition géographique des oasis à palmier dattier dans le monde (surface relative par continent donnée en pourcentage). Les oasis dans le monde ont rempli à travers leur histoire, différentes fonction d'escale, d'échange, de refuge et de production (Lasram, 1990). Elles représentent sur le globe, pour celles plantées en palmiers dattiers, près d'un million d'hectares et elles font vivre directement entre sept et dix millions d'oasiens. On les trouve donc dans la plupart des grandes régions sèches du monde : sur le pourtour du Sahara, au Maghreb comme au Sahel, au Moyen Orient, sur la côte ouest de l'Amérique Latine et en Asie Centrale (Jouve, 2012). Il pourrait sembler pertinent de considérer la vallée du Nil comme une oasis, avec presque la totalité de la population égyptienne concentrée dans cette vallée, soit plus de 60 millions de

personnes (Battesti, 2002). Il faudrait ajouter à ces populations d'oasis, celles qui en vivent partiellement, celles des oasis sans palmier (comme l'oasis de la Ghouta à Damas), celles des oasis en zones continentales à hiver froid (Asie Centrale, Chine), etc. Les régions concernées se rencontrent ainsi aussi bien en Afrique, au nord et au sud du Sahara, au Proche et au Moyen Orient, en Asie, en Amérique, en Australie. Historiquement, leur création s'est faite le plus souvent pour constituer des relais le long des routes caravanières et des grands axes d'échanges intercontinentaux (Toutain, 1990).



(Source: Belguedj, 2010)

Figure 1 : Répartition géographique des oasis à palmier dattier dans le monde (surface relative par continent donnée en pourcentage).

1.3.2. Les oasis en Tunisie

Les oasis tunisiennes représentent 9% des périmètres irrigués du pays (en surface) et 0,8% de la surface agricole du pays ; elles abritent 10% de la population tunisienne totale (MEDD, 2015). Elles sont localisées dans le sud du pays principalement dans les 4 gouvernorats de Tozeur, Kebili, Gabès et Gafsa (Figure 2). Ces oasis, considérées parmi les plus importants écosystèmes des zones arides et sahariennes, qui ont toujours été des centres importants de production agricole et des centres commerciaux liant des régions très distantes les unes des autres, couvrent une superficie d'environ 40 000 ha (MEDD, 2015). La Tunisie possède un

nombre total de palmiers estimé à 3 500 000 pieds pour une production totale annuelle de dattes évaluée à 90 000 tonnes ce qui correspond à 3,5% du patrimoine phoenicicole mondial estimé à 105 millions de palmiers (Naceur et Ferchichi, 2013). Elles constituent un espace agricole soumis à une forte pression démographique dans un milieu désertique où les ressources en eau sont peu renouvelables. L'agriculture irriguée joue un rôle de véritable catalyseur de développement local à travers l'amélioration des revenus et des conditions de vie des populations rurales, aussi l'agriculture irriguée contribue significativement à satisfaire les besoins alimentaires de la population et à générer de l'emploi local. Les oasis de la Tunisie ont montré leur adaptabilité au cours du temps, ainsi que leur rôle fondamental dans le développement des zones arides (Kassah, 2009). Les oasis puisent la quasi-totalité de leurs besoins en eau dans les nappes souterraines profondes et très peu dans les nappes superficielles (Labidi, 1995).



(191036 et 191037 : 08/26/2018 ; 192036 et 192037 : 08/01/2018

Figure 2 : Carte de localisation des oasis en Tunisie

1.3.2.1. Le palmier dattier

Le palmier dattier a été dénommé Phoenix dactylifera par LINNÉ en 1734 (Lazhar, 2009). Le palmier dattier est l'arbre de base du système oasien, il constitue le pivot de l'agrosystème de l'oasis. Il se caractérise par un pseudo tronc appelé stipe, il peut atteindre 30 à 40 m de hauteur. C'est une espèce hétérozygote et dioïque, il existe donc des palmiers males et des palmiers femelles (Janty, 2014) et pour que la pollinisation puisse s'effectuer, il faut que les palmiers mâles et femelles se trouvent à proximité, la pollinisation naturelle effectuée par le vent n'est donc possible que lorsque le nombre des individus mâles dans une oasis est très important ce qui n'est pas le cas dans les oasis de la Tunisie. Les agriculteurs cherchent à obtenir une forte densité de sujets femelles producteurs de fruits (Hakkou et Bouakka, 2000), le nombre des pieds mâles dans une oasis varie entre 2 et 6 maximum, donc la pollinisation naturelle doit être remplacée par une pollinisation artificielle, faîte à la main par les exploitants. Le palmier dattier est une espèce thermophile ayant une activité physiologique qui se manifeste à partir d'une température de +7 à +10°C selon les variétés. L'intensité maximale de l'activité végétative est atteinte à des températures de 30°C, elle se stabilise ensuite et commence à décroitre vers 38-40°C (Munier, 1973). Une période de fraicheur est nécessaire pour que la floraison se déclenche. En Tunisie, la floraison se déclenche au printemps sur une période de trente à cinquante jours, après une période de transition accentuée avec le froid de l'hiver. La datte a besoin d'une chaleur estivale prolongée mais sans excès. La durée de maturation des fruits est de 100 à 200 jours selon les variétés, les conditions de culture et les conditions écologiques. La récolte se fait durant l'automne entre les mois de septembre et novembre.

Les oasis tunisiennes constituent une diversité végétale très riche en palmiers dattiers. Dans les oasis tunisiennes continentales, plus de 200 cultivars ont été répertoriées dont les principales sont : *Deglat Nour, Alig, Kenta, Akhouet*, etc. (Rhouma, 1994) ; et dans les oasis littorales près de 50 : *Bouhattam, Lemsi, Aigguiwa, Arechti*, etc. (Ben Salah, 1992). Les oasis tunisiennes renferment plus de 3 500 000 pieds de diverses variétés avec la prédominance de la variété « *Deglet Nour* », variété constituant le pilier de l'économie oasienne et contribuant sensiblement à l'équilibre de la balance commerciale du pays via l'exportation (Ben Salah, 2012).

La région de Kébili dans le Nefzaoua renferme plus que 3 millions de palmiers dattiers, soit environ 58 % de la production nationale, suivie de la région de Tozeur (Djérid) avec 31 %. Ces deux ensembles comptabilisent environ 90 % du patrimoine phoenicicole des oasis tunisiennes. Dans les oasis continentales, 200 cultivars ont été répertoriés par Ferchichi et

Hamza (2008). Les oasis littorales hébergent plus de 40 cultivars qui leurs sont spécifiques (Ben Salah, 1993).

1.3.2.2. La typologie des oasis en Tunisie

L'analyse bibliographique nous a permis de faire ressortir 3 sortes de classification pour les oasis tunisiennes, dont les plus souvent adoptées sont la classification géographique et la classification selon le mode de culture, une troisième classification est citée dans quelques documents mais elle n'est pas appuyée par des exemples ou des cas concrets, il s'agit de la classification selon le mode d'irrigation (hydraulique). L'objectif d'une classification est de ramener la multiplicité des cas qui ne pourraient être traités individuellement à un nombre réduit de types, et de suggérer des hypothèses d'explication de cette diversité.

Les oasis tunisiennes se répartissent dans les régions méridionales du pays (Figure 2). Elles couvrent une superficie totale de près de 40 000 ha (OSS, 2014).

Classification suivant la localisation géographique

Selon l'origine géographique, les oasis de Tunisie sont classées en deux grands ensembles :
Les oasis continentales qui prédominent avec 33 150 ha (OSS, 2014). Ces oasis représentent 83 % de l'ensemble des oasis tunisiennes, soit 89% de l'effectif total des palmiers dattiers du pays et contribuent à 85% de la production nationale des dattes (Sghaier, 2014).

Elles regroupent :

- ✓ Les oasis continentales sahariennes qui se localisent dans la région de Tozeur, appelée « Djérid », avec 8 363 ha, et dans la région de Kébili, appelée « Nefzaoua », avec 22 980 ha (Sghaier, 2010). Ces oasis sahariennes sont caractérisées par un climat à températures élevées et une atmosphère sèche, et par la dominance de la variété *Deglet Nour*.
- ✓ Les oasis de montagnes qui sont concentrées entre la région de Gafsa et la frontière algérienne, avec principalement les oasis de Tameghza, Chébika et El Guettar, sans oublier celle de Gafsa bien sûr, et qui couvrent une superficie de 5 500 ha. Elles sont caractérisées par un hiver doux, et comportent une forte diversité variétale avec une présence plus ou moins importante de '*Deglet Nour*' (Kassah, 1996).
- ✓ Les oasis littorales se situent essentiellement dans la région de Gabès au bord de la mer Méditerranée, et couvrent une superficie de 7 000 ha (OSS, 2014). La tradition de la culture du palmier dattier est très ancienne dans les oasis littorales, en mélange avec les arbres fruitiers divers et les cultures maraîchères, fourragères et industrielles (Bechraoui, 1980). La culture du palmier dattier est représentée par des variétés

comme *Bouhattem*, *Lemsi*, *Arichti*, et d'autres variétés communes qui contribuent pour 16% de la production nationale (Sghaier, 2014).

Classification selon le mode de culture (ou agricole)

Adoptée par plusieurs types d'acteurs (chercheurs, administration), la classification des oasis selon le mode de culture (ou agricole) se traduit par deux types : les oasis traditionnelles et les oasis modernes (Sghaier, 2014). « Moderne n'est pas synonyme de récent et traditionnel ne veut pas dire ancien, une oasis ancienne d'existence peut avoir les caractéristiques d'une oasis moderne et inversement » (Sghaier, 2014).

On trouve dans l'aménagement des deux types d'oasis deux concepts qui semblent s'opposer : le « classique » ou « traditionnel », sans ordre apparent, dense en plantation et riche biodiversité et le « moderne » avec des palmiers alignés et espacés, des parcelles rangées avec une forte orientation vers le productivisme) (Battesti, 2005).

La différenciation entre oasis traditionnelle et oasis moderne se fonde sur certains critères qui sont synthétisées dans le tableau Tableau 1.

Oasis traditionnelle	Oasis moderne
 Morcellement et taille réduite des exploitations. Densité importante des palmiers (supérieure à 200 pieds/ha). Prédominance des variétés communes. Existence des rapports de production type "Khemmassat" Système d'irrigation en terre. Densité importante des arbres fruitiers et grande diversité des espèces. Importance de l'autoconsommation et peu d'ouverture sur l'environnement socio-économique. 	 Taille plus importante des exploitations. Densité des palmiers (100 à 150 pieds/ha). Prédominance des variétés dattières rémunératrices (<i>Deglat Nour</i>). Rapports de production dominants type salariat et mode de faire valoir direct. Système d'irrigation en béton. Etage moyen organisé. Ouverture sur les marchés d'intrants et de produits.

Tableau 1 : Principales caractéristiques d'une oasis moderne et d'une oasis traditionnelle

Source : Sghaier (1996)

On trouve dans les oasis traditionnelles une structuration en trois strates (Figure 3), la première strate, la plus haute est constituée par des palmiers dattiers qui maintiennent la fraicheur et produit l'ombrage aux espèces des strates inférieures. Sous les palmiers, on trouve la seconde strate qui comprend les arbres fruitiers, et le dernier étage, à l'ombre, est celui des

cultures herbacées, maraîchères et fourragères. Les oasis anciennes, ou « traditionnelles » (Figure), couvraient en 2009, environ 37% de la superficie totale des oasis (MEDD, 2015). Généralement on trouve cette catégorie surtout dans les oasis littorales. Par contre, les oasis « modernes » sont situées dans le Djérid et le Nefzaoua (Figure 4).





(d'après RADDO, 2015) Figure 3 : (a) Oasis traditionnelle et (b) oasis moderne


Figure 4 : (a) Oasis traditionnelle de la région de Gabès, (b) Oasis moderne de la région de Tozeur

Classification hydraulique

La classification hydraulique des oasis résulte de l'évolution des pratiques de l'irrigation des oasis faisant appel aux eaux des aquifères sahariens captifs (Mamou, 1990 ; Mamou et Kassah, 2002).

Dans la Tunisie du Sud-Ouest, on trouve des résurgences naturelles à partir des nappes profondes qui localisent et conditionnent les types d'aménagements. Nous distinguons de ce fait plusieurs techniques hydrauliques. Par contre, dans la Tunisie du Sud-Est, on trouve essentiellement les eaux de ruissellement et les nappes phréatiques qui conditionnent les types d'aménagements hydrauliques (Kassah, 2009).

- Les puits de surface : dans certaines régions, la nappe phréatique est proche de la surface et accessible par des techniques rudimentaires d'exhaure. C'est le cas des oasis d'El Ferch, d'Oum Ettemer et d'Oued El Hallouf).
- Les sources : initialement et jusqu'au début du 20^{ème} siècle, l'unique disponibilité des eaux jaillissantes des sources naturelles était réservée à l'irrigation des oasis. De ce fait, les anciennes oasis se trouvent ainsi toutes localisées à proximité de ce type de source. La taille et l'aspect de ces oasis varient principalement en fonction du débit de ces résurgences naturelles et de la topographie du site.
- Le ghout (pluriel ghitan) : des sortes de cratères, appelés ghout, sont creusés par l'homme. Les palmiers sont plantés directement dans ces fossés et puisent directement leur besoin en eau de la nappe phréatique toute proche, telles les régions de Nefta et de Douz, la nappe phréatique était si proche de la surface qu'il n'était même pas besoin d'irriguer (Kassah, 2009).

- Les barrages de dérivation : ce sont des sources qui jaillissent dans le lit d'oued temporaire, à la faveur de failles plus ou moins profondes. Un petit barrage de dérivation est généralement construit à travers le lit de l'oued. Il est destiné à dévier vers les terres irrigables cette eau précieuse. les canaux suffissent à diriger les eaux de crue vers des terres arables et éviter leur déperdition dans les chotts et sebkha. On les trouve dans certaines oasis de montagnes, telles Chébika, Midès et Lalla.
- Les foggaras : les foggaras sont des galeries drainantes qui vont chercher l'eau de la nappe profonde par gravité à proximité d'un relief, un canal est creusé sous terre avec une légère pente, en direction des terres irrigables, loin en amont de l'oasis. C'est le cas des oasis d'El Guettar, d'El Ouediane et de la Presqu'île de Kébili.

Les différentes classifications des oasis tunisiennes constituent des entrées pour mieux aborder les différents aspects relatifs à leur développement. Elles se complètent et permettent de mettre en évidence les pressions subies et les potentialités disponibles.

1.3.2.3. Les rôles et les fonctions des oasis

Les écosystèmes oasiens remplissent des fonctions multiples d'ordre environnemental, économique et social.

La fonction environnementale

Le microclimat particulier dans les oasis permet la pratique d'une large diversité de cultures. Les oasis comprennent une richesse exceptionnelle de la biodiversité floristique et faunique, les systèmes oasiens ont montré un rôle essentiel dans le maintien de la diversité biologique, la lutte contre la désertification et l'adaptation aux changements climatiques. Ces écosystèmes agricoles constituent des véritables niches écologiques et conservatoires de la biodiversité (McNeely *et al.*, 1995 ; Thiollay, 1998 ; Selmi *et al.*, 2003).

La fonction économique

L'agriculture a toujours été une activité fondamentale dans les oasis et leurs alentours, ainsi le développement de la culture des dattes de la variété *Deglet Nour* a favorisé la commercialisation des produits agricoles oasiens. Les oasis se trouvent ainsi intégrées de plus en plus dans l'économie marchande et les échanges internationaux (Kassah, 2009). Les dattes *Deglet Nour* sont très appréciées et possèdent des caractéristiques organoleptiques spécifiques (goût, saveur, texture...) et elles sont exportées dans plus que 57 pays (GIZ, 2012). Les productions agricoles très variées dans les oasis constituent une monnaie d'échange avec les produits des autres régions agricoles.

La fonction sociale

Les oasis jouent un rôle social non négligeable, Les oasis assurent des emplois pour la population par l'activité agricole. On estime que l'agriculture oasienne fait vivre directement et indirectement 10 % de la population tunisienne (GIZ, 2012).

La fonction culturelle et patrimoniale des oasis

Les oasis peuvent être considérées à plusieurs titres comme un bien public. Elles constituent un patrimoine historique et culturel riche et varié. Ce patrimoine est relatif à la culture, à la biodiversité, à l'architecture, à la religion, au savoir-faire des agriculteurs dans l'irrigation et la conduite des cultures, et à la littérature. Les oasis du sud tunisien ont toujours été le point d'attachement de la population nomade dont l'activité a été principalement rattachée à l'élevage. L'oasis de Gafsa a même été récemment labellisée Système Ingénieux Patrimoine du Agricole Mondiale (SIPAM) la FAO par (http://www.fao.org/giahs/giahsaroundtheworld /designated-sites/near-east-and-northafrica/gafsa-oases/fr/). C'est la seule oasis à travers le monde à avoir reçu ce label jusqu'à présent.

1.3.2.4. Les menaces qui pèsent sur la durabilité des oasis

Il existe de nombreuses menaces qui pèsent sur le devenir des oasis et conduisent à se poser la question de leur durabilité, ainsi que la capacité de résistance et d'adaptation de ces systèmes complexes, ce qui engage le chercheur à préciser ce qu'est l'oasis aujourd'hui (Abdedayem et Veyrac-Ben Ahmed, 2014). En Tunisie comme dans beaucoup d'autres pays à travers le monde, Les écosystèmes oasiens sont menacés par tout un ensemble de facteurs biophysiques et socio-économiques complexes.

Les facteurs biophysiques

La principale menace est constituée par la diminution des ressources en eau dont dépend la vie de l'oasis (Jouve, 2012). En Tunisie et dans le pourtour méditerranéen, la première cause de cette diminution est la succession de périodes de sécheresse au cours des dernières décennies, les sources naturelles sont asséchées et les oasis sont intégralement irriguées par des pompages dans la nappe souterraine (Battesti, 2005). Ces sécheresses se sont traduites par un rabattement des nappes phréatiques entraînant une diminution des capacités d'exhaure. L'autre cause de diminution des ressources en eau est la création de nouvelles exploitations agricoles non loin des anciennes oasis constituant un fardeau pour les nappes phréatiques fragiles et menaçant de disparition les oasis traditionnelles, aussi la surexploitation des nappes aquifères par la multiplication incontrôlée des pompages.

Le développement urbain à proximité des oasis crée une concurrence pour l'eau au détriment des besoins de la palmeraie, donc l'eau est la menace majeure pour la durabilité du milieu oasien et elle ainsi devenue un facteur limitant et par conséquent un enjeu majeur sur le plan économique, social et politique.

D'autres causes liées au milieu biophysique peuvent également contribuer au déclin des oasis et affecter leur durabilité, en particulier l'ensablement et la salinisation des sols. En général l'ensablement ne concerne qu'une partie de l'oasis, ce qui conduit les agriculteurs à déplacer leurs parcelles et parfois leur habitation. Il réduit l'espace cultivable et entraîne une recomposition du territoire de la palmeraie. L'ensablement ne constitue pas pour les oasiens la menace la plus inquiétante pour la survie de leurs palmeraies (Jouve *et al.*, 2013). Un autre problème qui affecte les oasis est la salinisation du sol, ce problème est fréquent dans les oasis situées dans les régions où l'aridité est forte, là où les eaux d'irrigation sont plus chargées en sels et où l'évapotranspiration est forte.

Les facteurs socio-économiques

A ces facteurs biophysiques, il faut ajouter ceux de nature socio-économique qui viennent fragiliser le fonctionnement des oasis et affecter leur durabilité. La diversité des fonctions du territoire oasien n'est que peu prise en compte (Abdedayem, 2015). Sur le plan économique, les politiques de libéralisation qui se sont accélérées à la fin des années 1990 (Gana, 2008) contribuent à remettre en question la place des oasis anciennes dans le développement du sud de la Tunisie. Prenons l'exemple de Tozeur où l'extension des superficies irriguées en monoculture de palmiers *Deglet Nour* répond aux objectifs de politiques favorisant les cultures irriguées d'exportation. Le développement de l'activité touristique, avec un aéroport international et une zone d'hôtels dans les années 1990, vise à diversifier le produit touristique national. Par contre sur le littoral de Gabès à partir des années 1970, il s'agit de valoriser les ressources minières à l'échelle nationale, avec la création d'une zone industrielle à côté du port commercial et d'une cimenterie dans l'intérieur du gouvernorat (Carpentier, 2017). Ces politiques donnent la priorité au développement des activités de services, au détriment des territoires oasiens historiques, qui apparaissent marginalisés et concurrencés.

L'évolution générale des oasis a fait qu'un nombre de plus en plus important de familles n'ont pu subvenir à leurs besoins avec les seules ressources et revenus de l'oasis. Elles ont dû avoir recours à l'émigration pour compléter ces revenus. Cette émigration massive eu plusieurs conséquences comme la pénurie de la main d'œuvre et notamment de main-d'œuvre qualifiée (CNEARC, 2003) ce qui explique l'entretien déficient de nombreuses palmeraies et de leur système d'alimentation en eau.

Le thème principal d'intervention en matière de renforcement de cette durabilité consiste-til à améliorer les conditions de mobilisation et d'usage de l'eau ? Une fois la mobilisation de l'eau améliorée, il est alors possible d'entreprendre la régénération des palmeraies dégradées (Jouve *et al.*, 2005). Jusqu'à présent le gouvernement tunisien et les services agricoles ont mis en place d'importants moyens pour le développement et le maintien de ce type d'agrosystème afin d'améliorer les conditions socio-économiques des populations locales : création de nouveaux périmètres irrigués « modernes », réalisation de nombreux forages pour l'accès aux nappes phréatiques profondes, aides financières pour l'accès à la propriété, appui par des formations de vulgarisation des techniques agricoles.

1.3.2.5. La stratégie de développement durable suivie pour les oasis tunisiennes

Le développement durable est la notion qui définit le besoin de transition et de changement dont a besoin notre planète et ses habitants pour vivre dans un monde plus équitable et pour assurer la subsistance et la continuité de la société. Dans les sociétés rurales, il se traduit par une volonté d'accroitre la production, de dégager des surplus commercialisables et d'obtenir un meilleur rendement et une augmentation des revenus (Janty, 2014). Le développement durable qui serait la clé même de pérennité de l'humanité, devrait donc s'inspirer du modèle oasien, en tant qu'étalon pratique de base (Fassi, 2017).

Les territoires oasiens tunisiens font l'objet d'une double marginalisation : politique, avec un modèle national qui ne pense pas le développement dans ces territoires, et économique avec la mise en concurrence des espaces productifs pour l'accès aux ressources et au marché. Considérés par les pouvoirs publics comme structurellement inadaptés aux exigences de la modernité et du développement national (Battesti, 2005 ; Bras, 1996), les territoires oasiens sont gérés comme des périmètres irrigués comme les autres, « zones d'ombres » d'un développement national (Battesti, 2005 ; Gachet, 1987) fondé sur la métropolisation et la littoralisation des activités (Belhedi, 1999). La diversité des fonctions du territoire oasien n'est que peu prise en compte (Abdedayem, 2015). Développer, renforcer l'efficacité des systèmes oasiens locaux, les adapter aux nouvelles évolutions socio-économiques régionales, nationales et internationales, tel est l'enjeu du Développement selon l'Etat, ses propres institutions et leurs coopérations avec des organismes étrangers.

Sur le plan économique, les politiques de libéralisation qui se sont accélérées à la fin des années 1990 (Gana, 2008) contribuent à remettre en question la place des oasis anciennes dans le développement du sud de la Tunisie.

À Tozeur, dès l'indépendance, et en continuité des politiques coloniales, l'extension des superficies irriguées en monoculture de palmiers *Deglet Nour* répond aux objectifs de politiques favorisant les cultures irriguées intensives d'exportation.

Le constat de crise des systèmes oasiens pose la question non seulement de la durabilité du milieu oasien, mais plus largement de sa capacité à se maintenir en territoire. La société oasienne tunisienne a su développer des techniques de gestion durable de l'écosystème oasien. Pour ce faire, des outils de travail appropriés ont été développés. Au début des années 70, la mise en application du Plan Directeur des Eaux du Sud (Ministère de l'Agriculture, 1975) a porté principalement sur la création de nouveaux périmètres irrigués, la création de nouveaux forages surtout dans les anciennes oasis qui souffrent de sécheresse, le renouvellement du sol par des pratiques locales innovantes, et la conversion des plantations anciennes particulièrement axée vers la variété *Deglet Nour* destinée à l'exportation, les grandes exploitations spécialisées de l'exportation de dattes *Deglet Nour* sont considérées comme les « territoires gagnants » du développement oasien (Chaléard, 2008).

Phase	Première tranche (1980-86)	Deuxième tranche (1984-91)	Plan Directeur des eaux du Nefzaoua		
Sauvegarde/Rénovat ion (Djérid, Nefzaoua et Gabès)	7 oasis : 3 200 ha	122 oasis : 16 800 ha	50 oasis : 4 300 ha		
Nouvelles créations	5 oasis : 2 100 ha	700 ha	6 oasis : 500 ha		

Tableau 2 : Oasis concernées par le Plan directeur des eaux du Sud –PDES (1980-91)

Source : Gharbi (2009)

Depuis la révolution en 2011, la multiplication des associations de protection de l'environnement et de développement local a contribué à la diversification des acteurs concernés (Carpentier *et al.*, 2017), fondée sur la réhabilitation du milieu oasien par la mobilisation des savoir-faire traditionnels et la promotion de pratiques agro-écologiques.

Les acteurs associatifs oasiens visent une remise en question du modèle moderniste et proposent des innovations dans le cadre d'une recomposition du modèle traditionnel. La capacité de ce modèle à contrecarrer les dynamiques caractérisées par la disparition du milieu semble cependant fortement liée au soutien des pouvoirs publics. La durabilité de ce modèle oasien alternatif est centrée sur la diversification de la dynamique agricole, garante de l'intégrité du milieu et du paysage (Carpentier *et al.*, 2014).

L'appui technique de la FAO a concerné les grands programmes nationaux de mobilisation et de conservation des ressources naturelles pour assurer une production agricole durable. L'assistance de la FAO à travers les projets des fonds fiduciaires a accordé une importance considérable aux ressources naturelles et aux oasis tunisiennes. La production des végétaux a bénéficié des apports et résultats des projets de la FAO en matière de renforcement des capacités en vulgarisation (approche et outils), en protection des plantes (techniques de lutte biologique, appui institutionnel, lutte anti-acridienne, gestion des stocks de pesticides et lutte intégrée.

La culture du palmier a aussi bénéficié des résultats des projets FAO, qui se traduit par le renforcement des capacités en matière de surveillance et de prévention des maladies (bayoud, charançon rouge) ou d'amélioration de la qualité pour promouvoir l'exportation de dattes (ensachage, traitement après récolte et signes de qualité).

2. Etat de l'art : télédétection et végétation

La faible densité de réseaux d'observations de l'état de la végétation des oasis a motivé l'utilisation de la télédétection comme source principale de production de données. Le suivi spatio-temporel de la couverture végétale des oasis tunisiennes dans les régions arides et semi-arides à l'aide d'imageries satellitaires est d'une importance capitale pour un inventaire régional de ce couvert végétal, ainsi que sa variation spatiale et interannuelle.

2.1.1. La télédétection

La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans) sans contact direct avec celleci notamment par l'acquisition d'images. Elle permet des observations régulières, répétitives et objectives de la quasi-totalité de la planète, dans plusieurs domaines de longueur d'onde (Vintrou, 2012).

La télédétection et le traitement d'images satellitaires se sont imposés comme des outils de cartographie les plus rapides, les plus précis et les plus fiables pour l'humanité, particulièrement lorsqu'il s'agit des zones arides et désertiques où les conditions sont souvent défavorables et inaccessibles compliquant le travail cartographique classique (Polidori, 1973). La télédétection se définit comme l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci, c'est une technique indispensable du fait de sa capacité à fournir des informations synoptiques à différentes échelles spatio-

temporelles (Gascon, 2001). Ce qui est approuvé aussi par la FAO en déclarant que : "Les données satellitaires permettent la collecte d'informations homogènes partout dans le monde, l'analyse de ces données pouvant être réalisée de la même façon à divers moments, ce qui permet d'avoir de meilleures estimations des changements. La télédétection ne remplace pas la collecte de bonnes données de terrain, toujours nécessaires, mais la combinaison de ces deux techniques donne de meilleurs résultats que l'une ou l'autre employée seule" (Koch, 2010).

2.1.1.1. La télédétection passive et la télédétection active

Deux types d'acquisition se distinguent : l'acquisition passive lorsque le rayonnement électromagnétique provient d'une source naturelle comme le soleil et l'acquisition active lorsque le rayonnement provient d'une source artificielle, comme le capteur lui-même (**Error! Reference source not found.** 5). En télédétection passive, le rayonnement est réfléchi par la surface terrestre dans les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge, qui appartiennent au domaine optique. En télédétection active, le rayonnement est émis en direction de la surface terrestre par le capteur et rétrodiffusé (renvoyé) à ce dernier dans les longueurs d'onde du domaine des hyperfréquences (capteurs RADAR – Radio Detection And Ranging). Notons que la télédétection active n'est que très faiblement sensible aux conditions atmosphériques et d'illuminations. Ainsi, de nuit comme de jour, Le capteur actif a l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison, alors que la télédétection passive dépend de l'ensoleillement (pas d'acquisition exploitable la nuit) et est très sensible aux conditions atmosphériques et en particulier à la présence de nuages (Centre canadien de télédétection, 2015).



Figure 5 : Télédétection passive (a) et télédétection active (b)

2.1.1.2. Les données acquises dans le domaine optique

Les capteurs optiques sont caractérisés selon leur résolution spatiale, spectrale et temporelle qui varient selon les domaines d'application (Xie *et al.*, 2008 ; Girard & Girard, 1999). Dans le domaine des hyperfréquences, les radars sont caractérisés selon leur résolution spatiale et temporelle ainsi que par leur fréquence d'émission, leur polarisation d'émission et de réception et leur angle d'incidence.

La résolution spatiale

La résolution spatiale d'un capteur correspond à la taille du plus petit objet perceptible dans une image pouvant être identifié au sol, ce qui correspond en télédétection à la taille des pixels d'une image satellite. Généralement la résolution spatiale est exprimée en mètre (m). La capacité à distinguer deux objets voisins différents dépend donc de la résolution spatiale du capteur. Celle-ci peut varier du kilomètre, pour des capteurs à basse résolution spatiale (BRS), tels que NOAA AVHRR, SPOT Vegetation...), utilisés le plus souvent pour des applications météorologiques ou pour cartographier la couverture terrestre à l'échelle globale, au mètre pour des capteurs à haute et très haute résolution spatiale (HRS et THRS), tels que SPOT, Sentinel2, Pléiades..., utilisés pour étudier des objets géographiques fins de type parcelle agricole par exemple (Dusseaux, 2014).

La résolution temporelle

La résolution temporelle ou répétitivité, qui correspond à la capacité de revisite d'un capteur sur un même site d'étude, était par principe purement technique de stockage inversement proportionnelle à la résolution spatiale. C'est la faculté d'un capteur à fournir des informations espacées dans le temps permettant de rendre compte d'un changement géographique (Robin, 1995).

Pour les images acquises dans le domaine optique, la résolution temporelle est altérée selon les conditions atmosphériques (couverture nuageuse) : une image peut être acquise tous les mois (résolution temporelle réelle) mais seulement une image tous les 6 mois peut être utilisée (résolution temporelle effective). Ainsi, il devient impossible de suivre l'évolution du couvert végétal lorsque le capteur ne possède pas de capacité de dépointage, la seule solution consiste à utiliser toutes les images disponibles en archive et à compléter ces séries temporelles par des images qui ont fait l'objet de programmation, prenons l'exemple des images Landsat qui sont prises de façon systématique tous les 16 jours sur un même site sans dépointage, qui peuvent être complétées par des images SPOT si elles existent, c.-à-d. si elles ont été achetées et programmées.

La résolution spectrale

La résolution spectrale correspond à l'aptitude du capteur à distinguer des rayonnements électromagnétiques de fréquences (=longueurs d'ondes) différentes. Etant donné que les objets n'absorbent pas tous la même partie du rayonnement solaire, le spectre du rayonnement réfléchi sera différent en fonction de chaque objet. Ainsi par exemple pour le visible, à chaque couleur correspond une longueur d'onde et par conséquent une fréquence précise. Elle est la seule information en télédétection qui est captée directement. Il s'agit d'un code d'identification qui est propre à chaque objet, comme « une empreinte digitale » (Desjardins, 2000). La résolution spectrale est définie par le nombre de bandes spectrales disponibles. Ainsi, un capteur multispectral tel que Quickbird ou SPOT, qui est caractérisé par un faible nombre de bandes spectrales (de l'ordre de 3 à 5 principalement) à large spectre (la largeur des bandes est supérieure à 100µm) possède une faible résolution spectrale. À l'inverse, un capteur hyperspectral tel que HySpex ou AVIRIS, qui est caractérisé par un nombre important de bandes spectrales (plus de 100) à spectre étroit (la largeur de bandes est de l'ordre du nm) possède une haute résolution spectrale. Plus la résolution spectrale est importante, plus la signature spectrale définissant l'objet au sol est précise et permet de bien discriminer les objets terrestres.

2.2. L'usage des images satellites pour la végétation

2.2.1. La signature spectrale de la végétation

En ce qui concerne la végétation saine, la chlorophylle absorbe l'énergie d'une longueur d'onde d'environ $0,45\mu m$ (bleu) et à $0,67\mu m$ (rouge) et a une réflexion plus importante à environ $0,55\mu m$ (vert) dans la gamme spectrale visible. C'est pourquoi nous percevons la végétation saine comme étant de couleur verte. Généralement, les bandes spectrales du rouge $(0,6-0,7\mu m)$ et du proche infrarouge $(0,7-1.5\mu m)$ sont les plus couramment utilisées pour étudier l'activité photosynthétique et chlorophyllienne de la végétation, leur densité, le rendement des cultures et la répartition spatiale des espèces (Xie *et al.*, 2008).

La réponse spectrale de la végétation est caractérisée par une faible réflectance dans la bande rouge (pic d'absorption de la chlorophylle), et une réflectance beaucoup plus élevée dans le proche infrarouge. Le domaine du moyen infrarouge (1,5-3µm) permet, quant à lui, d'estimer les teneurs en eau des milieux. Ainsi, il est très utilisé pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique. Toutefois, le stade phénologique, la densité et l'état hydrique de la végétation et le mode de gestion, ainsi que le sol sous-jacent influencent la réponse spectrale des couverts végétaux (Girard & Girard, 1999). Si la plante est sensible à un risque de maladie ou est menacée par un insecte, la concentration en chlorophylle de la feuille diminuera et conduira à moins d'absorption dans les bandes bleue et rouge. La feuille devient alors jaune en raison de l'augmentation de la réflectance rouge et bleue. Ainsi, plus la couverture végétale est dense, plus les valeurs de réflectance sont élevées dans le proche infrarouge et faible dans le rouge. L'évolution de la couverture végétale durant la saison végétative peut donc être étudiée en utilisant ces bandes spectrales (Figure 6).



Figure 6 : Répartition dans l'espace rouge/proche infrarouge (a) de pixels avec et sans couverture végétale et (b) d'un pixel de végétation au cours de la saison végétative (Source : Jensen, 2000)

2.2.1.1. Les données fournies par les images

Les données utilisées varient selon le ou les objectif(s) à atteindre mais aussi selon les caractéristiques du site d'étude (étendue du site et taille des parcelles).

Des études proposent des produits pour étudier la dynamique de la végétation et caractériser les propriétés phénologiques des plantes en utilisant des images de télédétection à haute et très haute résolution spatiale telles que les images Landsat (Madonsela *et al.*, 2007), SPOT5 (Zammit, 2008) ou Ikonos (Anchang, 2016). La taille du pixel se situe entre 30 m et 4 m. L'intérêt de l'utilisation de la haute et très haute résolution spatiale se trouve dans la précision de la délimitation des surfaces oasiennes. Mais les résultats dépendent étroitement de la disponibilité et de la date d'acquisition des images.

L'exploitation d'une image acquise au cours d'une même année permet d'identifier les oasis sur des surfaces de quelques centaines de km². Le traitement de séries temporelles composées d'une à trois images par an sur quelques années permet quant à elles, de déterminer l'évolution inter–annuelle des oasis en précisant leur durée et leur place dans les successions culturales et leur taux de recouvrement. Cependant, les informations dérivées de ces images ne sont pas très précises en raison du trop faible nombre d'image utilisé pour étudier correctement la caractérisation et l'évolution de la végétation d'une année à l'autre. La répétitivité limitée des capteurs enregistrant des images à haute résolution spatiale couplée à la fréquence de la couverture nuageuse constitue une limite forte non seulement pour

identifier les oasis, mais aussi *a fortiori* pour détecter les pratiques agricoles qui y sont effectuées (Rapinel *et al.*, 2014).

Plusieurs études menées avec des séries temporelles d'images provenant de capteurs à moyenne résolution, tels que MODIS, SPOT–Vegetation ou AVHRR ont montré l'intérêt et les limites de ce type de données pour l'étude de la végétation (Fan *et al.*, 2018 ; Testa *et al.*, 2018 ; Shao *et al.*, 2016 ; Peng *et al.*, 2017). D'une part, de telles images couvrent de larges superficies ce qui permet de réaliser des inventaires à l'échelle d'un pays, voire d'un continent (De Beurs & Henebry, 2010), les images de télédétection à moyenne et basse résolution spatiale (la taille du pixel varie entre 50 m et 8 km) peuvent fournir une information satisfaisante sur les surfaces oasiennes. Elles sont disponibles sur d'assez longues séries temporelles. Elles sont acquises à une fréquence journalière mais sont généralement utilisées sous la forme de synthèses hebdomadaires (Chuvieco *et al.*, 2008)

Plus rarement, les images hyperspectrales et les images multispectrales à très haute résolution spatiale sont utilisées pour étudier la végétation sur de longues périodes temporelles. Ainsi, des études ont montré l'intérêt des données LiDAR (Light Detection And Ranging) pour étudier et caractériser la structure de la végétation (Rapinel, 2012), ces données permettant, grâce à leur très forte résolution spectrale souvent combinée à une très bonne résolution spatiale, de discriminer des espèces végétales et de décrire finement l'état des couverts végétaux (Lausch *et al.*, 2013). Les données acquises plus récemment par des capteurs à très haute résolution spatiale tels que GEOEYE ou World View devraient permettre d'identifier et de caractériser finement l'état du couvert végétal (Rapinel *et al.*, 2014). Cependant, qu'il s'agisse des données hyperspectrales et/ou à très haute résolution spatiale, ces données présentent deux inconvénients : elles couvrent des surfaces réduites (quelques dizaines de km²) et leur coût est très élevé, ce qui limite leur fréquence d'acquisition. Ainsi, il n'est pas envisageable d'exploiter ces données pour inventorier les oasis et les pratiques qui leurs sont associées sur des étendues dont la taille est compatible avec la gestion des territoires agricoles à une échelle d'un pays tout entier.

Plusieurs critères sont à prendre en compte pour choisir le type d'images satellitaires adapté à la caractérisation de la dynamique de végétation dans les oasis. Si on admet que la moyenne résolution spatiale correspond à une résolution intermédiaire entre la haute résolution (définie par un pixel de taille inférieure ou égale à 30 m et supérieure à 5 m) et la basse résolution (définie par un pixel de taille supérieure ou égale à 1 km), le capteur MODIS est l'un des deux seuls capteurs avec MERIS permettant de disposer de données dans cette classe de résolution spatiale (Lecerf, 2008).

A l'échelle globale, la littérature montre que le suivi de la croissance végétale se fait à partir de capteurs tels que MODIS, embarqué à bord du satellite Terra, grâce à la haute fréquence temporelle de ces images à moyenne résolution spatiale (Doraiswamy *et al.*, 2004 ; Hountondji *et al.*, 2006 ; Carrão *et al.*, 2008). A l'échelle régionale, avec des images à haute résolution spatiale comme Landsat (30 m), on peut également suivre des zones de culture en utilisant des séries temporelles durant la saison de croissance des plantes (Ippoliti-Ramilo *et al.*, 2003 ; Lowry *et al.*, 2007). Enfin, avec des images comme celles acquises par des satellites tels que SPOT5 (Figure 7), il est possible d'élaborer un suivi très fin, à l'échelle de la parcelle (El Hajj *et al.*, 2009) avec une répétitivité décadaire à mensuelle mais les coûts engendrés sont rarement compatibles avec les budgets civils.



Figure 7 : Principaux capteurs de la basse à la très haute résolution spatiale fournissant des images dans le domaine du visible et de l'infrarouge (Source : Jacquin, 2010)

2.2.2. Le suivi de la végétation par télédétection

Les changements dans la végétation ont été surveillés à l'aide de diverses données (Fan *et al.*, 2018). Les images satellitaires donnent la possibilité de mesurer et de surveiller de manière systématique à différentes échelles spatiale et temporelle l'état de couverts végétaux (Beuchle *et al.*, 2015). Parmi les différentes informations que l'on peut extraire des images

satellitaires, les indices de végétation, construits par combinaison des valeurs de réflectance dans les longueurs d'ondes liées aux caractéristiques spectrales de la végétation, sont les plus utilisés (Jacquin, 2010). L'analyse des variations spatiales et temporelles de différents indices de végétation permet de caractériser les dynamiques des couverts végétaux (Anyamba & Tucker, 2005). L'imagerie satellite à moyenne et basse résolutions spatiales est utilisée de manière régulière depuis bientôt une trentaine d'années pour étudier la biosphère terrestre sur de vastes étendues. A l'échelle de la planète, les satellites « grand champ » permettent de suivre les variations saisonnières et annuelles des couverts végétaux. L'arrivée des nouvelles images de télédétection à haute résolution et très haute résolution spatiale permettent la perception d'une nouvelle gamme d'objets au sol non observables jusqu'à maintenant.

La dynamique de la végétation

Les successions dynamiques de la végétation constituent un des mécanismes naturels majeurs de l'évolution de la couverture végétale. L'étude du dynamisme de la végétation est particulièrement importante pour comprendre les possibles évolutions. La végétation, perturbée par l'action de l'homme, les incendies, ou par les catastrophes telles que : éboulements, volcanisme, etc., se transforme pour chercher un état d'équilibre avec les conditions de l'environnement. Elle passe alors par des étapes successives qui constituent une série de végétation (Saïdi, 1984).

Les changements significatifs traduisant une modification de l'activité d'un couvert végétal et/ou une modification de sa structure ont permis de définir des classes de changement auxquelles des dynamiques de végétation peuvent être associées quelle que soit l'intensité des perturbations.

Lorsque l'on s'intéresse à la caractérisation des dynamiques de végétation pour suivre l'état actuel des oasis, les changements recherchés peuvent être de deux natures différentes :

1) des changements lents dans l'activité végétale du type de végétation étudiée (modification dans le niveau de biomasse verte produite) ;

2) des changements lents dans la structure du couvert végétal (modification du taux de recouvrement d'une strate de végétation, modification dans la composition des espèces) (Jacquin, 2010).

Parmi les techniques d'analyse de changement, deux approches se distinguent (Kennedy *et al.*, 2009) : La comparaison de deux ou plusieurs images basée sur deux phases, une dite de « modélisation » (algorithmes permettant d'exploiter la dimension spectrale des images) et une dite de « soustraction » (algorithmes pour comparer des dates), et l'autre d'exploitation d'une série temporelle d'images basée sur l'identification de signatures temporelles.

Les principales limites qu'ils mentionnent sont la nature des changements mis en évidence qui concernent uniquement des conversions de type de végétation et l'écart entre les pas de temps considérés pour caractériser l'état et la dynamique de la végétation dans les oasis. D'après la synthèse proposée par Kennedy *et al.* (2009), les méthodes basées sur l'analyse de série d'images satellitaires à haute répétitivité temporelle (NOAAAVHRR, SPOT-VEGETATION, TERRA-MODIS, ENVISAT-MERIS) constituent une meilleure source d'information pour la dynamique de la végétation. Le principe repose sur le suivi des variations intra- et interannuelles d'indices de végétation (Bai *et al.*, 2005 ; Zhang *et al.*, 2003).

2.2.3. Les variables dérivées des images optiques pour le suivi des oasis

Les oasis peuvent être étudiées à travers l'utilisation de paramètres dérivés des images de télédétection, le plus souvent par le calcul des indices de végétation à partir des mesures directes de réflectance (Figure 8).

2.2.3.1. Les indices de végétation

Au cours des dernières décennies, de nombreux indices de végétation ont été développés. Les indices de végétation sont principalement basés sur le comportement spectral de la végétation dans les canaux du Rouge (R) et du Proche InfraRouge (PIR) (Viña *et al.*, 2011). Ils prennent la forme soit d'expressions mathématiques très basiques (simple différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes. Ainsi, certains de ces indices de végétations permettent d'évaluer certains paramètres physiques du couvert comme la biomasse, la capacité de photosynthèse des végétaux, la teneur en eau, et à travers eux des processus plus globaux comme la désertification et le suivi de la dynamique de la végétation. D'autres indices, eux, ont été développés pour étudier la structure de la canopée. Il peut s'agir d'indices de végétation bruts ou normalisés.

L'un des plus utilisés est le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Il a été créé par Rouse (1973), puis repris à de nombreuses reprises. Il s'agit de l'indice le plus couramment utilisé dans la recherche environnementale (Ren *et al.*, 2018). L'indice NDVI permet de suivre l'activité chlorophyllienne des végétaux, par le biais de la réflectance dans le rouge et dans le proche infrarouge. Concrètement, il est calculé de la manière suivante :

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

Où PIR est la réflectance dans le proche infrarouge, et R celle dans le rouge.

De manière générale, l'évolution temporelle du NDVI est très liée aux variations atmosphériques comme la variation en aérosols et en nuages. Puisque, l'influence des aérosols, dont la présence est en partie due à la combustion de biomasse, et des nuages limitent fortement l'interprétation des observations réalisées par les satellites. Par ailleurs, cet indice souffre de limitations dues à la saturation aux hauts niveaux de biomasse.

Le NDVI, prenant des valeurs entre -1 et 1, (Martín-Sotoca *et al.*, 2018) a tendance à saturer pour des valeurs supérieures à 0,80. En fait, lorsque le milieu forestier devient de plus en plus dense, les valeurs de réflectance dans le rouge ne peuvent plus s'abaisser au-dessous d'une certaine limite, rapidement approchée, pendant que celles du proche infrarouge continuent à s'élever plus longtemps. Il en résulte donc une saturation aux environs de la valeur 0,80. A partir de cette valeur, on considère que le NDVI n'est plus en mesure de discriminer de façon convenable l'activité chlorophyllienne.



Figure 8 : Exemple d'image de NDVI calculé sur des périmètres irrigués oasiens à partir de l'image SPOT5 (Take5) du 12/04/2015

Il y a des indices plus anciens et plus élémentaires mais dont l'utilité est très limitée. Parmi ceux-ci, on peut citer le Difference Vegetation Index (DVI) ou le Ratio Vegetation Index (RVI). Ils se calculent comme suit :

$$DVI = PIR - R$$

Et

RVI = PIR / R

Où PIR est la réflectance dans le proche infrarouge, et R celle dans le rouge.

L'inconvénient de ces indices est qu'ils sont extrêmement sensibles aux variations atmosphériques, ainsi qu'à la contribution spectrale des sols et la tendance à la saturation est bien plus importante que pour le NDVI.

Certains indices ont été développés afin de pallier ces perturbations. Parmi ceux-ci, on trouve, par exemple, l'Enhanced Vegetal Index (EVI). Historiquement, le développement de cet indice par Huete et al. (2002) est lié à celui du satellite MODIS. Il s'agit d'une amélioration de l'indice NDVI et permet donc de suivre l'activité chlorophyllienne en particulier dans les zones à forte biomasse végétative.

L'indice EVI s'appuie sur les réflectances dans le proche infrarouge du capteur et sur la bande bleue. Cette dernière est sensible aux conditions atmosphériques et est souvent utilisée pour des corrections d'artefacts dus à l'atmosphère (détection des nuages, brumes...). En fait, l'indice EVI ajuste la réflectance dans le canal rouge en fonction de celle dans le canal bleu. Il permet ainsi de réduire les effets atmosphériques (Adole *et al.*, 2018 ; Testa *et al.*, 2018). Cet indice se calcule de la manière suivante :

 $EVI = G^{*}((PIR - R) / (L + PIR + C1^{*}R + C2^{*}B))$

Où PIR est la réflectance dans le proche infrarouge, R celle dans le rouge et B celle dans le bleu

- G : facteur de gain (égal à 2,5)
- L : facteur d'ajustement des sols
- C1 et C2 : coefficients de correction de la diffusion atmosphérique

Cet indice présente de nombreux avantages comparativement aux précédents indices comme le NDVI. En effet, celui-ci tient compte de la contamination des pixels par les aérosols et par les effets du sol. L'indice EVI en prenant en compte les effets de sol, il permet de corriger, ou tout du moins réduire l'influence des sols sous-jacents aux couverts végétaux sur le signal mesuré au niveau du capteur satellitaire (Huete *et al.*, 2011). Ainsi, cet indice

montre une très faible saturation sur une année pour les valeurs élevées d'activité chlorophyllienne.

On peut également citer le Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI) créé par Huete (1988) dont l'équation mathématique est la suivante :

SAVI = (1 + L) (PIR - R) / (PIR + R + L)

Où PIR est la réflectance dans le proche infrarouge, R celle dans le rouge

L, le paramètre d'ajustement qui prend la valeur de 0,25 pour une forte densité et de 1 pour une très faible densité de végétation et 0,5 pour des densités intermédiaires.

Les influences de sol sont considérablement réduites par rapport au NDVI et au PVI. Cependant, en ce qui concerne une faible densité de végétation, la réflectance du sol augmente dans les bandes rouge et infrarouge.

Pour cerner au mieux ce système de sol-végétation et réduire l'effet du sol nu au minimum, on trouve encore le Modified Soil-Adjusted Vegetation Index (MSAVI) a été développé par Qi *et al* en 1994, et le Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index (TSAVI) proposé par Baret en 1989. Ces indices introduisent des paramètres de corrections basés sur la droite des sols.

Du fait que le NDVI est considérablement influencé par la dispersion et l'absorption atmosphérique, Kaufman et Tanré (1992 et 1996) ont développé un index de végétation résistant à l'atmosphère (ARVI). Comparé au NDVI, la résistance à l'effet atmosphérique de l'ARVI est réalisée par un processus d'autocorrection sur la bande rouge. La différence entre les bandes rouge et bleue réduit au minimum les effets de la dispersion atmosphérique par des aérosols dans la bande rouge. Comme l'ont précisé ces auteurs, l'ARVI a la même gamme dynamique que le NDVI mais est quatre fois moins sensible aux effets atmosphériques que le NDVI. Cet index est calculé comme suit

$$ARVI = (PIR - \rho) / (PIR + \rho)$$

avec $\rho = R - \gamma (B - R)$

Où PIR est la réflectance dans le proche infrarouge, R celle dans le rouge, B celle dans le bleu

 γ , un facteur d'autocorrection atmosphérique dépendant du type d'aérosols. Il est calculé à partir des réflectances dans les bandes bleue et rouge.

D'autres indices de végétation permettent d'extraire des informations différentes. Par exemple, le Normalized Difference Water Index (NDWI) proposé par Gao (1996), est un

indice de stress hydrique permettant notamment d'estimer la teneur en eau du feuillage des couverts forestiers. Celui-ci utilise également deux bandes, à savoir, le proche infrarouge et le moyen infrarouge. L'utilisation du moyen infrarouge permet de s'affranchir, en partie, de l'effet des sols.

Le NDWI se calcule de la manière suivante :

NDWI = (PIR - MIR) / (PIR + MIR)

Où PIR est la réflectance du proche infrarouge, et MIR celle du moyen infrarouge.

2.2.4. L'analyse d'une image

Le but de l'analyse d'une image est de fournir une description quantitative de celle-ci ou une reconnaissance de forme, utile si les caractéristiques morphologiques de l'image sont liées aux propriétés de l'objet. L'étude de la dynamique du couvert végétal est axée sur la bonne représentation des principales unités de végétation sur une image. Cette représentation dite « classification » est utilisée pour la production de cartes thématiques où elle offre une analyse plus détaillée de l'image : l'information télédétectée, désignée par « carte thématique » est obtenue et sera évaluée à partir d'un espace multidimensionnel représentatif de l'image par rapport à la réalité de terrain. La classification peut être effectuée sur un ou plusieurs caractéristiques de rétrodiffusion ou de signature spectrale (Abdelbaki, 2012). Il y a deux approches de classification en télédétection : l'une est supervisée en se basant sur des méthodes thématiques, et l'autre est non supervisée, basée sur des logiciels incluant des algorithmes spécifiques pour la classification (Abbassi, 2009).

2.2.4.1. La classification non supervisée

C'est classer des données d'image numérique, où les individus sont les pixels, par traitement informatique basé uniquement sur les statistiques d'image sans recours à des échantillons d'entrainement. Cette classification produit un regroupement naturel des pixels de l'image que l'on nomme « regroupement spectral » ou « classe », les régions de l'image ayant une même signature spectrale ont un type d'utilisation du sol similaire. L'analyse doit ensuite déterminer l'identité de ces regroupement spectraux. Les principaux algorithmes de classification non dirigée sont : le regroupement par moyennes-K (K-means), le regroupement par ISODATA (Girard & Girard, 1999).

2.2.4.2. La classification supervisée

L'analyse du changement est une comparaison spatiale, spectrale, thématique et temporelle de deux ou plusieurs images satellites prises à des dates différentes, ou d'une image satellite et une carte numérique, ou de deux ou plus couvertures des terres de la même zone géographique produites à partir des données de télédétection qui sont prises à des moments différents (Li *et al.*, 2002). D'après Singh (1989), la définition de la détection des changements est le processus d'identification et quantification des différences temporelles dans l'état d'un objet ou d'un phénomène existant sur la surface de la Terre en l'observant à des dates différentes ayant pour but de repérer, de mettre en évidence et enfin, de comprendre son évolution temporelle.

Il y avait des points communs entre les méthodes de détection des changements étudiées dans plusieurs travaux (Hall & Hay, 2003 ; Feranec *et al.*, 2007 ; Nussbaum & Niemeyer , 2007 ; Niemeyer *et al.*, 2008 ; Jianya *et al.*, 2008), une grande variété de méthodes numériques et de techniques de détection des changements a été développée au cours de ces trois dernières décennies. Fondamentalement les méthodes de détection de changement sont regroupées au niveau de la notion appliquée à l'analyse d'image en trois catégories principales:

(1) Au niveau des pixels, elle se réfère à des valeurs numériques de chaque bande spectrale ou à des calculs entre deux bandes spectrales d'images, par exemple la différence d'images, le rapport d'images, l'Analyse Vectorielle des Changements (CVA), etc. ;

(2) Au niveau des primitives (forme, texture, etc.), elle consiste à transformer les propriétés spectrales ou spatiales d'images, par exemple la différence d'indices de végétation NDVI, la ACP, etc. ;

(3) Au niveau des objets, le niveau le plus haut pour le traitement d'image est par exemple la comparaison de post-classification, la classification multi-temporelle, la classification orientée objet, etc. (Matikainen *et al.*, 2004 ; Blaschke, 2005 ; Niemeyer *et al.*, 2008 ; Wang *et al.*, 2009). Ce troisième niveau (niveau des objets) est le plus important et intéressant à développer parce qu'il regroupe les trois points de vue (géométrique, topologique, attributaire ou sémantique) d'un objet géographique dans les SIG.

2.2.5. L'analyse d'une série temporelle d'images

2.2.5.1. La classification de séries temporelles de données de télédétection

Des séries temporelles de variables issues de données de télédétection acquises par des capteurs à haute répétitivité temporelle comme MODIS ou Sentinel2 peuvent être utilisées pour identifier et caractériser les systèmes oasiens. Cela nécessite, d'une part, de sélectionner les variables les plus pertinentes parmi l'ensemble de celles qu'il est possible de dériver des images de télédétection (indices de végétation, humidité de sol, etc.) et d'autre part, d'effectuer une classification des profils temporels de ces variables.

Les profils temporels

Les profils temporels varient selon la localisation du site d'étude (hémisphère nord vs hémisphère sud) et les conditions climatiques (altitude, proximité à la mer...).

L'étude de la dynamique du cycle végétatif des oasis est basée sur l'analyse des variations des profils temporels intra et interannuelles de NDVI, mesurées à partir d'une série temporelle d'images MODIS ou Sentinel2. Nous faisons l'hypothèse qu'à partir des profils temporels du NDVI des parcelles étudiées, on peut élaborer une typologie des oasis en fonction de leurs caractéristiques propres (diversité des espèces cultivées, organisation spatiale des plantations et des parcelles, âge, systèmes et tours d'irrigations...).

Les oasis sont caractérisées par une grande diversité de profils temporels selon la localisation et le type de l'oasis et selon l'état de la végétation et le mode d'irrigation réalisés.

Analyse de la séparabilité entre les classes

Dans le domaine de la télédétection, la distance euclidienne, la distance de Mahalanobis, la distance M-statistic, la divergence, la divergence transformée, la distance de Jeffries-Matusita et la distance de Bhattacharyya sont les plus couramment utilisées pour mesurer la séparabilité entre classes (Richards, 2012).

Dans le cadre des séries temporelles, la distance euclidienne qui est une distance géométrique, calcule la séparabilité entre deux classes en comparant les différences date par date des valeurs des variables (valeurs moyennes des classes) alors que les autres mesures s'appuient aussi sur les distributions des valeurs, permettant par exemple de prendre en compte la variance.

Certaines de ces méthodes calculent la séparabilité entre deux classes en utilisant plusieurs variables à la fois, tandis que d'autres méthodes (la distance euclidienne, la distance de Mahalanobis, la distance M-statistic) calculent la séparabilité entre deux classes d'une seule variable. Certaines de ces mesures (la distance euclidienne, la distance de Mahalanobis, la distance M-statistic, la divergence et la distance de Bhattacharyya) ne possèdent pas de bornes minimum et maximum : l'indice de séparabilité augmente tant que la distance entre la moyenne des classes progresse même quand le seuil de 100% de séparabilité est atteint. Au contraire, la divergence transformée et la distance de Jeffries-Matusita possèdent des bornes minimum et maximum. Par contre, il a été montré que ces deux dernières mesures ont tendance à maximiser les valeurs de distance quand la séparabilité est faible et à les minimiser quand la séparabilité est forte (Thomas *et al.*, 1987). Ainsi, le choix de la méthode est en fonction du jeu de données considéré.

La distance euclidienne sera utilisée pour comparer des données univariées (un seul paramètre à comparer) alors que la divergence transformée, plus simple à calculer que la distance de Jeffries–Matusita, sera utilisée pour comparer des données multivariées (plusieurs paramètres à comparer).

La classification de séries temporelles

La classification a pour objet de regrouper les objets en classes dont les caractéristiques, et le contenu, sont déterminées non apriori comme dans l'analyse discriminante, mais par les données elles-mêmes.

Toute méthode automatique de classification est ainsi basée sur une mesure de « similarité – dissimilarité » entre objets, une mesure de « similarité – dissimilarité » entre classes est une stratégie d'agrégation qui permet de construire les classes. De nombreuses stratégies méthodes de classification sont disponibles dans les logiciels statistiques standards : méthodes de partitionnement (K-means, nuées dynamiques etc.), cartes autoorganisatrices de Kohonen (« self organizing maps »), méthodes hiérarchiques descendantes et ascendantes, etc. Les méthodes de classification ascendante hiérarchique (CAH) construisent, à partir des n individus de la population, des partitions successives emboîtées. Ces partitions ont la propriété de pouvoir être représentées dans un arbre de classification appelé « dendrogramme » où la proximité entre deux individus ou deux classes peut se mesurer par la hauteur à laquelle ils ou elles se rejoignent pour former un seul groupe.

Des centaines de distances ont été proposées pour classer des données d'enquêtes, parmi lesquelles la distance euclidienne est la plus populaire.

2.2.5.2. Les méthodes de détection des changements

Dix aspects des applications des méthodes de détection de changements utilisant des images de télédétection sont résumés dans ces travaux (Adams *et al.*, 2004 ; Lu *et al.*, 2004 ; Sui *et al.*, 2008 ; Jianya *et al.*, 2008 ; Gao, 2009) :

- (1) Détection des changements de la forêt ou de la végétation ;
- (2) Détection des changements de l'occupation et l'utilisation du sol ;
- (3) Evaluation des dommages en cas des catastrophes, la mortalité de la forêt, etc. ;
- (4) Déforestation ;
- (5) Incendies de forêt ;
- (6) Changement des zones humides ;
- (7) Changement des zones urbaines ;
- (8) Changement du paysage ;
- (9) Changement de l'environnement ;

(10) Autres applications telles que la surveillance des cultures et les changements dansl'équilibre de masse des glaciers, etc.

La bibliographie récente est riche en recherches sur l'application de la méthode de détection des changements de la couverture végétale et de l'occupation des terres : par exemple Meera Ghandhi *et al.* (2015) ; Lu *et al.* (2016) ; Kim *et al.* (2017).

Au niveau de la dimension des changements, la détection de changements peut être divisée en deux catégories principales de méthodes (Lu *et al.*, 2004 ; Sui *et al.*, 2008) :

(1) Changement pour des données de dimensions deux (2D), par exemple: détection de changement des bâtiments, des routes et champs agricoles entre deux images satellites, ou entre une image et une carte, etc. ;

(2) Changement pour des données de dimensions trois (3D), par exemple : reconstruction des paysages ou des bâtiments 3D par des images LIDAR, RADAR, multi-spectrales, etc.

La détection de changements de dimensions deux (2D) est la plus fréquente et la plus commune dans la plupart des travaux.

Au niveau de l'automatisation des méthodes de détection de changements, elles sont regroupées en trois catégories :

(1) Non-automatique : par interprétation visuelle d'images, cette technique est utilisée pour la génération et la détection de changements dans la base CORINE Land Cover (CLC2000) sur des images satellites LANDSAT ETM (Feranec *et al.*, 2007) ;

(2) Semi-automatique : par exemple, une comparaison interactive avec une méthode d'extraction semi-automatique des primitives entre des images satellites LANDSAT ETM et

des données topographiques (Armenakis et al., 2002), par une classification orientée objet (Nussbaum et al., 2007);

(3) Automatique : par exemple, une méthode de classification orientée objet ou supervisée en appliquant une méthode d'extraction automatique des échantillons d'apprentissages des données des SIG pour éviter l'intervention d'un opérateur humain ou par une analyse spatiale des relations topologiques entre deux objets géographiques d'images satellites et d'une carte numérique (Wang *et al.*, 2009).

Cependant, certains changements sur la surface de la Terre ne peuvent pas être détectés par des données de télédétection parce que ces données sont limitées par les résolutions (spatiale, temporelle, spectrale et radiométrique). Il est clair que des changements, pour être détectés par des images satellites, doivent satisfaire aux exigences de la résolution spatiale, spectrale et temporelle, les résolutions des satellites ne cessant pas de s'améliorer (Niemeyer *et al.*, 2008),

Les SIG sont aussi des outils très utiles dans de nombreuses applications de détection des changements, en particulier lorsque des données multi-sources, multi-résolutions et multi-temporelles sont utilisées (Lu *et al.*, 2004 ; Sui *et al.*, 2008).

Nous pouvons identifier deux catégories principales de changements au niveau des impacts des changements sur la surface de la Terre (Sui *et al.*, 2008) :

(1) Changements abrupts qui sont provoqués par deux causes principales : des catastrophes naturelles (inondation, tempête, etc.) et des activités humaines (déforestation, construction de zones bâties et routes, etc.) ;

(2) Changements "Normaux" qui sont provoqués par des animaux et des plantes (dommages causés à la végétation par des animaux ou autres, différentes phases et saisons de croissance du riz ou du blé, etc.).

2.3. Le suivi de la végétation dans les systèmes oasiens par télédétection

L'observation de la Terre par télédétection produit des données, qui souvent prennent la forme d'images, à partir desquelles il est possible d'extraire des informations décrivant l'état des surfaces terrestres. Les paramètres et les variables dérivés de ces images sont utilisés pour identifier et caractériser les oasis. Elles proviennent essentiellement d'un seul type de capteur encore appelé radiomètre qui fonctionne dans le domaine optique : visible, proche et moyen-infrarouge (Li *et al.*, 2017).

3. Le site d'étude : La région du Djérid

La région de Djérid ou encore le Bled Djérid (pays des palmes) est une région du Bas Sahara, au Sud-Ouest de la Tunisie, comprenant un ensemble d'oasis situées sur la bordure nord-ouest du Chott du même nom, la plus grande des sebkhas du Maghreb. Au Moyen Age, la région est appelée "pays de Qastîliya" dont la richesse a été vantée par de nombreux géographes arabes. Selon les auteurs, le terme de Qastîliya se réduit à la seule oasis de Tozeur qui en est le chef-lieu ou le plus souvent à l'ensemble des oasis du Djérid (Nefta, Tozeur, El Oudiane, El Hamma), mais elle peut aussi englober, comme le "Bled el Djérid" lui-même le Nefzaoua et Gafsa ou quelquefois même la région de Gabès (CNEA, 1976b).

3.1. Le cadre géographique

Couvrant une superficie totale de 6911 km², soit 3,6 % de la superficie de la Tunisie, la région d'étude est située dans le Sud-Ouest de la Tunisie, entre les latitudes 33°30'-34°30'N et les longitudes 7°30'-8°30'E (Figure 9). Cette région est limitée par la frontière algérienne jusqu'au la chaine montagneuse du Nord de chott dans la partie Ouest et rejoint au nord — Est la chaine Metlaoui-Gafsa et au Sud la plaine de Nefzaoua (Kébili) qui est une partie du grand Erg oriental saharien.

Le Djérid est caractérisé par deux vastes dépressions dites Chott el Gharsa et Chott Djérid. De plus cette région est bénéficiée par des oasis continentales occupant les deux flancs nord et sud de l'anticlinal de Draa Djérid (CNEA, 1976).

Administrativement, le Djérid correspond au territoire du gouvernorat de Tozeur et entouré au Nord-Est par le gouvernorat de Gafsa, à l'Ouest par la frontière algérienne, au Sud Est par les gouvernorats de Tataouine et de Médenine et à l'Est par le gouvernorat de Kébili (Tarki et al, 2012).



Figure 9 : Localisation de la zone d'étude

3.2. Le cadre géologique

La région est constituée d'une couverture sédimentaire allant du Crétacé inférieur au Quaternaire. Elle se caractérise par des affleurements du Crétacé inférieur présentant un faciès continental et lagunaire où dominent les argiles et les marnes avec des intercalations des roches compactes (Figure 10).

Le reste du Crétacé présente un faciès plutôt marin avec grès ou sable, mais surtout alternance régulière de marne et du calcaire dolomitique puis crayeux à siliceux.

L'Eocène est une pellicule mince et locale constituée essentiellement par une alternance de marne et de calcaire avec des bancs de gypse.

Le Mio-Pliocène gréseux, argilo-sableux et marneux est le plus souvent gypseux à son sommet.

Le Quaternaire est formé par des alluvions anciennes, les croûtes gypseuses et calcaires et par les différentes formes dunaires.

Sur le plan structural, la région constitue une zone de transition entre le système atlasique (les deux chaines de montagnes du gouvernorat) et le début du système saharien. Les chotts sont des anciennes zones de subsidence, ils constituent le contact entre ces deux systèmes. (Saidi, 2001).



Figure 10 : Carte géologique de la région de Djérid (Source : CRDA Tozeur « Carte géologiques 1/500000 » 2015)

3.3. Les caractéristiques climatiques

Le climat de la région de Djérid est aride avec généralement une température moyenne annuelle de l'air de 21,3°C et une évapotranspiration réelle d'environ 1700 mm.

Les précipitations régionales sont inégalement réparties dans toute la région et varient selon la saison avec une moyenne de 100 mm / an (Tarki *et al.*, 2012).

Le Djérid se situe à la limite des étages méditerranéens arides inférieurs et méditerranéens supérieurs.

Pour mieux cerner les différents paramètres climatiques, on s'est basé sur les données relevées à la station de Tozeur.

3.3.1. La température

La région de Djérid est caractérisée par des températures élevées. En effet, la moyenne annuelle dépasse 20°C. Le régime saisonnier est très contrasté puisque la température moyenne du mois le plus chaud (juillet) est supérieure à 32°C et celle du mois le plus froid (janvier) est de l'ordre de 12°C. L'amplitude thermique annuelle se situe aux alentours de 20°C. L'amplitude thermique entre les moyennes mensuelles maxima et minima avoisine 33°C. L'été est chaud avec des températures supérieures à 25°C à partir du mois de mai. La moyenne des maxima du mois le plus chaud se situe au-dessus de 40°C, l'hiver est doux avec des températures moyennes mensuelles toujours supérieures à 10°C (Tableau 3).

Tableau 3 : Répartition mensuelle de la température (°C) (2006-2018) pour la station de Tozeur

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
T°	22,4	22,3	22,6	22,2	22,6	22,1	23	22,5	23,2	22,9	23,4	22,4	22,8
TM°	28,4	28,3	28,7	28,1	28,5	28,3	29,1	28,6	29	28,4	29,3	28,5	29
Tm°	16,8	16,6	16,6	16,3	16,8	16,5	16,8	16,6	17,5	17,3	17,3	29	17,5

Source : CRDA Tozeur (2017)

T Température annuelle moyenne

TM Température moyenne annuelle maximale

Tm Température moyenne annuelle minimale

3.3.2. Les précipitations

La répartition de la pluviométrie dans la zone se caractérise par une période automnale et hivernale la plus pluvieuse et une période estivale sèche d'une durée de trois mois (Juin, juillet et Août) (CRDA Tozeur, 2013).

Le Djérid ne bénéficie que de très faibles volumes pluviométriques annuels. En effet, tout territoire situé au sud de la limite septentrionale du Chott el Gharsa reçoit des quantités inférieures à 100 mm par an.



Figure 11 : Évolution de la pluviométrie moyenne annuelle de la région de Tozeur (2000-2015)

La faiblesse de la pluviométrie (P) dans la région est conjuguée à une variation interannuelle. En effet, le total annuel le plus fort observé entre 1995 et 2013 a atteint 186 mm pour le secteur de Tamerza et 100 mm pour le reste du gouvernorat en 2007. Par contre, le total annuel le plus faible pour la même période est de 27 mm pour l'ensemble du gouvernorat en 2000 et en 2001.

Le nombre de jours de pluie par an est faible. Il est inférieur à 20 pour la moitié sud du gouvernorat. Cependant, il est compris entre 20 et 30 pour la moitié nord du gouvernorat.

Mois	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Précipitation (mm)	29,2	29,9	27	50	94,2	88	86	220	90	194	93,4	40,9	79,5	43

Tableau 4 : Répartition annuelles total des précipitations pour la station de Tozeur

Source : CRDA Tozeur (2017)

Ces précipitations sont variables dans l'espace. Elles décroissent en allant vers le Sud et l'Est. Elles varient beaucoup d'une année à l'autre. La répartition saisonnière des pluies fait apparaître l'automne comme étant la saison la plus pluvieuse suivie de l'hiver et du printemps. L'été est une saison sèche. La saison des pluies débute relativement tard pour l'ensemble du gouvernorat de Tozeur, en effet, la date du début de la saison des pluies se place à la troisième décade de septembre pour la partie méridionale du gouvernorat et à la deuxième décade de septembre pour la région située au nord de Chott el Gharsa. Par ailleurs, la fin de la saison des pluies est précoce (CRDA Tozeur, 2004)

3.3.3. L'humidité de l'air

L'humidité relative de l'air ou l'hygrométrie dépasse rarement 50% (Mamou, 1990). La région de Djérid se caractérise par une répartition saisonnière présentée dans le Tableau 5 : *Tableau 5 : Répartition mensuelle de la pluviométrie (année 2003/2004) pour la station de Tozeur*

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Humidité relative (%)	51,5	64,8	44,3	36,2

La moyenne annuelle de l'humidité de l'air est de l'ordre de 49%. La saison la plus sèche est l'été avec 36,2%, celle la plus humide est l'hiver avec 64,8%.

3.3.4. L'insolation

La région de Djérid se caractérise par une durée d'ensoleillement importante qui varie de 6 heures à 11 heures par jour (Figure 12). Cette variation est fonction de la latitude et de la saison.

La durée d'insolation varie d'un mois à un autre et d'une saison à une autre. Elle est maximale en juillet et minimale en janvier (Tozeur) avec 191,5 heures.

Le rapport entre l'insolation moyenne mensuelle maximale et l'insolation moyenne mensuelle minimale est presque égal à 2, ce qui est considérable pour engendrer une importante évapotranspiration.



Figure 12 : Courbe d'Heure de soleil de la région de Tozeur (CRDA, 2013)

3.3.5. Les vents

La région de Djérid totalise entre 30 et 40 jours de vents de sable par an. La moyenne annuelle de jours de sirocco est élevée avec 74 j/an. Ces vents sont responsables des fortes élévations de températures pendant la période estivale.

En hiver, les vents dominants soufflent de l'Ouest. Par contre, les vents de l'Est dominent au cours du printemps et de l'été (CRDA Tozeur, 2017).

3.4. Les ressources en eaux souterraines

Les deux grandes nappes sahariennes, celles du Complexe terminal et du Continental intercalaire par leurs dimensions, s'eétendant sur l'ensemble de la carte faisant du Djérid et de la Nefzaoua une continuité hydrogéologique, bien que différenciée de point de vue lithologie et géométrie du réservoir. À ces deux grandes ressources hydrauliques principalement connues dans le Sahara tuniso-algérien s'ajoutant les nappes phréatiques localisées au niveau des oasis et qui sont négligées pour leur qualité chimique médiocre. Ces nappes correspondent à la nappe du Djérid et la nappe de Chott El Gharsa.

Les nappes phréatiques

Les nappes phréatiques sont celles situées à une profondeur inférieure à 50 m (OSS, 2003).

En général, les nappes phréatiques des oasis du Djérid sont des nappes de types oasis, alimentées essentiellement par le surplus d'eau d'irrigation qui n'est pas utilisée par les plantes et qui s'infiltre à travers la couverture sableuse pour constituer un plan d'eau retenu par les argiles imperméables du Pontien supérieur. Par extension, on définit ces nappes comme étant le premier aquifère rencontré à partir de la surface appartenant au Plio-Quaternaire et qui est susceptible d'être exploité par puits.

Dans la région du Djérid, on trouve 5 nappes phréatiques (Figure 13) :

- La nappe phréatique du Djérid ;

- La nappe phréatique de Chott El Gharsa ;

- La nappe phréatique du Tamerza-Ain Karma ;

– La nappe phréatique du Hazoua ;

– La nappe phréatique de Mides.



Figure 13 : Carte des nappes phréatiques de la région de Djérid (Source : CRDA Tozeur « Carte géologiques 1/500000 » 2015)

Les Nappes profondes

Les nappes profondes sont celles situées à une profondeur supérieure à 50 m (OSS, 2003). Dans la région du Djérid, on se trouvent trois nappes profondes :

La nappe du Plio-Quaternaire

Cette nappe se trouve entre le Djérid et chott el Gharsa Nord dont elle est renfermée par les niveaux sableux et sablo-argileux d'épaisseur et de profondeur variables de part et d'autre des flancs du Draa Djérid. Cinq forages ont été réalisés sur le flanc sud de l'anticlinal de Draa Djérid et un forage réalisé sur le flanc nord. De même et au Nord de Chott el Gharsa cette nappe a été suivie par quatre forages de reconnaissances (Moumni et Horriche, 1998).

La nappe du Complexe terminal

On désigne par le terme «Complexe terminal» un ensemble aquifère multicouche emmagasiné dans des formations géologiques perméables qui s'étendent du Sénonien jusqu'au Mio-Pliocène. Ces aquifères sont séparés par des couches semi ou peu perméables. Cette nappe se trouve partagée entre l'Algérie, la Tunisie et la Libye et couvre une superficie de l'ordre de 350 000 km². Tant sur le plan quantité et/ou qualité, cette nappe constitue une ressource en eau de premier plan utilisée essentiellement pour l'agriculture (Besbes *et al.*, 2003).

La nappe du Continental intercalaire

La nappe du Continental intercalaire constitue un important système aquifère. Elle couvre une grande partie du Sahara algéro-tunisien et s'étend sur une superficie allant jusqu'à 600 000 km². Cet aquifère est le plus profond dans le Sud tunisien. Dans le Djérid, la nappe du Continental intercalaire est logée dans les séries gréseuses et argilo-gréseuses de la formation de Sidi Aïch d'âge Barrémien-Aptien avec une épaisseur variant de 120 à 150 m. Dans la région du Sillon des chotts, le Continental intercalaire est un ensemble aquifère multicouche homogène (UNESCO, 1972).

3.5. La végétation

D'après Guittonneau (2011), comme le cas de Nefzaoua la région de Djérid dispose d'un couvert végétal faible. Celle la végétation naturelle se compose de : Aizoon canariense, Anabasis articulata, Asteriscus pygmaeus, Citrillus colocynthis [= Colocynthis vulgaris], Echiochilon fruticosum, Filago pygmaea [= Evax pygmea], Hammada schmittiana, Linaria laxiflora, Neurada procumbens, Peganum harmala, Polycarpaea repens, Retama raetam, Stipagrostis pungens, Tamarix gallica et Volutaria lippii.

La végétation cultivée désigne évidemment l'agriculture et plus particulièrement les oasis qui représentent le modèle le plus efficace de valorisation des terres du Sud tunisien et la meilleure forme d'intensification agricole.

La végétation cultivée se compose d'une strate supérieure des palmiers-dattiers (*Phoenix dactylifera*), d'une strate intermédiaire de nombreux fruitiers : figuiers (*Ficus carica*), grenadiers (*Punica granatum*), poiriers (*Pyrus communis*), bananiers (*Musa acuminata*), orangers (*Citrus sinensis*), oliviers (*Olea europaea*). Les barrières de palmes limitent les parcelles et sont accompagnées d'une haie défensive à *Parkinsonia aculeata* (Fabaceae) et *Lycium ferocissimum* (Solanaceae). Et enfin une strate herbacée est essentiellement destinée à la culture de céréales. Les principales espèces sont *Heliotropium curassavicum* (Boraginaceae), *Imperata cylindrica* (Poaceae), *Limonium tunetanum* (Plumbaginaceae), *Frankenia pulverulenta* (Frankeniaceae), *Cynanchum acutum* (Asclepiadaceae), *Lotus corniculatus* (Fabaceae), *Convolvulus althaeoides* (Convolvulaceae), *Gladiolus segetum* (Iridaceae).

3.6. Les caractéristiques pédologiques

La région de Djérid dispose d'un potentiel en sol très limité. Ceci est expliqué par les conditions bioclimatiques (aridité et faiblesse de couverture végétale) et l'influence des chotts par l'effet d'halomorphie et de la distribution du gypse.

Les sols halomorphes

Ils représentent 50% de la surface totale du gouvernorat de Tozeur et se développent sur des matériaux alluviaux à texture sablo-limoneuse à limon-sableuse. Ils sont soumis à l'action des nappes phréatiques très salées. En saison humide, ces sols s'engorgent en surface mais à la fin de la saison des pluies une pellicule saline se forme en surface (argile + sel). La désagrégation de ces sols sous l'effet de la sécheresse aboutisse à la formation du pseudo sable sur un horizon superficiel de quelques centimètres. En général, ces sols ne sont pas cultivables à l'exception des oasis.

Les sols gypseux

Ces sols sont riches en gypse et s'étendent sur une bonne partie de la surface de la région. Le taux de gypse peut atteindre 70%. Les encroûtements et les croûtes gypseuses ne permettent pas la pratique des cultures et ne porte qu'une maigre végétation.

Les sols squelettiques

Il s'agit soit de lithosols soit de régosols. Ces sols squelettiques se caractérisent par la quasi absence de matière organique. Ils ne sont pas propices à l'agriculture. Les lithosols en roche
tendre sont sensibles à l'érosion hydrique et les régosols sont plutôt sensibles à l'érosion éolienne par déflation.

Les sols minéraux bruts (sables éoliens)

Ils correspondent à des accumulations de sable par le vent. Ils s'étendent entre Draa Djérid et Chott el Gharsa ainsi qu'au Sud de Hazoua et à l'embouchure d'oued Gouifla-Melah. Aucun type de culture ne peut être pratiqué sur ces sols éoliens, mais une végétation naturelle adaptée au sable apparaît pendant les années pluvieuses.

Les sols d'apport fluviatile

Ces sols se forment généralement sur les terrasses (Tamaghza, Chébika) et sur les cônes alluviaux (Foum el Khanga).

4. Synthèse et conclusion du premier chapitre

Le suivi des oasis apparaît aujourd'hui comme un enjeu important tant sur les plans environnementaux et économiques que sociaux. L'identification et la caractérisation des oasis faites avec un pas de temps régulier, c'est-à-dire au moins mensuel, permettrait dans un premier temps de mettre en évidence les évolutions qui marquent les oasis à l'échelle de tout le sud tunisien sous l'impact des changements globaux, qu'ils soient d'ordre climatique, environnemental, social ou économique, et dans un second temps de tenir compte de ces évolutions pour améliorer les capacités de production agricole dans le contexte d'une agriculture durable.

Les données disponibles pour caractériser la végétation, en particulier dans les régions désertiques des pays en développement, ne sont pas nombreuses et présentent des limites pour inventorier les oasis sur de larges secteurs et d'en assurer le suivi. Or aujourd'hui les informations apportées par les produits issus de la télédétection peuvent pallier en grande partie cette carence.

Classiquement quand on cherche à discriminer différents types d'oasis sur une large région donnée, on utilise une série diachronique d'images provenant de capteurs à moyenne résolution spatiale qui offrent l'avantage de couvrir de larges superficies avec une forte répétitivité temporelle. Mais on se heurte alors au problème d'adéquation spatiale entre les dimensions de pixels et celles des parcelles qui dans le cas des oasis peuvent constituer des paysages agricoles très fragmentés.

Ainsi le troisième chapitre de ce mémoire présente les résultats obtenus à partir d'un produit issu d'une série d'images MODIS, le MOD13Q1-NDVI à 250m de résolution avec une répétitivité de 16 jours. Le but recherché au départ était de mettre en évidence au moins une partie du fonctionnement des régions oasiennes que ce soit pour la végétation, l'eau ou le sol :

- On cherchait à caractériser le cycle des saisons et leur impact sur le fonctionnement des oasis ;
- Et avec la profondeur historique des données qui existent depuis l'année 2000, on voulait aussi mettre en évidence les dynamiques pluriannuelles de la végétation comme celui du développement de nouvelles parcelles ou nouveaux périmètres, ou encore l'impact d'une année exceptionnellement sèche ou humide sur le fonctionnement de ces milieux.

D'un autre côté, si on recherche une meilleure résolution spatiale pour mettre en place un suivi pluriannuel détaillé des pratiques culturales, ou du risque de salinisation, ou bien encore des abandons, souvent on exploite alors au mieux une à trois images car la répétitivité de ce type d'image est souvent bien moindre : cela constitue une limite forte pour discriminer les différents types des oasis et pour en élaborer une typologie et a fortiori pour comprendre les pratiques agricoles qui y sont menées.

Or nous avons pu bénéficier de l'expérimentation SPOT5 (Take5) sur la région de Tozeur qui nous a fourni une série temporelle d'images à haute résolution spatiale (10m) tous les jours 5, avril à septembre 2015. Les résultats obtenus à partir de ces données pour évaluer leur potentiel pour identifier et caractériser les oasis, même sur une période aussi courte, sont présentés en chapitre 2. L'intérêt de cette série temporelle était qu'elle préfigurait les futurs satellites européens Sentinel2 A et B, qui sont effectivement opérationnels depuis 2015 et 2017 respectivement.

Sommaire

1.	Introduction	57
2.	La série temporelle d'images SPOT5 (Take5)	
3.	Le suivi mensuel de la végétation par périmètre irrigué	
4.	Résultats et discussion	76
5.	Synthèse et conclusion du deuxième chapitre	

1. Introduction

Les images satellites apportent une aide significative pour la connaissance de la couverture végétale et le suivi de son état. Dans ce chapitre, nous présentons un travail réalisé à partir de séries temporelles d'images optiques à haute résolution spatiale pour caractériser les oasis. Plus précisément, les objectifs de ce chapitre sont :

- De différencier les oasis et d'élaborer une typologie des oasis en fonction de leurs propres caractéristiques ;
- (2) De caractériser l'état de la végétation de chaque oasis pour toutes les dates et de surveiller la dynamique de la végétation des oasis de la région du Djérid ;
- (3) De déterminer les dates-clés de changement d'état de la végétation.

La densité de la végétation, ainsi que d'autres paramètres relatifs à la couverture végétale, peuvent être estimés à partir d'images de télédétection, en utilisant des méthodes empiriques ou semi-empiriques fondées sur l'utilisation d'indices de végétation permettant notamment d'estimer la couverture végétale à partir de différentes méthodes (Song *et al.*, 2017). Parmi les paramètres qu'il est possible de calculer à partir des données optiques, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est a priori le paramètre le plus pertinent pour le suivi des oasis et le plus largement utilisé dans le cas d'étude de la végétation. Les données de cet indice ont été générées à partir des séries temporelles d'images SPOT5 (Take5) acquises entre avril et septembre 2015 sur la zone d'étude dans le but de caractériser les oasis.

2. La série temporelle d'images SPOT5 (Take5)

2.1. Les données et les outils

L'intérêt de l'utilisation de séries temporelles d'images d'observation de la terre réside dans le suivi de l'évolution des surfaces terrestres à différentes échelles temporelles et spatiales. L'objectif des méthodes d'analyse du changement applicable aux séries temporelles d'images satellitaires est principalement d'étudier les variations saisonnières de la couverture végétale à un pas de temps donné (Zhang *et al.*, 2016). Dans cet objectif, les méthodes de détection de changements sont fréquemment appliquées à des séries temporelles d'indicateurs biophysiques plutôt que de simples réflectances, à la fois parce que les séries temporelles sont largement répandues sous cette forme mais également afin de simplifier l'information spectrale à une seule dimension. Les indicateurs biophysiques utilisés sur les surfaces terrestres sont fréquemment des indices de végétation. L'objectif de ces méthodes consiste pour l'essentiel à identifier et quantifier les changements des couverts végétaux, et de mieux caractériser les types de couvertures végétales (Adami *et al.*, 2018).

2.1.1. Les images satellites de l'expérience SPOT5 (Take5)

Une série d'images optiques acquises en 2015 a été utilisée pour identifier et caractériser les oasis (**Annexe** 1). Ces images, qui ont des résolutions spatiales de 10 m, apparaissent bien adaptées aux paysages agricoles dont la superficie moyenne des parcelles est inférieure à 2 ha.

Take5 est une expérimentation réalisée sur le satellite d'observation de la Terre SPOT5 en fin de vie avant son arrêt d'activité. Cette mission avec la plateforme SPOT5, à savoir SPOT5 (Take5), a été réalisée par le Centre national d'études spatiales (CNES) avec le soutien financier de l'Agence spatiale européenne (ESA). SPOT5 (Take5) a produit des données tous les cinq jours à une résolution spatiale de 10 m et sur une période appropriée pour la surveillance des cultures d'été dans les zones tempérées pendant la période d'étude (avril à septembre 2015) pour l'hémisphère nord ; ces données comprenaient quatre bandes spectrales (XS1 : Vert, XS2 : Rouge, XS3 : Proche infrarouge (PIR) et XS4 : Moyen infrarouge (MIR)) converties en réflectance « Top of canopy », c'est-à-dire corrigée des effets atmosphériques sur les radiations. SPOT5 (Take5) a été une expérience internationale dont les objectifs étaient entre autres de reconnaître les différents types de végétation, d'évaluer l'état des forêts, d'estimer la consommation d'eau pour les cultures, ou encore d'observer la fonte des glaciers.

Dans sa phase de désorbitation réalisée dans le but d'augmenter sa répétitivité, SPOT5 a atteint sa nouvelle orbite le 2 avril 2015, et le CNES a mis en route la mission SPOT5 (Take5) à partir du 8 avril pour six mois. Pendant cette période, l'expérience Take5 a fourni des images tous les cinq jours, 31 images d'avril à septembre 2015, sur 150 sites sélectionnés à travers le monde après un appel international pour des sites expérimentaux. Les sites d'intérêt sélectionnés par le CNES incluaient différentes cibles (océan, surfaces continentales, atmosphère, glace, végétation), et la région du Djérid a donc été sélectionnée parmi ces sites. Les jeux de données SPOT5 (Take5) sur les 150 sites sont disponibles en ligne en libre accès (<u>https://www.spot-take5.org/client/#/products/SPOT5</u>).

Cette expérience a été menée en prévision des lancements des futurs satellites Sentinel2, A et B, respectivement lancé en juin 2015 et mars 2017, dont les capteurs ont des caractéristiques proches de celles de SPOT5, surtout cette répétitivité de 5 jours.

Les données ont été corrigées des effets atmosphériques, des effets d'environnement et avec une correction supplémentaire qui prend en compte les effets des pentes.

La sélection de la région du Djérid, centrée sur les villes de Nefta et de Tozeur, comme site pilote pour l'expérience SPOT5 (Take5) nous permet d'analyser les signatures spatiotemporelles des oasis à partir d'images de réflectances de surface avec une bonne résolution spatiale (10m), et une bonne répétitivité (5 jours), mais seulement sur une période de l'année (avril-septembre), soient 31 images au total. Les valeurs de NDVI moyen ont été calculées pour chaque date et extraites pour les 38 périmètres irrigués couverts par l'image SPOT5. Des statistiques descriptives (histogramme, boîte à moustache) ont été calculées pour chacun des périmètres irrigués. Cinq images de la série ne sont pas utilisées à cause de la présence trop importante des nuages sur ces images.

Dans notre étude, nous nous sommes essentiellement concentrés sur des images SPOT5 (Take5) pour plusieurs raisons :

- Gratuité et libre accès aux données SPOT5 qui sont normalement payantes ;
- Une image tous les 5 jours) ;
- La résolution de ces images (10 m) était particulièrement adaptée à l'étude de la dynamique de la végétation dans les oasis et du parcellaire agricole (un pixel couvre 100 m² de surface);
- Une seule image permet de couvrir quasiment la totalité de l'espace oasien de Djérid.
 En effet, les scènes SPOT5 (Take5) couvrent des surfaces de 60 km de côté entre le parc national Dghoumes-Tozeur et la région Nefta.

La première étape a donc été de créer un compte sur le site ''spottake5.org/client/#/products/SPOT5?site=NeftaTozeurTunisia'' qui permet ensuite de rechercher et de télécharger les images voulues. Une fois ce compte créé, il est nécessaire comme on le voit ci-dessous (Figure 14) de trouver la zone souhaitée (Nefta-Tozeur). Une fois la liste des images de la zone d'étude trouvées, il faut les mettre dans le panier puis les valider afin de pouvoir les télécharger (Annexe 2).



Figure 14 : Zone de recherche des données satellitaires SPOT sur le site CNES/ESA

2.1.2. Les données SIG

Impliqué dans un grand nombre de partenariats, le Commissariat Régional de Développement Agricole (CRDA) de Tozeur dispose d'une base de données importante, constituée entre autres de couches vecteurs comme les limites des périmètres irrigués, le réseau routier, les centres urbains, etc.). Le CRDA dispose aussi de données portant sur l'occupation du sol en général ou sur l'agriculture du gouvernorat de Tozeur : qualité des sols et de l'eau, date de création des périmètres irriguées, surface, etc.

2.1.3. Les observations de terrain propres à ce travail

Parallèlement à l'acquisition des images satellites, des campagnes de terrain ont été réalisées sur le terrain afin de valider les résultats obtenus. Cinquante enquêtes de terrain ont été effectuées entre 2016 et 2018 auprès des agriculteurs exploitants afin de compléter les connaissances acquises sur le site d'étude (Annexe 4). Pour chaque parcelle enquêtée, plusieurs informations sont systématiquement collectées : coordonnées géographiques du point central de la parcelle par GPS, identifiant des photos prises, caractéristiques topographiques de la parcelle (valeur de pente, altitude, exposition), caractéristiques du sol (couleur, texture, signe de dégradation), qualité de l'eau y compris la salinité, nombre de puits, mode d'irrigation et type d'utilisation du sol. Ensuite, des données spécifiques sont

récoltées selon qu'il s'agisse de relevés sur la végétation (estimation du recouvrement et de la hauteur moyenne des strates végétales et du sol nu, espèces dominantes en recouvrement dans chaque strate, état moyen de sénescence du végétal). Ainsi, ces enquêtes permettent d'évaluer la diversité des pratiques agricoles réalisées dans les oasis du Djérid. La figure Figure 15 montre la localisation des relevés utilisés dans ce travail pendant les campagnes de terrain.

Les relevés d'occupation et d'utilisation des sols regroupent aussi plusieurs types d'information recueillis mensuellement sur des parcelles sélectionnées:

- La hauteur moyenne de la végétation ;

- Le type de l'oasis ;

- Le type d'occupation du sol ;

- Le stade phénologique ;

- La pratique agricole ;

- L'état de surface ;

- La période de production des feuilles ;

- L'irrigation ;

- La période pendant laquelle le palmier consomme le plus d'eau.



Chapitre 2 : Exploitation de séries temporelles d'images stellite à haute résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une courte période

Figure 15 : Carte de localisation des enquêtes de terrain effectuées dans les oasis de la région du Djérid

2.1.4. Les logiciels utilisés

Le logiciel *ENVI* a été utilisé pour les traitements d'images satellites selon une approche pixel, pour laquelle il est particulièrement reconnu. Le logiciel *ENVI* nous a permis aussi de réaliser l'ensemble des prétraitements (extraction de la zone d'étude (Les oasis de Djérid), on a délimité Les oasis de Djérid avec l'intermédiaire de logiciel *ENVI* en utilisant la technique de masquage, calcul du NDVI et calcul de la valeur moyenne de NDVI par date et par périmètre irrigué) sur la série d'images.

Le logiciel *R project*, c'est un langage de programmation interactif interprété et orienté objet qui contient une très large collection de méthodes statistiques ainsi que des facilités

graphiques importantes. Ce logiciel est le résultat d'un effort collaboratif avec des contributions du monde entier et a été initialement écrit par Robert Gentleman et Ross Ihaka dans les années 90 (Département de statistique, Université d'Auckland, Nouvelle-Zélande) (R-Home-contributors, 2017). Aujourd'hui, le 'système statistique' de R est mis en œuvre pour tout le monde à travers un dispositif entièrement planifié et cohérent appelé « l'environnement R » qui permet aux utilisateurs d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires en définissant des nouvelles fonctions (R-Home-WhatisR, 2017). Pour notre travail, nous avons utilisé le logiciel R pour faire des analyses statistiques (statistiques descriptives, classification ascendante hiérarchique (CAH), clustering) des données SPOT5 (Take5).

Enfin, nous avons également utilisé des logiciels classiques, comme SIG avec ArcGIS, pour réaliser certains traitements sur les données vecteurs et raster, et pour générer au final des cartes thématiques.

3. Le suivi mensuel de la végétation par périmètre irrigué

Cette démarche repose sur l'utilisation des images SPOT5 (Take5) pour caractériser le couvert végétal des oasis de Djérid. Pour un suivi multi-temporel une approche a été faite en se basant sur le calcul et l'analyse de l'indice de végétation (NDVI) sur l'usage du logiciel *R project, ENVI*, et système d'information géographique (SIG). Les valeurs de NDVI ont été calculées et extraites des 38 périmètres publics irrigués (PPI) (Figure 16) : une même oasis peut posséder plusieurs PPI, chaque PPI ayant un système d'irrigation indépendant.



Figure 16 : Image SPOT5 (Take5) de la région d'étude prise le 26 juin 2015 : (a) en fausses couleurs (RVB : NIR, R, G) et (b) valeurs calculées de NDVI, avec un zoom sur un PPI.

Seules 26 images SPOT5 (Take5) ont finalement été traitées avec le logiciel *ENVI*, car nous avons supprimé celles qui contenaient trop de nuages. Nous avons calculé les valeurs moyennes du NDVI pour chaque PPI et pour chaque image de SPOT5 (TAKE5) d'avril à septembre 2015 à fin d'obtenir une caractérisation générale sur l'ensemble des oasis, puis nous avons examiné la dynamique temporelle du NDVI dans les oasis en évaluant les variations. Des statistiques descriptives ont été calculées pour chacun des périmètres irrigués avec le logiciel *R project*. Ainsi chacun des 38 PPI est caractérisé par plusieurs paramètres dérivés de l'ensemble des valeurs de NDVI propres, notamment la médiane, l'écart type, la moyenne, le maximum et le minimum, des boites à moustaches ont été calculées pour chaque date. Les différents groupes retenus ont été cartographiés et interprétées en fonction des connaissances des experts. Les valeurs de NDVI ont été interprétées en deux groupes principaux : les valeurs les plus élevées (> 0,2) représentaient les zones de végétation, tandis que les plus basses représentaient des zones à végétation clairsemée ou non végétalisée telles que le sol nu (Sadegh *et al.*, 2014). Une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été appliquée à l'aide du logiciel *R project* aux valeurs moyennes de NDVI calculées pour chaque

date pour les 38 périmètres irrigués. Sept groupes obtenus au finale, quatre groupes avec une forte activité chlorophyllienne et trois groupes avec une faible activité chlorophyllienne. Des cartes des valeurs moyennes et des écarts moyens de NDVI au niveau des pixels ont été calculées pour la période avril-septembre 2015.

3.1. La méthodologie : indice de végétation, statistiques descriptives et classification

La Figure 17 illustre l'approche méthodologique générale utilisée dans cette étude.

3.1.1. Le calcul du NDVI

Dans notre démarche, la première étape est de caractériser l'état de la végétation de chaque parcelle par un indice unique qui combine, en tout point de l'image, les valeurs de réflectance de différentes longueurs d'onde. Il existe un grand nombre d'indices construits pour diverses applications : la plupart combinent les valeurs de réflectance mesurées dans le proche infrarouge (PIR) et dans le rouge (R). Le plus largement utilisé pour suivre la végétation est le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), ou indice de végétation normalisé, (Rouse *et al.*, 1974 ; Tucker 1979).

Le NDVI illustre la différence entre ces deux bandes : NDVI = (PIR-R) / (PIR+R).

Ainsi, il est sensible à la densité et à l'état de la végétation, et en théorie il est compris entre -1 et +1 : plus la végétation sera dense, plus les valeurs de NDVI seront élevées et proches de 1.

Cet indice, dont la robustesse est démontrée, est fortement corrélé à des paramètres biophysiques de la végétation. Il peut être considéré comme étant un bon indicateur de l'activité chlorophyllienne et donc de la vigueur de la végétation. Sensible aux variations spatiales et temporelles il est adapté pour le suivi de la dynamique de la végétation (Huete *et al.*, 2002).

Pour un végétal subissant un stress hydrique ou sénescent, la mesure du NDVI est plus faible que pour un végétal en pleine activité photosynthétique. Des variations anormales de NDVI peuvent être liées à une perturbation environnementale ayant entraîné un déficit foliaire ou un dessèchement du feuillage (Cheret *et al.*, 2011).

Des applications ont montré son intérêt pour la caractérisation de l'état de la végétation, la détection des dommages dus à la sécheresse ou encore la cartographie de la défoliation des arbres, l'évaluation du dépérissement forestier, dans le cas où ces phénomènes entraînent une

modification brutale et importante de l'activité photosynthétique (Deshayes *et al.*, 2006; Solberg *et al.*, 2007).



Figure 17 : Méthodologie générale appliquée sur la série d'images satellites SPOT5 (Take5) pour le suivi des oasis du Djérid

Sur les images en fausses couleurs où les bandes du Vert, du Rouge et du PIR ont été respectivement mises dans les couleurs bleue, verte et rouge (réalisation d'une composition colorée), la végétation prend des teintes de couleur rouge qui la rendent parfaitement visible par rapport au reste des éléments du sol (Figure 18). Cette composition colorée a été réalisée à l'aide du logiciel Arcmap grâce à un traitement de construction de raster où l'on assemble les canaux d'une image dans un certain ordre en tenant compte des couleurs bleue, verte et rouge qu'on leur applique. On aura donc des zones humides qui vont ressortir sur des tons plutôt verts, et la végétation va ressortir sur des tons plutôt rouges. Cette composition colorée permet donc de parfaitement distinguer la végétation des oasis par rapport à leur environnement. Le NDVI joue donc sur le contraste des caractéristiques de deux canaux d'une image multispectrale : l'absorption du pigment chlorophyllien dans le canal rouge et la haute réflectivité des matières végétales dans le canal proche infrarouge (PIR). Une fois le calcul effectué, on obtient donc un raster (Figure 19) avec des pixels donc la valeur est répartie entre -1 et 1 selon la présence de végétation. L'étape suivante est donc à partir de ce raster et des valeurs des différents pixels de déterminer le seuil à partir duquel il est possible de considérer que l'on est en présence de végétation ou non.

Généralement il est dit que pour un NDVI le seuil est situé à 0,20 : tous les pixels d'un raster obtenu après le calcul du NDVI en-dessous de cette valeur ne seraient donc pas de la végétation et ceux dont la valeur serait supérieure à ce seuil serait donc de la végétation (Carlson *et al.*, 1997 ; Sobrino *et al.*, 2001 ; Meera Gandhi *et al.*, 2015). Mais il faut noter que parfois le seuil défini pourra laisser de côté quelques palmiers mais parfois aussi certaines espèces de végétation pourront être prises en compte alors qu'il ne s'agit pas de palmiers dattiers mais bien d'autres plantations telles que des arbres fruitiers (pommier, grenadier...) ou bien encore des plantes basses, ou des plantations arborées faites par les forestiers.



Figure 18 : Composition colorée en fausses couleurs de l'image SPOT5 (Take5) du 12 avril 2015 avec un zoom sur la région de Nefta



Figure 19 : Exemple de calcul du NDVI avec le logiciel ENVI

3.1.2. Les boîtes à moustaches

Les statistiques sont utiles pour traiter de grandes quantités d'informations quantitatives (Bruns *et al.*, 2006). Les statistiques descriptives ont pour but de résumer l'information contenue dans les données de façon à en dégager les caractéristiques essentielles sous une forme simple et intelligible. Les deux principaux outils de la statistique descriptive sont les représentations graphiques et les indicateurs statistiques.

La boîte à moustaches, une traduction de *Box & Whiskers Plot*, est une invention de Tukey (1977) pour représenter schématiquement la distribution d'une variable. Cette représentation graphique est un moyen pour approcher les concepts abstraits de la statistique (Bruns *et al.*, 2006). La boîte à moustaches est une méthode efficace de présentation graphique de données numériques. Classiquement, elle décrit les informations suivantes: la plus petite observation (Valeur minimale), le quartile 1 (25% de l'effectif total), la médiane (50%), le quartile 3 (75%) et la plus grande observation (Valeur maximale). La boîte à moustaches indique également les valeurs atypiques éventuelles. Elle est construite de bas en haut, du quartile inférieur au quartile supérieur, les moustaches connectent la boîte aux plus petites et aux plus grandes valeurs qui ne sont pas des valeurs atypiques éventuelles (Mickey *et al.*, 2004).

Les séries temporelles de NDVI ont été décrites d'un point de vue statistique par les séries temporelles des boîtes à moustaches calculées pour chaque date (tous les 5 jours), comme notre étude a examiné 38 périmètres irrigués, nous avions 38 matrices de données, chacune d'entre elles comportant une colonne de valeurs NDVI pour chaque date et une colonne pour le nombre de pixels de chaque date (le nombre total des pixels ne varie pas dans le temps, car l'extension des PPI ne varie pas, elle est toujours la même pour chaque date). Ces matrices ont été utilisées comme point de départ pour construire des boîtes à moustaches pour un affichage simple des résultats, facilement compréhensibles et comparables d'une date à une autre, et donc finalement utiles pour caractériser une série temporelle de pixels. L'ensemble des séries de boîtes à moustachesest est donné en Annexe 3. Nous nous sommes concentrés sur les médianes et les quartiles. La médiane est une mesure commune de la tendance centrale pour un ensemble d'observations qui est souvent utilisé dans des analyses statistiques robustes. Plus précisément, la médiane indique le milieu de la distribution : 50% de l'effectif total est inférieur à cette valeur médiane et 50% est supérieur.

Les résultats de l'analyse exploratoire correspondante des ensembles de données présentés dans ce travail ont été visualisés à travers de séries de boîtes à moustaches (Figure 20), dans lesquelles les tendances saisonnières des données NDVI peuvent être observées.



Variation temporelle de NDVI pour le PPI Zaafrana (groupe 211)



Variation temporelle de NDVI pour le PPI Tozeur (groupe 212)



Variation temporelle de NDVI pour le PPI Abbes (groupe 121)

NDVI anormalement fort

] NDVI anormalement faible

----- NDVI=0,2

Figure 20 : Les boîtes à moustaches des variations saisonnières de NDVI pour des exemples choisis dans quelques groupes d'oasis de la région de Tozeur (Avril-Septembre 2015)

Les résultats différaient en ce qui concerne surtout la variation des médianes et des quartiles, de sorte que certaines boîtes à moustaches avaient une médiane inférieure à 0,2, alors que certaines avaient une médiane supérieure à 0,2, et aussi parfois une Q1 inférieure à 0,2, et d'autres supérieure à 0,2.

Les signatures temporelles obtenues à partir des boîtes à moustaches calculées pour les 38 périmètres irrigués présentent des gammes différentes de valeurs d'un périmètre à l'autre, entre deux valeurs extrêmes de médiane : vers 0,2 pour les plus basses et vers 0,6 pour les plus fortes (Figure 24). Pour les séries temporelles présentant de fortes valeurs médianes de NDVI, prenons le périmètre irrigué d'El Faraj comme un exemple (Figure 21), il semble y avoir des variations temporelles significatives de la valeur médiane ainsi que du quartile 1 (Q1) et du quartile 3 (Q3). Pour les séries temporelles présentant de faibles valeurs de NDVI, prenons le périmètre d'El Ghaouatine comme exemple, on n'observe pas de variations significatives de la valeur médiane, ni des Q1 et Q3, ou du moins elles sont nettement moins importantes, ce qui n'est pas le cas des valeurs extrêmes qui elles varient également fortement.



Figure 21 : Exemple de deux périmètres irrigués montrant des évolutions des valeurs médianes, des Q1 et Q3 de NDVI très différentes (Avril-Septembre 2015)

3.1.3. La classification hiérarchique ascendante des courbes de NDVI moyen par périmètre irrigué

Le résultat d'une classification hiérarchique n'est pas une partition de l'ensemble des individus. C'est une hiérarchie de classes telle que :

- Toute classe est non vide ;

- Tout individu appartient à une (et même plusieurs) classes ;

- Deux classes distinctes sont disjointes, ou vérifient une relation d'inclusion (l'une d'elle est incluse dans l'autre) ;

- Toute classe est la réunion des classes qui sont incluses dans elle.

Pour un niveau de précision donné, deux individus peuvent être confondus dans un même groupe, alors qu'à un niveau de précision plus élevé, ils seront distingués et appartiendront à deux sous-groupes différents. L'avantage de cette méthode est qu'elle n'est soumise à aucune initialisation particulière de paramètre(s) ce qui la rend déterministe, et en outre, que le nombre de classe n'a pas à être fixé *a priori*. Cependant, ce type de méthode impose le calcul de la matrice des distances de tous les points d'observation avec tous les autres, et cette masse de calcul est beaucoup trop importante compte tenu du temps que nous voulons consacrer à cette étape. Parmi les méthodes non-supervisées les plus utilisées, citons la classification ascendante hiérarchique (CAH) (Wu *et al.*, 2013).

La classification ascendante hiérarchique

La CAH permet de construire une hiérarchie entière des objets sous la forme d'un "arbre" dans un ordre ascendant. On commence en considérant chaque individu comme une classe et on essaye de fusionner deux ou plusieurs classes appropriées, selon une similarité, pour former une nouvelle classe (Martelet *et al.*, 2006). Cette technique regroupe un ensemble d'objets en classes ou en grappes, de sorte que les objets d'une même grappe présentent une grande similarité par rapport aux autres grappes, mais sont différents des objets des autres grappes (Abdellaoui, 2014).

Une CAH a été appliquée à l'aide du logiciel *R project* aux valeurs moyennes de NDVI calculées pour chaque date pour les 38 périmètres irrigués. Les différents groupes retenus au final ont été cartographiés et interprétés en fonction des connaissances des experts. Les pixels les plus similaires ont été regroupés progressivement en classes formant un arbre hiérarchique appelé «dendrogramme» ; ce processus a été répété jusqu'à ce que tous les individus soient regroupés en une seule classe. Le dendrogramme est une expression utile des résultats de classification, car les critères de forme de l'arbre peuvent être appliqués pour expliquer la

carte classée résultante, l'arbre que l'on peut couper à différents niveaux pour obtenir un nombre des classes plus ou moins grand, les nœuds de l'arbre issus d'un même parent formant un groupe homogène. Les relations entre classes sont caractérisées par la longueur des branches (distance intra-classe) et la distance entre elles (distance interclasse).

Différentes mesures de la distance interclasses peuvent être utilisées : la distance euclidienne, la distance inférieure qui favorise la création de classes de faible inertie, ou la distance supérieure qui favorise la création de classes d'inertie plus importante, etc.

Le cas de la classification ascendante hiérarchique : à partir des éléments qui composent la population, on forme des petites classes ne comprenant que des individus très semblables, puis à partir de celle-ci, on construit des classes de moins en moins homogènes, jusqu'à obtenir la classe tout entière.

La méthode laisse à l'utilisateur le choix du critère : le critère d'agrégation retenu pour notre travail est basé sur le Ward, qui ne s'applique que si on est muni d'un espace euclidien. Ce critère aisé à mettre en œuvre lorsque la classification est effectuée après une analyse factorielle, constitue une excellente méthode de classification ascendante hiérarchique. En effet, il est basé sur la réunion des 2 classes qui minimise l'augmentation de l'inertie intraclasses (Boubou, 2007 ; Ward, 1963).

Dans cette étude, nous avons suivi plusieurs règles lors du choix des algorithmes de *clustering*. Premièrement, il devrait produire des objets ordonnés pour un affichage plus informatif des données. Deuxièmement, il devrait permettre que les grappes plus grandes contiennent des grappes plus petites, ce qui est utile pour l'analyse. Troisièmement, il devrait déterminer la similarité entre les différentes grappes. Pour ces raisons, nous avons utilisé la méthode CAH. Cela nous a permis de regrouper des échantillons individuels (pixels) en fonction de leur ressemblance. Il est également facile à mettre en œuvre et donne des meilleurs résultats dans de nombreux cas et affiche clairement le processus de regroupement. Ainsi, nous avons choisi des nombres de grappes basés sur notre connaissance du terrain.

L'analyse exploratoire de la classification CAH et le dendrogramme résultant ont permis d'identifier sept groupes (Figure 22 et Figure 23). Le regroupement était basé sur la tendance de l'activité chlorophyllienne moyenne de la série temporelle de NDVI. Ces groupes ont ensuite été cartographiés pour montrer la distribution spatiale des différents groupements des séries temporelles de NDVI.

74



Figure 22 : Dendrogramme obtenu par CAH à partir de la méthode Ward pour les 38 périmètres irrigués d'après les séries temporelles de leurs valeurs moyennes de NDVI (Avril-Septembre 2015) et regroupement en 7 classes



Figure 23 : Les courbes moyennes des NDVI (Avril-Septembre 2015) des 7 groupes de PPI obtenus par CAH avec la méthode Ward

4. Résultats et discussion

4.1. Les profils temporels de NDVI des périmètres irrigués

4.1.1. Les groupes de périmètres obtenus par CAH

Les 38 périmètres irrigués de la région de Nefta-Tozeur ont été classés en sept groupes pour la période comprise entre avril et septembre 2015 (Figure Figure 22) : les 7 courbes moyennes (Figure 23) ont des allures similaires et parallèles, depuis les plus faibles valeurs de NDVI, vers 0,17, jusqu'aux plus fortes valeurs, vers 0,45. Plus les courbes moyennes progressent vers les fortes valeurs, plus les variations mensuelles deviennent importantes. On identifie pour chacun de ces groupes les grands types de périmètres irrigués en distinguant les plantations traditionnelles des plantations modernes, ainsi que la densité de la phytomasse. Mais il existe quand même quelques confusions entre les plantations denses anciennes et modernes.

La distribution spatiale des valeurs moyennes des NDVI calculées pour chaque pixel dans les oasis étudiées montre de très fortes hétérogénéités non seulement entre les périmètres, mais également à l'intérieur des périmètres eux-mêmes (Figure 24). Les valeurs sont généralement élevées, mais quelques zones avec des plus faibles valeurs apparaissent très clairement.



Figure 24 : Distribution spatiale des NDVI moyens calculés pour chaque pixel des PPI sur la période d'avril à septembre 2015 dans les oasis de Djérid. Les photos montrent des exemples de différents types d'oasis.

Nous avons effectué des vérifications en allant sur le terrain pour identifier les caractéristiques des PPI pour chacun des 7 groupes. La carte de la distribution spatiale des sept groupes a été réalisée (Figure 25). La définition de ces groupes peut aider les décideurs à mettre au point des interventions efficaces pour protéger et maintenir les oasis qui sont confrontées à un certain nombre de problèmes.



Faibles NDVI

Périmètre récent ou ancien avec problèmes (salinité, irrigation, hydromorphie...)
 Nouvelle extension / serres / création
 Périmètre privé (illicite) / serres / création

Forts NDVI

- Périmètre traditionnel ou moderne en bon état à maturité
- Périmètre moderne en bon état en phase de développement
- Périmètre traditionnel ou moderne en bon état
- Périmètre traditionnel

Figure 25 : Carte de la répartition spatiale des 7 groupes obtenus par CAH, et interprétation des 7 groupes d'après les observations de terrain

Le dendrogramme donne naissance à deux branches principales (Figure 22), la première branche donne naissance à deux classes 11 et 12, la classe 11 porte deux classes : 112 et 111 et la classe 112 porte aussi deux classes 122 121

Le groupe 121 est caractérisé par des oasis traditionnelles avec trois niveaux de végétation et une forte densité de palmiers ou des oasis modernes. Les oasis de ce groupe sont très bien irriguées; l'irrigation a eu lieu presque tous les trois jours. Les périmètres irriguées : Abbes, Remada, El ouassat, Rbat, Fatnassa, Beni ali et Castilia sont en bon état et correctement entretenues.

Les groupes 121 et 112 sont également caractérisés par des oasis traditionnelles à forte densité d'arbres fruitiers tels que les bananiers, les pommiers, les figuiers et les citroniers.., et une grande diversité d'espèces. De plus, ces groupes contiennent des palmiers matures qui peuvent atteindre de 10 à 15 m de hauteur et des palmiers immatures de 2 m de hauteur maximale (Figure 26). Les oasis du groupe 121 sont caractérisées par des oasis ayant des arbres âgés de 55 à 60 ans, tandis que les oasis du groupe 112 sont caractérisées par des oasis ayant des arbres plus âgés (plus de 70 ans). Les agriculteurs interrogés des groupes 112 et 121 avaient des problèmes d'irrigation, qui ne se fait qu'une fois par semaine ; cela pourrait avoir un impact sur la signature du NDVI de ces groupes qui est plus faible que celle du groupe 122.



Figure 26 : Exemples photographiques des oasis du groupe 121 et 121

Le groupe 111 est caractérisé par des oasis modernes ou des traditionnelles avec des palmiers matures de petites dimensions qui peuvent atteindre 7 m de hauteur ainsi que de jeunes palmiers plus petits non encore en production. Ces oasis sont caractérisées par une densité moyenne de végétation et de palmiers âgés entre 25 et 30 ans (Figure 27). Les agriculteurs de ce groupe avaient également des problèmes d'irrigation, similaires aux groupes 112 et 121. La densité de la végétation dans ce groupe est inférieure à d'autres groupes de la même branche ce qui est une caractéristique unique, par conséquent, la signature NDVI du groupe 111 est beaucoup plus faible en la comparant aux autres groupes.



Figure 27 : Exemples photographiques des oasis du groupe 112 et 111

La deuxième branche donne naissance à deux classes 22 et 21, la classe 22 porte une seule classe et la classe 21 porte deux classes 212 et 211. Cette branche est caractérisée par une activité chlorophyllienne très faible.

Le groupe 22 présente une activité chlorophyllienne très faible, inférieure à 0,2, et d'après les relevés de terrain, cette surface correspond à des parcelles illicites ayant des problèmes d'irrigation, on trouve dans ces périmètres des surfaces recouvert dans leur totalité de palmiers immatures qui se développent ou d'autres cultures (Figure 28), ainsi que beaucoup de surface de sol nu.



Figure 28 : Exemples photographiques des oasis du groupe 22

La majorité des oasis du groupe 211 sont modernes à faible densité de palmier, ces oasis ayant des arbres âgés de 60 à 65 ans. Ces oasis sont bien organisées, notamment en ce qui concerne l'espacement entre les palmiers. Il n'y a pas d'espèces cultivées autres que les palmiers sur ces sites à cause de la pénurie d'eau. Ce groupe contient des palmiers de taille moyenne peuvent atteindre de 6 à 8 m de hauteur. Ce groupe correspond aussi bien à des nouvelles créations, que des périmètres illicites ou bien encore des serres. Le groupe 212 a les mêmes caractéristiques que le groupe 211, sauf la taille des palmiers, qui sont un peu plus petits que ceux du groupe 211 (Figure 29).

Les agriculteurs des groupes 211 et 212 avaient des problèmes d'irrigation, les tours d'irrigation se font seulement une fois toutes les deux semaines.

Chapitre 2 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à haute résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une courte période



Figure 29 : Exemples photographiques des oasis des groupes 211 et 212

Le réel problème dans la région du Djérid est celui de l'eau et donc de l'irrigation. En effet, le volume d'eau utilisé pour irriguer les palmeraies de la région du Djérid a augmenté provoquant une dégradation de la qualité des eaux et un assèchement progressif des nappes phréatiques. De plus, les forages sont des ouvrages coûtant cher à l'état et qui doivent être refait environ tous les 10 ans. C'est pourquoi, aujourd'hui il devient important pour les autorités locales de tenter de contrôler les oasis qui deviennent de plus en plus importantes au fil des années et qui contribuent donc à l'épuisement des ressources en eau et à la dégradation de la qualité de celles-ci.

4.1.2. Les profils temporels des 7 groupes

La Figure 23 illustre les variations des valeurs moyennes de NDVI des 7 groupes au cours du temps. Les 4 groupes de la branche 1 du dendrogramme (111, 112, 121 et 122) ont tous des valeurs fortes de NDVI, supérieures à 0,3. Les valeurs de NDVI de la classe 111 sont en moyenne inférieures aux valeurs de NDVI de la classe 121 et de la classe 112 qui sont elles aussi en moyenne inférieures aux valeurs de NDVI de la classe 122. Les 3 groupes de la branche 2 du dendrogramme (22, 211 et 212) ont tous des valeurs faibles de NDVI, inférieures à 0,3. Les valeurs de NDVI de la classe 22 sont en moyenne inférieures aux valeurs de NDVI de la classe 212 qui sont elles aussi en moyenne inférieures aux valeurs de NDVI de la classe 212 qui sont elles aussi en moyenne inférieures aux valeurs de NDVI de la classe 212 qui sont elles aussi en moyenne inférieures aux valeurs de NDVI de la classe 212 qui sont elles aussi en moyenne inférieures aux valeurs de NDVI de la classe 211.

L'allure générale de ces courbes moyennes est similaire à celle des séries de boîtes à moustache. Pour les 7 groupes, nous observons des dynamiques similaires :

- Des valeurs élevées de NDVI au début du mois d'avril qui diminuent jusqu'à la fin du mois d'avril;
- Puis entre début et fin juin, les valeurs moyennes de NDVI passent par un maximum, souvent supérieur à celui de début avril ;
- Ensuite, ces valeurs baissent plus au moins fortement, et plus ou moins régulièrement entre fin juin et fin août ;
- Et au final, les valeurs moyennes de NDVI augmentent à nouveau début septembre.

Globalement pour l'ensemble des 7 groupes, on observe que plus les valeurs moyennes de NDVI sont fortes, plus les variations sont importantes : le groupe 22 est celui qui présente le moins de variation, alors que le groupe 122 est celui qui présentent les plus fortes variations. L'amplitude de ces variations sur d'aussi courtes périodes est assez inattendue : à cause du fort couvert des palmiers dont les couronnes sont constituées par des palmes vertes tout au long de l'année, les valeurs moyennes de NDVI auraient dû être plus constantes. Ces variations de NDVI sont sans doute en relation avec la phénologie des palmiers, et la succession des différentes périodes du cycle végétatif. Ainsi la baisse observée des valeurs moyennes de NDVI jusqu'à la fin du mois d'avril pourrait être due à une baisse de l'activité chlorophyllienne produite par le développement rapide des inflorescences féminines (Ben Khalfallah et al., 2018), et à partir de juin l'activité chlorophyllienne redémarrerait jusqu'à atteindre rapidement une valeur maximale, puis elle diminuerait progressivement en raison du climat avec les fortes températures estivales, et aussi en raison du développement des fruits. A partir de début septembre, la reprise de l'activité chlorophyllienne serait dû à l'augmentation de la phytomasse de la couronne suite au développement des palmes qui sont apparues progressivement au cours de l'été (Ben Khalfallah et al., 2018). Ces résultats impliquent la mise en place d'un véritable suivi sur le terrain non seulement sur la phénologie du palmier, mais également sur les pratiques agricoles (culture du palmier, et autres cultures fruitières, maraichères, fourragères...; irrigation; entretien des parcelles), ainsi que certaines variables climatiques (température, précipitation, humidité).

A titre comparatif, la Figure 30 représente les valeurs moyennes du NDVI d'avril à septembre pour des sites de références pris dans d'autres milieux : steppes, montagnes, zone de salinité du chott et piste d'aéroport.

On observe les valeurs les plus faibles pour la zone de salinité du Chott el Djérid, ainsi que pour la piste de l'aéroport. Le site pris sur la montagne et surtout celui pris sur la steppe présentent les valeurs de NDVI les plus élevées par rapport aux autres milieux, mais les

valeurs restent globalement en dessous de 0,2 ce qui présente des sols nus sans végétation. Pour ces deux milieux, les courbes sont décroissantes d'avril à août, mais avec remontée plus ou moins marquée en mai et juin, principalement pour la steppe.

On peut dire que les valeurs du NDVI des oasis, telles présentées dans la Figure 23 par les courbes moyennes des groupes restent supérieures à celles de la steppe durant toute la période, sauf pour le groupe 22 dont la courbe moyenne est très proche de celle de la steppe. De plus, l'allure des courbes de la montagne et des steppes est proche de celle de oasis : les valeurs diminuent au cours du mois d'avril, puis elles augmentent en mai et aussi en juin pour les steppes, puis elles diminuent à nouveau jusqu'à des valeurs minimales en juillet et en août, avant de remonter en septembre.



Figure 30 : Variations des valeurs de NDVI moyen des sites de références sélectionnées pour la période d'avril à septembre 2015

L'hétérogénéité des périmètres irrigués peut être abordée par rapport à la valeur seuil de NDVI si on la fixe à 0,2 : si le NDVI est supérieur à 0,2, le pixel présente une activité chlorophyllienne, si elle est inférieure à 0,2 alors le pixel ne présente pas d'activité chlorophyllienne. Nous avons donc pu calculer très facilement par périmètre irrigué le pourcentage de pixels dont la valeur de NDVI était supérieure à 0,2, ainsi bien sûr que le pourcentage dont la valeur était inférieure à 0,2. Et nous avons pu également calculer les

pourcentages moyens de ces 2 types de pixels pour les 7 groupes issus de la CAH. Les résultats montrent que le groupe 22 ne présente en moyenne qui 40% de pixels avec une valeur de NDVI supérieure à 0,2 : pour ces périmètres la majorité de leur surface sont des sols nus sans culture et sans palmiers pour cette période. Les groupes 212 et 211 présentent respectivement des valeurs moyennes pixels supérieurs à 0,2 de 70% et 75% : les sols nus occupent donc encore en moyenne entre 25 et 30% de la surface du périmètre. Les groupes de la branche 1 du dendrogramme (112, 111, 122 et 121) sont caractérisés par un pourcentage moyen de pixels de NDVI supérieurs à 0,2 supérieur à 85%. Donc non seulement il existe des différences entre ces périmètres de la région de Tozeur au niveau de l'irrigation, de l'âge, de la hauteur et de la densité de plantation des palmiers, mais également en termes de rapport de surface de sol nu et de surface plantée.

4.2. La cartographie des dynamiques de végétation des oasis

Pour aller plus dans le détail sur l'analyse des séries temporelles issues des données satellites, et toujours afin d'estimer par télédétection la dynamique de la végétation des systèmes oasiens, nous avons utilisé la même série de 26 images satellites SPOT5 (Take5) acquises entre avril et septembre 2015 (Annexe 1). Après avoir calculé le NDVI sur les oasis, nous avons calculé sur toute la période d'avril à septembre 2015 le NDVI moyen pour toutes les dates (Figure 31 et Figure Figure 32) et l'écart moyen de chaque date, et nous avons ensuite calculé l'écart moyen pour les 26 dates (Figure 33 et Figure 34). Cela permet d'identifier l'activité chlorophyllienne moyenne de chaque pixel, ainsi que sa variabilité pour cette période, et donc au final de caractériser l'activité chlorophyllienne des périmètres, ainsi que leur variabilité pour une courte période donnée.

La carte du NDVI moyen (Figure 31) révèle la tendance pour chaque périmètre irrigué en termes d'activité chlorophyllienne pour la période avril-septembre 2015 :

- Les oasis traditionnelles, Nefta, Tozeur, El Ouedienne et El Hamma présentent les plus fortes valeurs moyennes de NDVI. Mais elles ne sont pas les seules, certains périmètres récents comme El Faraj, Sif Lakhdhar, Ghardgaya, Essonni, tous situés à proximité de Nefta, présentent également des fortes valeurs moyennes de NDVI.
- Mais en général, les périmètres récents ont des valeurs moyennes de NDVI intermédiaires, comme Ibn Chabbat, Chamsa, Oasis et Zakaria, Cedada GIC, Makmen AB. Seuls quelques périmètres récents présentent des faibles valeurs moyennes de NDVI, comme Mraah Lahouar 1 et 2, Cedada SMVDA et Ghedira SMVDA.



Chapitre 2 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à haute résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une courte période

Datum : WGS84 UTM 32N

Figure 31 : Carte du NDVI moyen calculé pour les 26 dates sur l'ensemble des PPI



Datum : WGS84 UTM 32N

Figure 32 : Carte du NDVI moyen calculé pour les 26 dates sur la région de Nefta

Grâce à la résolution spatiale de 10m des images SPOT5 (Take5), des zooms peuvent être fait sur cette carte sur chaque périmètre irrigué. L'exemple pris sur la région de Nefta (Figure Figure 32) montre grâce à la finesse des détails visibles l'hétérogénéité intra-périmètre :

- On devine alors par exemple dans les périmètres anciens comme Beni Ali, Fatnassa et Remada, les routes ou chemins qui les parcourent, les zones sans végétation qui peuvent correspondre soit à du bâti, soit à des parcelles abandonnées ;
- Dans le périmètre illicite d'El Ghaouatine, les quelques parcelles mises en cultures ;
- Et dans le périmètre très récent de Zaafrana, les parcelles qui se sont les mieux développées.

La carte des écarts moyens de NDVI (Figure 33) permet d'appréhender la variabilité du NDVI pour la période considérée (avril-septembre 2015). Cette carte montre que globalement cette variabilité est faible : l'écart-moyen du NDVI est très souvent inférieur à 0,06, voire proche de 0. Mais il existe localement des différences inter-périmètres remarquables :

- La plupart des périmètres sont généralement avec de très faibles valeurs d'écartmoyen, mais ponctués de nombreuses petites régions avec des valeurs plus fortes d'écart-moyen. Les périmètres présentent donc très souvent une hétérogénéité spatiale intra-périmètre marquée, même à l'échelle régionale.
- Cependant certains périmètres apparaissent plus homogènes, ce sont alors en général des petits périmètres récents comme Dghoumes plaine au NE et Ghardgaya au SW.

Un nouveau zoom fait sur la région de Nefta, permet de mieux voir en détail la variabilité spatiale de l'écart-moyen du NDVI :

- Les périmètres anciens, Beni Ali, Fatnassa et Remada, présentent des écarts-moyens plutôt intermédiaires à forts, mais avec localement des écarts-moyens faibles. Ces derniers correspondent très clairement aux zones sans végétations (parcelles abandonnées, bâtis). On note des différences dans l'organisation spatiale intra-périmètre des valeurs d'écart-moyen. Certains secteurs ont des valeurs nettement plus fortes que d'autres, et au contraire d'autres secteurs ont des valeurs d'écart-moyen plus faibles.
- Les 3 périmètres modernes de cette région sont très différents, et ils sont nettement plus homogènes que les anciens. Le périmètre d'El Faraj est celui qui présent les plus fortes valeurs d'écart-moyen, Zaafrana les plus faibles, et Sif Lakhdhar les valeurs intermédiaires.



Chapitre 2 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à haute résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une courte période

Datum : WGS84 UTM 32N

Figure 33 : Carte de l'écart moyen du NDVI calculé pour les 26 dates sur les PPI



Datum : WGS84 UTM 32N

Figure 34 : Carte de l'écart moyen du NDVI calculé pour les 26 dates sur la région de Nefta
Un essai de carte de synthèse a été tenté à partir des 2 cartes précédentes, celle de la moyenne du NDVI et celle de l'écart-moyen du NDVI, afin de mettre en évidence les différences d'organisation spatio-temporelle inter et intra-périmètre. A partir de ces deux cartes, 6 classes de valeurs ont été construites arbitrairement sur l'ensemble des valeurs rencontrées dans les 38 PPI (Figure 35) :

- classe 1 = fortes valeurs moyennes de NDVI avec de forts écart moyens,
- classe 2 = fortes valeurs moyennes de NDVI avec de faibles écarts moyens,
- classe 3 = valeurs moyennes intermédiaires de NDVI avec de forts écarts moyens,
- classe 4 = valeurs moyennes intermédiaires de NDVI avec de faibles écarts moyens,
- classe 5 = faibles valeurs moyennes de NDVI avec de forts écarts moyens, et
- classe 6 = faibles valeurs moyennes de NDVI avec de faibles écarts moyens.

La répartition spatiale de ces 6 classes de pixels s'organise en fonction du type de périmètre irrigué, voire en fonction de certaines caractéristiques intra-périmètres (Figure 36).

Ainsi le périmètre moderne d'El Faraj apparaît comme très homogène en étant presqu'exclusivement constitué par la classe 6 : ses valeurs moyennes de NDVI sont élevées, ainsi que ses écarts-moyens. Les périmètres traditionnels comme ceux de Beni Ali, Fatnassa et Remada sont plutôt constitués majoritairement par les classes 2 et 4 : les NDVI moyens sont forts à intermédiaires avec des faibles écarts-moyens. La répartition de ces 2 classes n'est pas homogène à l'intérieur de chacun de ces périmètres : tantôt l'une ou tantôt l'autre domine. La partie amont de Fatnassa qui correspond à la corbeille de Nefta est quant à elle constituée par les classes 1 et 3 : les NDVI moyens sont forts à intermédiaires mais avec des forts écarts-moyens. Le périmètre illicite d'El Ghaouatine est constitué majoritairement par la classe 6 (les NDVI moyens et les écarts-moyens sont faibles) avec en plus un peu de classe 3 et de classe 4 à l'emplacement des quelques parcelles présentent, où chaque exploitant a dû assurer sa propre irrigation pour le creusement de puits de surface, sans avoir accès au réseau d'irrigation connecté à un forage profond.



Moyenne

Figure 35 : Écart moyen de NDVI en fonction du NDVI moyen pour l'ensemble des pixels des 38 PPI sur la période avril-sept. 2015



Figure 36 : Carte synthétique des variations spatio-temporelles de l'activité chlorophyllienne des PPI de la région de Nefta, basée sur les valeurs moyennes et les écarts moyens du NDVI calculés sur la période avril-sept. 2015

Ces cartes de synthèse spatio-temporelles de l'activité chlorophyllienne des PPI ont beaucoup intéressé les services agricoles grâce à leur précision spatiale (pixels à 10m). Les personnes présentes lors des présentations de ces résultats se sont posées un certains nombres de questions en reconnaissant parfaitement des lieux qui leur étaient familiers : les variétés et/ou la densité des palmiers plantés dans ces périmètres sont sans doute les principaux facteurs de l'organisation spatiale de ces classes. Le périmètre d'El Faraj est constitué exclusivement de la variété *Deglet Nour*, plantée régulièrement avec un espacement fixe, et pratiquement sans aucune autre culture, alors que les périmètres traditionnels sont plantés avec une plus forte densité de palmiers, et une plus forte diversité variétale, et également avec d'autres cultures fruitières, fourragères et maraîchères.

5. Synthèse et conclusion du deuxième chapitre

Dans ce chapitre, nous avons cherché à évaluer le potentiel d'une série temporelle d'images optiques de télédétection à haute résolution spatiale pour décrire l'état de la végétation dans les périmètres publics irrigués (PPI) des oasis de la région du Djérid. Pour ce faire, nous avons pu exploiter les images produites par l'expérience SPOT5 (Take5) sur la région de Nefta-Tozeur d'avril à septembre 2015 tous les 5 jours, et nous ne nous sommes intéressés qu'à une seule variable calculée pour chaque image, un indice radiométrique classique de végétation : le NDVI.

Dans un premier temps, nous avons exploré cette série temporelle à partir des boîtes à moustaches calculées pour chacun des 38 PPI sélectionnés sur la région. Deux premiers résultats importants sont à retenir : 1) il existe une grande diversité des valeurs de NDVI, à la fois spatiale et temporelle, inter et intra-périmètre, et ce malgré la faible étendue de la région et la courte période d'étude ; 2) un seuil d'activité chlorophyllienne a été retenu à la valeur 0,2 du NDVI pour cette série d'images. Les valeurs médianes varient globalement entre 0,2 et 0,6. Certains périmètres sont homogènes avec des fortes valeurs de NDVI, alors que d'autres sont hétérogènes également avec des fortes valeurs. Ces séries temporelles de boites à moustaches sont sans doute un bon outil pour un suivi individuel régulier de l'évolution de l'activité chlorophyllienne d'un périmètre.

Dans un deuxième temps, face à la diversité des séries temporelles de boites à moustaches, nous avons effectué un regroupement des 38 PPI en 7 classes à l'aide d'une classification ascendante hiérarchique calculée à partir des valeurs moyennes de NDVI pour chaque date. L'analyse de ces 7 classes de séries temporelles moyennes de NDVI révèle que l'activité chlorophyllienne des 38 PPI de la région présente une même signature temporelle dans le sens d'une corrélation positive, surtout entre avril et juin, mais avec des niveaux moyens de NDVI très différents. Ces 7 classes se rangent de façon croissante depuis celle avec le moins d'activité chlorophyllienne, avec un NDVI moyen inférieur à 0,2, jusqu'à celle avec le plus d'activité chlorophyllienne, aux alentours de 0,6. Ces 7 classes sont bien sûr à mettre en relation directe avec les densités de plantations des palmiers, leur âge et la présence d'autres cultures dans les étages inférieurs : plus la densité de plantation, la maturité des palmiers et les autres cultures sont importantes, plus la valeur du NDVI sera forte. Mais la variété des palmiers semble jouer un rôle important également, car la classe qui présente les plus fortes

valeurs de NDVI est majoritairement constituée par des périmètres modernes exclusivement plantés avec la variété Deglet Nour, ceux sont les périmètres d'El Faraj, d'Essonni, de Ghardgaya, et de Sif Lakhdar ; le seul périmètre traditionnel plurispécifique de cette classe est El Ouedienne. D'autres périmètres modernes monospécifiques en Deglet Nour appartiennent à d'autres classes, à l'activité chlorophyllienne moyenne moins fortes, mais la différence tient alors au fait que le niveau de développement de ces périmètres est souvent moins avancé, soit parce que les parcelles sont plus jeunes, soit parce qu'il existe des problèmes importants au niveau de l'irrigation (quantité et qualité), de la salinisation ou de l'hydromorphie des sols. D'autre part, les changements rapides de NDVI observés en début (avril-juin) et en fin (aoûtseptembre) de période, que l'on observe pour toutes les classes, est sans doute à mettre en relation avec le cycle végétatif des palmiers (fin de floraison et début de fructification, et développement de la frondaison). Cette hypothèse forte reste encore à valider par la mise en place d'un dispositif d'observation adéquat sur le terrain avec les images Sentinel2 qui sont également à 10m de résolution et qui depuis septembre 2017 sont également avec une répétitivité de 5 jours.

Dans un troisième temps, il nous est apparu important de revenir à l'aspect cartographique des images satellites, tout en conservant l'information temporelle de la série d'images. Pour cela, deux cartes ont été réalisées sur l'ensemble des PPI : celle du NDVI moyen, et celle de l'écart moyen, toujours avec la résolution spatiale du pixel à 10m. Et au final, une carte synthétique a été calculée à partir du diagramme bidimensionnel écart-moyen du NDVI=f(moyenne du NDVI), en définissant 6 classes obtenues à partir de 3 classes de valeurs de NDVI moyen (fort, intermédiaire et faible) et de 2 classes d'écart-moyen de NDVI (fort et faible). Ces 6 classes traduisent à la fois l'activité chlorophyllienne moyenne et sa variabilité moyenne pour la période considérée (avril-septembre), pour chaque pixel. La cartographie de ces 6 classes révèle une organisation spatiale riche d'informations pour chaque PPI, en termes de diversité, de dominance et de répartition de ces classes. Cette carte de synthèse est une sorte d'empreinte spatio-temporelle pour chaque PPI à une période donnée, dans notre cas pour les saisons cumulées printemps et été. Elle met en évidence l'hétérogénéité spatiale intra-périmètre. On peut ainsi « voir » par exemple dans les périmètres traditionnels les zones abandonnées ou avec du bâti, et dans les périmètres récents les différents niveaux de développement entre les parcelles. Il serait intéressant de refaire ce même type de carte, pour différentes saisons et de faire des comparaisons d'une année sur l'autre

En conclusion, l'ensemble des résultats obtenus dans ce chapitre à partir de l'exploitation d'images de télédétection à haute résolution spatiale présentent donc un grand intérêt pour la

caractérisation et le suivi du développement des systèmes oasiens à une échelle locale, simplement à partir d'un indice de végétation tel que le NDVI

Sommaire

1.	Introduction	96
2.	La série temporelle des produits MOD13Q1-NDVI	98
3.	Le suivi pluriannuel de la végétation à partir de sites individuels	102
4.	Le suivi pluriannuel de la végétation par des cartes de synthèse	136
5.	Synthèse et conclusion du troisième chapitre	166

1. Introduction

La dynamique des écosystèmes arides et semi-arides est plus ou moins difficile à comprendre selon que l'on prend en considération l'année, la décennie, ou encore le siècle (Berg & Kellner, 2005).

La perturbation chronique, appliquée aux communautés naturelles, permet de produire des changements qui s'apparentent à la succession régressive (Sukopp, 2004). La succession progressive, par exemple dans un champ abandonné, dépend de l'histoire de son affectation ainsi que des caractéristiques biotiques de l'environnement (Waldhardt & Otte, 2003). La mise en défens des milieux non trop dégradés permet un accroissement du couvert végétal des espèces pérennes présentes même à des couverts très faibles. A moyen terme, elle ne permet cependant pas le retour des espèces végétales ayant déjà disparues du milieu en question (Chaieb *et al.*, 1989). L'évolution de la formation végétale peut aussi être linéaire. L'ensemble des espèces végétales présentes (cortège floristique) peut évoluer vers un groupement en équilibre avec les conditions écologiques (équilibre en réalité instable bien entendu), ce qui correspond au terme un peu désuet de « climax » ; il s'agit alors d'une dynamique progressive. Si l'évolution se traduit par une détérioration du couvert végétal, qui peut aller jusqu'à la dénudation complète du sol, la formation se trouve donc en une dynamique régressive (Boudet, 1984).

Notre objectif consiste à proposer des méthodes de caractérisation des systèmes oasiens, adaptée à l'échelle de notre site d'étude, en se basant sur l'utilisation d'une série temporelle d'images issues du capteur MODIS. Nos travaux portent plus spécifiquement sur le choix d'un indice spectral adapté pour la caractérisation de l'état de la végétation dans les oasis dont le taux de couvert végétal est très hétérogène et sur le développement d'une méthode de cartographie des surfaces de végétation annuelles. Le résultat doit permettre de fournir une information sur l'état des systèmes oasiens à une échelle venant en complémentarité d'autres produits MODIS adaptés à l'échelle du pays.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les traitements réalisés sur une série temporelle d'images NDVI produites par MODIS pour caractériser les dynamiques de végétation des oasis du site d'étude. Pour cela, les images devraient ainsi permettre de caractériser le cycle des saisons et leur impact sur le fonctionnement des oasis. De plus, étant donnée la profondeur historique des données (depuis l'année 2000 pour ces produits MODIS), on devrait également suivre les variations interannuelles de la végétation. Aussi, certaines dynamiques temporelles particulières pourraient certainement encore être repérées comme par exemple l'implantation de nouveaux périmètres avec le développement des palmiers d'année en année (croissance de la couronne, augmentation de la phytomasse), ou bien comme la convergence des axes de drainage en aval des oasis en liaison avec des processus d'hydromorphie et de salinisation. On cherchera donc à distinguer les variations saisonnières des dynamiques interannuelles.

1.1. Détermination des paramètres traduisant la dynamique de végétation des oasis

La dynamique de végétation des oasis se caractérise par des successions de formations végétales observables à différentes échelles dans l'espace et dans le temps. Les changements identifiés affectent la structure de la végétation, sa composition floristique et son fonctionnement. La dynamique de végétation dans les oasis du site d'étude correspond :

- A une évolution progressive. Elle se traduit par une modification de la structure de la végétation, une augmentation du taux de recouvrement de la végétation et une végétation de plus en plus active (accroissement de la biomasse verte produite).
- A une évolution régressive. Elle se traduit par une diminution du taux de recouvrement de la végétation au profit du sol nu, une modification de la composition en espèces, et une végétation de moins en moins active (diminution de l'activité chlorophyllienne produite).
- A une stabilité des oasis. Elle se traduit par un maintien du taux de recouvrement de la végétation avec la présence ou non des trois strates (palmier, fruitier, herbacée), un maintien de l'activité végétale (niveau stable de l'activité chlorophyllienne produite).

Ces trois types d'évolution des oasis s'appuient sur les mêmes paramètres biophysiques de la végétation mais se différencient par le sens de variation de ces derniers. Ces paramètres peuvent être estimés à partir de données de télédétection en utilisant des valeurs de réflectance dans les bandes spectrales du Rouge (R) et Proche Infrarouge (PIR). L'indice de végétation NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index* (Rouse *et al.*, 1974), est le plus fréquemment utilisé pour évaluer la couverture végétale vivante comme nous l'avons dit dans le premier chapitre.

Il traduit l'activité photosynthétique de la plante qui est étroitement corrélé au taux de recouvrement de la végétation (Purevdoj *et al.*,1998 ; Wessels *et al.*, 2001) et à la production de biomasse verte (Wang *et al.*, 2004). Il est un bon indicateur de l'activité de la végétation, par sa sensibilité aux variations spatiales et temporelles des conditions phénologiques du couvert végétal (Huete *et al.*, 2002). Malgré ses limites, dont sa sensibilité modérée au sol

sous-jacent et aux conditions atmosphériques, le NDVI reste un indice simple, très robuste et parmi les plus largement utilisés pour suivre la dynamique de végétation des régions arides. Dans ce travail, l'indice de végétation NDVI est considéré comme la donnée indirecte pour mesurer les paramètres dont les variations traduisent la dynamique de végétation dans les oasis.

Les changements écosystémiques peuvent être classés en trois classes (Verbesselt *et al.*, 2009), à savoir :

 (I) Un changement brutal qui pourrait modifier complètement le système, résultant de perturbations parmi lesquelles la déforestation, l'urbanisation, les inondations et les incendies ;

(II) Un changement saisonnier, qui résulte de l'interaction annuelle de variables climatiques pouvant affecter le cycle annuel de la phénologie des plantes ;

(III) Un changement graduel incluant la variabilité climatique interannuelle, les transitions dans la gestion des terres; la dégradation du sol. Dans les zones arides, le processus de dégradation des terres perturbe le cycle biologique de l'écosystème, ce qui peut entraîner la désertification (Zewdi *et al.*, 2017).

2. La série temporelle des produits MOD13Q1-NDVI

La base de données constituée comprend :

- Des séries temporelles d'images produites par MODIS, plus exactement le produit MOD13Q1-NDVI, présentées ci-après ;
- Des données de référence, issues d'observations de terrain (relevés sur la structure végétale des oasis et sur leurs caractéristiques) et d'images satellitaires à haute résolution spatiale, SPOT5 (Take5), que nous avons détaillées dans le chapitre précédent.

2.1. Le produit MOD13Q1-NDVI

Le radiomètre spectral pour une imagerie de résolution moyenne, traduction en français de l'acronyme MODIS, est une série d'instruments d'observation scientifique couplés à un système embarqué satellitaire. Lancé par la NASA à bord du satellite Terra en 1999, puis à bord du satellite Aqua en 2002, MODIS permet une observation à long terme des sols, de la biosphère, de l'atmosphère et des océans de la Terre et fournit des données tous les 1 à 2 jours sur 36 bandes spectrales de longueur d'onde de 0,4 à 14,4 µm avec 3 résolutions spatiales disponibles 250, 500 et 1000m. L'un des principaux objectifs du système MODIS est l'étude

à grande échelle (régionale et mondiale) de la végétation terrestre afin de mieux comprendre le fonctionnement de la Terre en tant que système en utilisant les indices de végétation qui fournissent d'une manière constante des éléments de comparaison temporelle des conditions de la végétation à l'échelle du globe (Didan *et al.*, 2015). Les images du capteur MODIS embarqué sur le satellite Terra sont particulièrement bien adaptées au suivi continu de la couverture végétale. Leur couverture journalière permet une approche basée sur le suivi de la dynamique des couverts végétaux en lien avec leur phénologie. De plus, la disponibilité des images en archive permet une analyse rétrospective des événements depuis le début de l'année 2000. Les images MODIS sont disponibles selon une organisation par dalle. La Tunisie se trouve dans la dalle MODIS H18-V05. Une seule image présente la totalité de la Tunisie, une grande partie de l'Algérie, une partie du Maroc, et de la mer Méditerranée comme le montre la Figure 37.



Figure 37 : Premier produit-image MODIS disponible pour la Tunisie en février 2000

Nous avons choisi de travailler sur une série d'images MODIS pour deux raisons principales : la couverture journalière de l'ensemble de la zone d'étude et la résolution spatiale, qui est la plus fine parmi les satellites à haute répétitivité temporelle. Afin de s'affranchir pour partie des effets liés aux différences de conditions d'acquisition des images d'un jour à l'autre, tels que les perturbations du signal liées aux conditions atmosphériques, nous avons utilisé des synthèses représentant le NDVI de chaque pixel calculé sur une période de 16 jours. La série d'images disponible couvre la période 2000-2016. Les variations temporelles des valeurs de NDVI que l'on peut mesurer avec ces images accompagnent

l'évolution saisonnière de l'activité végétale des oasis. Le Tableau 6 présente les principales caractéristiques du capteur MODIS.

Paramètres d'orbite		
Orbite	Héliosynchrone, quasi-polaire, circulaire	
Altitude	705 km	
Cycle orbitale	1 à 2 jours selon la latitude	
Intersection avec l'équateur	Descendant (TERRA) Ascendant (ACQUA)	
Heure	10h30 13h30	
Largeur de fauchée	2330 km	
Caractéristiques du capteur		
Nombre bandes spectrales	36	
Résolution spatiale	250m (Bandes 1-2)	
_	500m (Bandes 3-7)	
	1000m (Bandes 8-36)	
Utilisation des bandes	Bandes 1-7 : observation des terres	
	Bande 1 et 2 : limites Terre/nuages	
	Bande 3-7 : propriétés Terre/nuages	
Intervalle spectral (µm)		
Bande 1	0,620 - 0,670	
Bande 2	0,841 - 0,876	
Bande 3	0,459 - 0,479	
Bande 4	0,545 - 0,565	
Bande 5	1,230 - 1,250	
Bande 6	1,628 - 1,652	
Bande 7	2,105 - 2,155	
Types de produits proposés	Classement selon le domaine d'application	
Calibration	MOD01/MOD02/MOD03	
Atmosphère	MOD04/MOD05/MOD06/MOD07/MOD08/MOD	
Terre	35	
	MOD09/MOD11/MOD12/MOD13/MOD14/MOD	
Cryosphère	15/	
Océan	MOD16 MOD17/MOD43/MOD44/MCD45	
	MOD10/MOD29	
	MOD18/MOD19/MOD20/MOD21/MOD22/MOD	
	23/	
	MOD24/MOD25/MOD26/MOD27/MOD28/MOD	
	36/MOD37/MOD39	

Tableau 6 : Caractéristiques du capteur MODIS (Source : MODIS website)

Parmi les 68 produits standards proposés, un seul produit MODIS a été utilisé. Dans le Tableau 7 présentant leurs principales caractéristiques, ils sont regroupés selon les deux

domaines d'investigation abordés dans ce travail : la caractérisation des dynamiques de végétation et de l'état des oasis tunisiennes donc le produit MOD13Q1 est celui pour lequel les séries temporelles font l'objet des développements méthodologiques.

Dynamique de végétation		
Produit MOD13Q1 v5	Produit : Indices de Végétation	
Résolution spatiale	250 m	
Bandes spectrales utilisées	1-2-3-7	
Indices de végétation calculés	NDVI et EVI	
Bande qualité	1 par indice de végétation – codée sur 16 bits avec 11	
	paramètres - description disponible dans (Huete. et	
	al., 1999)	
Résolution temporelle	16 jours	
Projection	Sinusoïdale	
Adresse téléchargement	Earth Observation System (EOS) Data Gateway	
	(http://lpdaac.usgs.gov)	

Tableau 7 : Descriptif des produits MODIS utilisés

La disponibilité des images depuis février 2000 pour le produit MOD13Q1 permet de définir une période d'analyse assez longue (2000-2016). Au total, 384 synthèses à 16 jours d'indices de végétation (MOD13Q1) ont été utilisées dans ce travail.

Produit MODIS utilisé pour la caractérisation des dynamiques de végétation

Le produit MOD13Q1 correspond à des synthèses produites à partir des données journalières de réflectances de surface corrigées des effets atmosphériques, acquises sur une période de 16 jours. Chaque pixel de 250 m contient les valeurs de réflectance de surface dans les bandes 1, 2, 3 et 7 et les valeurs pour les deux indices de végétation calculés, NDVI et EVI. Quatre méthodes de fabrication des synthèses, appliquées de pixel à pixel, sont utilisées en fonction de la présence de nuages, indiquée dans la bande qualité, sur les images pendant la période de 16 jours (Huete *et al.*, 1999) :

- S'il n'y a aucun jour sans nuage, la méthode MVC (Maximum Value Composite) est appliquée. Elle consiste à calculer pour tous les jours les valeurs de NDVI et à conserver la valeur de NDVI la plus élevée sur la période de 16 jours.
- S'il y a un seul jour sans nuage, les valeurs de réflectance de surface pour la période de 16 jours correspondent à celles observées le jour sans nuage.
- S'il y a moins de 5 jours sans nuage, la méthode CV-MVC (Constraint View Maximum Value Composite) est appliquée. Elle consiste à sélectionner les valeurs de réflectances de surface pour lesquelles ont été observées les deux plus petites valeurs d'angle zénithal sur la période de 16 jours et à calculer les valeurs de NDVI à ces deux dates. La valeur de NDVI conservée correspond à la plus élevée des deux.
- S'il y a au moins 5 jours sans nuages, la valeur de réflectances de surface du pixel dans la synthèse est calculée selon le principe du modèle BRDF de Walthall (Walthall G.L. *et al.*, 1985). Il s'agit d'obtenir à partir des valeurs de réflectances de surface pour des jours sans nuage les valeurs modélisées au NADIR pour la période étudiée à partir desquelles les indices de végétation sont calculés.

2.2. Les données de référence

Les données de terrain et cartographiques

Nous avons utilisé la série d'images issues du capteur SPOT5 prise lors de l'expérience (Take5) à haute résolution spatiale, dont les caractéristiques sont présentées dans le chapitre 2. Ces images sont exploitées par photointerprétation, validées avec les mêmes références de terrain utilisées pour le traitement des séries temporelles MODIS. Les campagnes de terrain sont détaillées dans le chapitre 2.

3. Le suivi pluriannuel de la végétation à partir de sites individuels

La caractérisation de la dynamique de végétation des oasis est basée sur l'analyse des variations interannuelles de NDVI mesurées à partir d'une série temporelle d'images MOD13Q1. Nous estimons que les évolutions recherchées (régressive, progressive ou stabilité) se traduisent par un changement, ou pas, mesurable sur le profil temporel du NDVI des formations végétales étudiées. La méthode consiste alors à définir un indicateur qui permet de mesurer s'il y a effectivement un changement.

Notre approche repose sur les hypothèses suivantes :

1. Le NDVI obtenu à partir des données satellitaires MOD13Q1 peut être utilisé pour surveiller les écosystèmes d'oasis.

2. Les variations des signatures spatio-temporelles dérivées du NDVI sont cohérentes pour toutes les oasis mais avec des variations globales significatives au cours de la période d'étude.

3. Les différents types d'oasis peuvent être distingués par ces signatures temporelles obtenues à partir du NDVI, permettant d'estimer la dynamique végétale.

Donc notre objectif est de mettre en évidence les évolutions qui marquent les oasis de Djérid sous l'impact des changements globaux, qu'ils soient d'ordre climatique, environnemental, social ou économique, et ce pour la période récente, de 2000 jusqu'à 2016.

La mise en évidence et le suivi de ces évolutions doivent permettre *in fine* de répondre à deux types de questionnement menés en parallèle aux mêmes échelles spatio-temporelles à partir des données MODIS bien sûr, mais aussi d'autres types de données disponibles (pluviométrie, observations de terrain...) :

i. Les oasis dans leur environnement

- En quoi ces signatures spatio-temporelles renseignent-elles sur les processus biophysiques qui affectent ces régions, comme par exemple les différents cycles de la végétation (naturelle ou cultivée), de l'eau et de certains phénomènes qui touchent les sols (salinisation, ensablement), en distinguant si possible les phénomènes saisonniers, des dynamiques interannuelles et des épisodes exceptionnels.

ii. Les oasis entre elles

- A partir de ces signatures spatio-temporelles, peut-on élaborer une typologie des oasis en fonction de leurs caractéristiques propres (diversité des espèces cultivées, organisation spatiale des plantations et des parcelles, âge, systèmes et tours d'irrigations...) ?

- Peut-on extraire de ces signatures les variations saisonnières et interannuelles de la végétation qui renseignent les causes de ces variations (phénologie, pratiques culturales, stress hydrique ou salin, phytopathologie...) ?

Dans un premier temps, les profils des moyennes mensuelles de NDVI sur la période 2000-2013 (Figure) ont été calculés pour un certain nombre de sites sélectionnés à l'échelle de toute la Tunisie. C'est une première phase de test a été réalisée en sélectionnant 15 sites pris dans différentes régions tunisiennes, dont 7 sites pris dans les régions oasiennes et un site pris dans la forêt méditerranéenne au nord de la Tunisie, afin de comparer les signatures des principaux types de milieux. La taille des pixels (250m) par rapport à la taille des parcelles (< 1ha) est le point faible de ce type de données. Les variations de NDVI observées traduisent les variations de l'activité végétale. Les profils des oasis se caractérisent par des variations saisonnières du NDVI très similaires (pas de décalage temporel des phases de développement

de la végétation), mais des valeurs minimales et maximales de NDVI différentes. La phase de croissance de la végétation de NDVI démarre à la dernière synthèse d'août pour atteindre un maximum d'activité photosynthétique à la mi-novembre marquant la phase de la récolte des palmiers. La phase de croissance de l'activité chlorophyllienne de la végétation dure 4 mois. Le NDVI décroit à partir de la première synthèse mensuelle de janvier, pour atteindre des minimums entre juin et juillet. C'est le contraire pour les autres types de cultures, en prenant l'exemple des cultures pluviales où la phase de croissance de la végétation démarre à la première synthèse de novembre avec les premières pluies importantes pour atteindre un maximum d'activité photosynthétique à la dernière synthèse de mars. De plus, la forêt méditerranéenne située au nord de la Tunisie présent les valeurs de NDVI les plus fortes avec deux cycles de valeurs basses et hautes, respectivement en janvier et juin pour le premier cycle, et en août et octobre pour le second. A l'opposé, le chott, le sable, et le lac, montrent des valeurs très faibles de NDVI tout au long de l'année avec des signatures stables. Les oasis se caractérisent par un type de signature spécifique qui se distingue des autres principaux milieux rencontrés en Tunisie, qu'ils soient naturels ou anthropiques (Ben Khalfallah et al., 2018).



Figure 38 : Les signatures mensuelles moyennes de 16 sites tunisiens obtenues à partir des produits MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2013

Après cette phase de test réalisée à l'échelle de la Tunisie, deux techniques de traitement de la série temporelle des images MOD13Q1-NDVI sont mises en œuvre pour détecter les changements traduisant les dynamiques de végétation des oasis : 1) une méthode basée sur la technique de décomposition temporelle des séries temporelles de NDVI prises par MODIS (Verbesselt *et al.*, 2009), 2) et une méthode basée sur la classification ascendante hiérarchique (CAH) des courbes de tendance issues de la décomposition temporelle. Les deux méthodes ont été appliquées à l'aide du logiciel *R project*. Les différents groupes de tendances retenus au final sont interprétés en fonction de leur stabilité et des variations interannuelles, et sont validés par les observations de terrain.

3.1. La méthodologie : décomposition temporelle des séries MOD13Q1-NDVI

3.1.1. Repérer les stades phénologiques clés

A partir de l'analyse du profil NDVI des oasis, on définit un indicateur phénologique utilisé comme une mesure indirecte des paramètres biophysiques du couvert végétal dont les variations interannuelles traduisent les dynamiques de végétation des oasis.

Les variations interannuelles du NDVI sont liées aux phases de développement de la végétation. Les changements saisonniers peuvent être décrits à partir d'un ensemble de métriques phénologiques, de l'anglais « phenologic metrics », traduisant des phénomènes ou processus complexes. Ces métriques phénologiques correspondent à des dates ou des valeurs de NDVI rendant compte des stades précis de développement de la végétation (Tableau 5) (Jaquin, 2010).

Tableau 8 : Exemples de métriques phénologiques issus du profil MOD13Q1-NDVI annuel etinterprétation phénologique

Métriques phénologiques (mesures dérivées de la série interprétation phénologique)					
1. Date de démarrage de la phase de croissance	- Début de l'activité chlorophyllienne				
2. Valeur de NDVI au démarrage de la phase	- Niveau d'activité chlorophyllienne au démarrage de				
croissance _Minimum NDVI	de la phase de croissance				
3. Date du maximum de NDVI	- Date du maximum d'activité chlorophyllienne				
4. Valeur de NDVI à la date du maximum	- Niveau maximum de l'activité chlorophyllienne				
5. Durée de la phase de croissance de NDVI	- Durée de la phase de croissance				
6. Cumul de NDVI entre le NDVI au démarrage	- Biomasse verte produite pendant la phase de				
de la phase de croissance et le maximum atteint	croissance				

La Figure 39 montre le profil annuel de NDVI d'une végétation de type savane et ses métriques adaptés de Reed *et al.* (1994). La Figure 40 montre le profil annuel de NDVI d'une végétation dans un système oasien. Ces deux figures montrent la différence entre la signature d'une végétation et la signature d'un système oasien.



Figure 39: Profil de NDVI d'une végétation de type savane et ses métriques phénologiques (adapté de Reed et al. (1994))



Figure 40 : Profil des variations saisonnières de NDVI d'une végétation de type oasis et ses métriques phénologiques (adapté de Ben Khalfallah et al., 2017)

Les méthodes utilisées pour identifier et interpréter la dynamique de la végétation reposent sur des mesures statistiques, par pixel, du taux de changement des valeurs de NDVI ou des variations et des pentes de la courbe de NDVI. Deux types d'approches existent :

1) La première est basée sur l'utilisation de valeurs seuil de NDVI mesurées à différents moments du cycle phénologique (Lloyd, 1990 ; White *et al.*, 1997) ;

2) La deuxième consiste à ajuster une fonction à la série temporelle des NDVI pour modéliser le cycle phénologique et à partir duquel plusieurs mesures sont utilisées : les moyennes mobiles (Reed *et al.*, 1994), la courbure maximale (Zhang *et al.*, 2003).

Dans le cas où les couverts végétaux possèdent des profils annuels de NDVI bien définis, ces méthodes sont adaptées (Reed, 2006). En revanche, elles peuvent être difficiles à appliquer dans le cas où l'activité végétale des formations étudiées est perturbée par l'effet de facteurs environnementaux se traduisant par une variation anormale des valeurs de NDVI (Tucker *et al.*, 1991), comme cela est susceptible d'être observé pour les oasis. C'est pourquoi, dans ce travail, nous utilisons une autre approche pour identifier la variation de NDVI. Les dates de transition et valeurs de NDVI correspondantes sont identifiées sur les profils de NDVI établis sur la période étudiée.

A partir de l'analyse du profil du NDVI moyen, nous définissons un indicateur phénologique correspondant à une mesure indirecte de la vigueur de l'activité végétale et de la biomasse verte produite pendant la phase de croissance du cycle phénologique des oasis (Tucker & Sellers, 1986).

3.1.2. La courbe de tendance du NDVI issue d'une décomposition temporelle

Dans cette méthode, les dynamiques de végétation sont directement caractérisées par la courbe de tendance du NDVI mesurée sur plusieurs années. Cela fait appel à des techniques de décomposition de série temporelle. La tendance s'obtient en lissant la courbe brute par le calcul de moyennes mobiles de façon à annuler les variations siasonnières. Nous présentons, dans une première partie, le principe de la décomposition de série temporelle. Puis, dans une seconde partie, nous détaillons la méthode choisie dans le cadre de ce travail et nous expliquons comment est analysée la tendance pour caractériser les dynamiques de végétation des oasis. L'intérêt de ceci est d'une part de mieux comprendre et de mieux décrire l'évolution de la série, et d'autre part de prévoir son évolution (à partir de la tendance et des variations saisonnières).

Principe de la décomposition de série temporelle

On appelle série temporelle ou chronique ou série chronologique, une suite (Yt) d'observations chiffrées d'un même phénomène, ordonnées dans le temps. Les dates d'observations sont généralement ordonnées de manière régulière dans le temps.

Les méthodes de décomposition temporelle reposent sur la construction de modèle statistique décomposant une série temporelle d'une mesure continue dans le temps, comme celle de l'activité végétale dans notre cas, en (Brockwell & Davis, 1996 ; Cleveland & Delvin, 1988 ; Jacquin, 2010) :

1) courbe de tendance (linéaire ou de forme non linéaire présentant des points de rupture),

2) courbe de saisonnalité (fluctuations saisonnières moyennes de la végétation liées à sa phénologie) et,

3) courbe du bruit (résidus restant après élimination de la tendance et de la saisonnalité).



Figure 41 : Principe de la décomposition temporelle d'après Jacquin (2010)

Dans notre cas, chacun des termes caractérise le comportement du couvert végétal à différentes échelles de temps. Ces méthodes sont utilisées pour étudier la saisonnalité des couverts végétaux (Jönsson & Eklundh, 2002), pour détecter des changements en lien avec des pratiques agricoles (Millward *et al.*, 2006) et pour mettre en évidence des changements progressifs de la réponse de couverts végétaux en lien avec des épisodes climatiques particuliers comme des sécheresses (Fensholt *et al.*, 2009), avec, plus récemment, la possibilité d'identifier des ruptures dans la réponse de la végétation comme par exemple une reprise de l'activité végétale (Verbesselt *et al.*, 2009). La décomposition temporelle peut se décomposer en cinq phases, présentée dans la Figure 41.

• Phase 1 : Estimation de la tendance

La tendance correspond à l'évolution à long terme de la série, à partir de la tendance, plusieurs informations sont dérivées permettant d'identifier et décrire la nature des changements détectés. Il s'agit principalement de la durée sur laquelle la tendance est estimée, de la valeur de la pente renseignant sur l'amplitude du changement et du signe de la pente indiquant la direction du changement (Verbesselt *et al.*, 2009). Les méthodes existantes pour extraire la tendance d'une série chronologique sont dissociées selon deux cas. Dans le premier cas, la tendance a la forme d'une fonction connue (linéaire, exponentielle...). La démarche consiste à extraire la tendance en ajustant un modèle de régression adapté (linéaire ou autres) en appliquant la méthode des moindres carrés (voire la méthode d'ajustement de Mayer). Dans le second cas, la tendance a une forme quelconque. Il s'agit des cas où la tendance ne peut pas être modélisée par une fonction-type. La tendance est obtenue par un lissage local à l'aide de différentes techniques (moyennes mobiles ou médianes mobiles, par exemple). Dans ce cas, la tendance est mieux décrite que celle résultante de l'ajustement d'un modèle de régression.

• Phase 2 : Estimation des coefficients saisonniers

Selon le modèle de décomposition utilisé (additif ou multiplicatif), les données sont recalculées sans la tendance (reconstitution de la série chronologique en supprimant la composante tendance). Le modèle additif est adapté dans les cas où les variations saisonnières et accidentelles restent stables alors que la tendance monte ou descend. En revanche, le modèle multiplicatif est approprié lorsque les variations saisonnières et accidentelles dépendent de la tendance (Hill & Lewicki, 2007). Pour l'étude des couverts végétaux, le modèle additif est utilisé (Verbesselt *et al.*, 2009). La Figure 42 illustre l'exemple de modèle additifs. Dans ce modèle additif, on suppose que les 3 composantes : tendance, variations saisonnières et variations accidentelles (ou bruit, ou résidu) sont indépendantes les unes des

autres. Ensuite, à chaque pas de temps du cycle étudié, on calcule la moyenne (ou la médiane ou la moyenne corrigées des valeurs extrêmes) des données sans tendance (Sj) sur toutes les années étudiées (Š). On obtient la série des variations saisonnières (S'j), qui permet de caractériser le cycle phénologique de la végétation pour la période étudiée. Les variations saisonnières sont des fluctuations périodiques à l'intérieur d'une année, et qui se reproduisent de façon plus ou moins permanente d'une année sur l'autre.



Figure 42 : Exemple de modèle additif où les composantes tendance, saison et résidus sont indépendantes les unes des autres

• Phase 3 : Calcul de la série désaisonnalisée

Selon le modèle de décomposition utilisée, la série désaisonnalisée (Dt) est obtenue en soustrayant à la donnée initiale (modèle additif) ou en divisant (modèle multiplicatif) les variations saisonnières calculées à l'étape précédente.

• Phase 4 : Calcul de la série ajustée

La série ajustée correspond à la combinaison de la tendance et des variations saisonnières (composantes extraites à la première et à la seconde étape et retirée du calcul par la suite). Il s'agit d'une série sans le bruit (variations accidentelles). Cette série ajustée est comparée à la série initiale pour estimer la qualité de l'ajustement.

• Phase 5 : Calcul des variations accidentelles (ou résidus ou bruit)

Les résidus correspondent à l'écart persistant entre série initiale et série ajustée. Dans une série temporelle, les observations ne sont pas généralement indépendantes : On analyse l'autocorrélation définie comme la corrélation de deux mesures répétées décalées dans le temps par un intervalle de temps fixé.

Décomposition temporelle des séries MOD13Q1-NDVI

Le traitement des séries temporelles MOD13Q1-NDVI se fait par deux étapes. La première étape est le choix des points ou pixels à partir desquels les séries temporelles seront extraites, les données désirées (NDVI pour notre étude) et la période d'étude. La deuxième étape est la décomposition des séries temporelles de MOD13Q1-NDVI proprement dite. La Figure 43 illustre l'approche méthodologique utilisée dans ce chapitre.



Figure 43 : Traitement des séries temporelles de MOD13Q1-NDVI

Parmi les méthodes proposées pour décomposer des séries temporelles, certaines sont développées uniquement pour identifier des changements sur la saisonnalité (Jönsson & Eklundh, 2002), des changements sur les résidus (Millward *et al.*, 2006) ou des changements sur la tendance et la saisonnalité (Verbesselt *et al.*, 2009).

Nous avons utilisé R project pour faire la décomposition de la série temporelle avec la méthode de la moyenne glissante en faisant ressortir la saisonnalité. De par sa capacité à gérer des données aberrantes ou manquantes dans une série temporelle, elle fournit une estimation fiable et robuste de la tendance et de la saisonnalité. De plus, selon sa flexibilité, la simplicité de sa mise en œuvre et sa performance de calcul offrent la possibilité de traiter aisément un grand volume de données.

La composante « saison » permet de déterminer le cycle phénologique moyen de la végétation, valable pour la période couverte par la série temporelle et dans laquelle les effets dus à des changements sur la tendance ou sur les résidus sont éliminés. La composante « tendance », qui peut être modélisée par une fonction linéaire (avec ou sans ruptures), permet de déterminer des changements sur la tendance au cours de la période étudiée par l'analyse statistique de la valeur et du signe de la pente (De Beurs & Henebry, 2005).

Dans cette étude, 92 sites, composés d'un seul pixel MODIS, ont été sélectionnés pour extraire les séries temporelles MOD13Q1-NDVI depuis février 2000, jusqu'à septembre 2016, de façon à échantillonner au mieux l'ensemble des périmètres irrigués de la région Nefta-Tozeur avec au moins un site par périmètre, voire deux en tenant compte de la pente (amont et aval) ou de l'allongement du périmètre. L'extraction des séries temporelles pour ces 92 sites a été réalisée manuellement à partir du site <u>https://modis.ornl.gov/cgi-bin/MODIS/global/subset.pl</u>. Les données sont accessibles facilement par internet et sont déjà prêtes et corrigées des effets atmosphériques, la Figure 45 montre la répartition des sites sélectionnés.

Les séries temporelles de NDVI ainsi obtenues ont été décomposées à l'aide de la fonction *decompose* du logiciel *R project* en trois types de courbes : une courbe de tendance calculée sur l'ensemble de la période 2000-2016 en utilisant les moyennes mobiles, une courbe de variations saisonnières moyennes, et une courbe du bruit résultant. Cette décomposition est du type additif.

Nous appliquons la décomposition temporelle sur la série des 92 courbes MOD13Q1-NDVI sur la période de temps considérée pour analyser les dynamiques de végétation des oasis de Djérid. La Figure 44 permet d'illustrer, à partir d'un exemple, la courbe MOD13Q1-NDVI brute, et les trois composantes (tendance, saison, résidus) résultantes de la décomposition temporelle additive, pour un pixel MODIS d'une oasis.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 3 : Exemple de résultats de décomposition temporelle d'une série de MOD13Q1-NDVI obtenus à partir de la fonction decompose de R-project



Figure 45 : Localisation des 92 sites sélectionnés pour l'extraction des séries temporelles MOD13Q1-NDVI

• Caractérisation des changements de la composante « tendance » du NDVI

Les variations observées sur la composante « tendance » du NDVI sont caractérisées avec la même méthode que celle utilisée pour les métriques phénologiques à partir du NDVI, à savoir progression / régression / stabilité. Une interprétation par rapport aux changements de la composante « tendance » du NDVI et auxquelles sont associées une dynamique de végétation des oasis.

Nom des classes de	Signe de la pente	Interprétat	ion
tendance	de la tendance	Changement NDVI	Dynamique de végétation
Classe 1 Série régressive	Négatif	Baisse du NDVI sur tout le cycle phénologique	Evolution régressive
Classe 2 Série progressive	Positif	Augmentation du NDVI sur le tout cycle phénologique	Evolution progressive
Classe 3 Série stable	Négatif et positif	Maintien du NDVI sur tout le cycle phénologique	Evolution stable

Tableau 9 : Définition des classes de tendance du NDVI

3.1.3. Les apports du produit MOD13Q1-NDVI pour le suivi pluriannuel des oasis

L'analyse de la variabilité de la biomasse des oasis et des changements de leurs affectations représente des exemples majeurs d'application des produits MOD13Q1-NDVI dans des régions arides. La caractérisation de la dynamique de végétation des oasis est basée sur l'analyse des variations interannuelles de NDVI mesurées à partir d'une série temporelle d'images MODIS. Nous faisons l'hypothèse que les évolutions recherchées (régressive, progressive ou stable) dans les oasis se traduisent par un changement, ou pas, mesurable sur le profil temporel du NDVI obtenu à partir des courbes de tendances, suite à une décomposition temporelle de type additif.

Dans cette étude, les séries temporelles MOD13Q1-NDVI sont utilisées pour évaluer les changements temporels de la végétation dans les différentes oasis de Djérid. Les méthodes basées sur l'analyse de série temporelle d'images satellitaires tendent à supplanter les approches diachroniques. Elles présentent un plus grand potentiel pour détecter des processus

à long terme se traduisant par des modifications plus subtils du couvert végétal (Kennedy *et al.*, 2009).

Les résultats obtenus à partir des courbes de tendances sont utilisés comme indicateurs de cette évolution afin d'identifier les facteurs majeurs influencant ce changement en se basant aussi sur les enquêtes de terrain, sachant que celles-ci ne remontent pas systématiquement jusqu'en février 2000 : les observations faites lors de ces enquêtes décrivent les milieux que pour les années 2016, 2017 et 2018. Chaque nouvelle image produite dans les séries temporelles est utilisée pour mettre à jour les profils temporels des oasis et pour déterminer leurs types en termes de changements dans les pratiques culturelles. Cette approche offre la possibilité d'analyser des changements pendant la période couverte par la série temporelle. Le NDVI peut être calculé à différentes échelles spatiales (pour chaque pixel ou pour l'ensemble des pixels des oasis) et temporelles (annuel ou interannuel) pour mettre en évidence des changements de comportement ou d'état des couverts végétaux étudiés. L'analyse des variations interannuelles des valeurs de NDVI et spécialement les courbes de tendance sur la période 2000-2016 ont permis d'identifier et de dissocier les sites pour lesquels on mesure un changement significatif de l'activité végétale de ceux ne présentant pas de changement significatif, ainsi que ceux caractérisées par une diminution ou une augmentation significative de l'activité végétale. La composante « tendance » du NDVI, à partir de laquelle sont caractérisées les dynamiques de végétation des oasis, est calculée en prenant en compte toute la période 2000-2016. Avec cette technique de décomposition temporelle, les effets des variations saisonnières sont supprimés dans la composante « tendance ». Le résultat de la composante « tendance » correspond, pour chaque pixel, à une série des valeurs de NDVI à partir de laquelle sont discutées les tendances sur la période étudiée. L'analyse de l'allure des courbes de tendance a permis de caractériser l'état de chaque site. La tendance annuelle moyenne de la série temporelle de MOD13Q1-NDVI entre février 2000 et septembre 2016 est composée de 23 synthèses. L'analyse de chaque courbe de tendance prise individuellement serait trop longue à faire ici. La CAH a permis d'effectuer des regroupements, et c'est seulement chacun des 9 groupes obtenus qui sera discuté par la suite.

3.2. Résultats et discussion

3.2.1. La classification ascendante hiérarchique des courbes de tendances

Après la décomposition de la série temporelle, une classification ascendante hiérarchique (CAH) réalisée à partir des distances euclidiennes avec la méthode de ward2 a été appliquée à l'aide du logiciel *R project* aux courbes de tendance pour les 92 sites sélectionnés. A partir du

dendrogramme obtenu (**Error! Reference source not found.**), les 84 courbes de tendance ont été classées en 9 groupes pour la période 2000-2016, avec des effectifs variant de 5 à 16 sites (G1 : n=13; G2 : n=4; G3 = 13; G4 = 18; G5 = 16; G6 = 9; G7 : n=8; G8 : n=4; G9 : n=7). Cette partition en 9 groupes a été retenue car les effectifs restent cohérents d'un groupe à l'autre, dans un rapport de 1 à 4. Cette partition reste exploratoire, et doit nous aider à interpréter l'ensemble des courbes de tendance pour les 92 sites.

La branche numérotée 1 sur le dendrogramme (Figure 46) contient 3 groupes, notés G1, G2 et G3, G2 et G3 se situant à un niveau inférieur de séparation par rapport à G1.

La branche numérotée 2 sur le dendrogramme (**Error! Reference source not found.**) contient les 6 autres groupes. Un premier sous-groupe est composé par les groupes G4 et G5. Puis un second sous-groupe est composé de 4 groupe G6, G7, G8 et G9, avec 2 sous-groupes (G8 et G9, d'un côté, et G6 et G7 d'un autre côté).

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 46 : Analyse statistique de clustering par CAH des 92 courbes de tendances obtenues après la décomposition temporelle, avec un regroupement en 9 familles

L'analyse de ces 9 groupes porte sur la tendance de l'activité végétale entre 2000 et 2016, en termes de diminution (régression), augmentation (progression) ou maintien (stabilité).

Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe G1 de la CAH

Les valeurs des courbes de tendance des sites appartenant au groupe G1 de la CAH, varient globalement entre 0,42 et 0,56 (Figure 47). Les valeurs de ces pixels sont relativement proches en restant dans une gamme de valeurs de 0,1.

Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- 1. L'hétérogénéité des courbes est forte avec de brusques variations sur des courts pas de temps (1-2 ans), souvent sans corrélation entre les différents sites ;
- En début de période, comme en fin de période, les valeurs sont assez dispersées par rapport à la période 2006-2012 ;
- Certaines courbes présentent leurs valeurs minimales en début de période, alors que pour d'autres c'est en fin de période, idem pour les valeurs maximales ;
- Il n'existe pas de tendance marquée pour l'ensemble des courbes pour cette période, qui globalement restent plutôt stables.



Figure 47 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe G1 de la CAH

D'après les enquêtes réalisées sur le terrain, ces sites font partie des oasis anciennes, avec un type d'agriculture traditionnelle caractérisée par la présence des trois étages avec une forte production des palmiers, une bonne production pour les arbres fruitiers et une faible production pour la luzerne et les cultures maraichères. La densité de plantation des palmiers y est forte, à l'exception des oasis de Jhim 1 et Extension Jhim 2 qui se caractérisent par une densité moyenne des palmiers.

Ces sites sont en bon état et correctement entretenus.

L'irrigation se fait à partir des forrages étatiques par un tour d'eau chaque semaine voir toutes les deux semaines. La salinité de l'eau est dans les normes entre 1,5 et 1,7g/l.

Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe G2 de la CAH

Les valeurs des courbes de tendance de NDVI des sites du groupe 2 de la CAH montrent des valeurs élevées variant entre 0,56 et 0,67 (Figure 48). Les valeurs de ces pixels sont proches en restant dans une gamme de valeur de 0,03.

Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- L'hétérogénéité des courbes est forte avec de brusques variations sur des courts pas de temps (1-2 ans), souvent sans corrélation entre les différents sites ;
- 2. Les valeurs de NDVI sont peu dispersées d'une courbe à l'autre sur toute la période ;
- Globalement la tendance serait à une légère progression, jusqu'en 2010, puis à une légère régression ensuite.



Figure 48 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe G2 de la CAH

D'après les enquêtes réalisées sur le terrain, ces sites font partie des oasis très anciennes, de plus de 300 ans d'âge, et sont du type traditionnel avec les trois étages. La production y est forte pour les palmiers et les arbres fruitiers, et une forte production pour la luzerne et les cultures maraichères.

L'irrigation se fait à la fois à partir des puits étatiques et des puits privés, avec un tour d'eau chaque semaine voir deux semaines. Il existe des sites où l'on trouve des puits étatiques avec en plus des puits privés. La salinité de l'eau est dans les normes entre 1,5 et 1,7g/l.

Ces sites sont en très bon état et correctement entretenus.

Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe G3 de la CAH

Les courbes de tendance des sites sélectionnés qui se trouvent dans les oasis du groupe 3 montrent des valeurs encore élevées variant entre 0,48 et 0,62 (Figure 49). La gamme des valeurs de NDVI à tendance à augmenter depuis 0,07 en début de période jusqu'à 0,09 en fin de période.

Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- L'hétérogénéité des courbes est toujours forte avec de brusques variations sur des courts pas de temps (1-2 ans), parfois avec des corrélations entre les différents sites comme en 2004 par exemple ;
- 2. Globalement l'allure des courbes est à une légère progression, sauf pour le site Remada aval qui chute fortement en fin de période.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 49 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe G3 de la CAH

D'après les enquêtes réalisées sur le terrain, ces sites appartiennent à des oasis traditionnelles ou modernes, avec une forte densité de végétation, et avec des palmiers qui peuvent atteindre 12 m de hauteur ainsi que de jeunes palmiers plus petits non encore en production.

L'irrigation se fait à la fois à partir des puits étatiques et des puits privés, avec deux à trois tours d'eau chaque semaine. La salinité de l'eau est dans les normes entre 1,5 et 1,7g/l.

Ces sites sont en très bon état et correctement entretenus.

Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe G4 de la CAH

Les courbes de tendance de NDVI des pixels du groupe G4 montrent des valeurs moyennes plus basses que les 3 groupes précédents, variant entre 0,26 et 0,44 (Figure 50). Pour rappel les 3 premiers groupes appartiennent à la branche n°1 du dendrogramme, alors que ce groupe et les suivants appartiennent à la branche n°2. Les gammes de valeurs rencontrées sont aussi plus importantes allant de 0,12 en début de période à 0,09 en fin de période. Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- L'hétérogénéité des courbes est forte avec de brusques variations sur des courts pas de temps (1-2 ans), souvent avec des corrélations entre les différents sites, mais pas toujours ;
- Globalement l'allure des courbes de tendance est à une forte progression entre 2001 et 2004, et ensuite on observe soit de la stabilité, soit des légères progressions.



Figure 50 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe G4 de la CAH

D'après les enquêtes réalisées sur le terrain, ces sites font partie des oasis modernes ou traditionnelles en phase de développement avec des nouvelles implantations des palmiers (renovation). De plus, les arbres fruitiers de ces sites souffrent de problème des phytosanitaires.

L'irrigation se fait à la fois à partir des puits étatiques, avec un tour d'eau chaque semaine voir deux semaines, et à partir des puits privés en cas de besoin. La salinité de l'eau est dans les normes entre 1,5 et 1,7g/l.
Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe G5 de la CAH

Les courbes de tendance de NDVI des sites sélectionnés qui se trouvent dans les oasis du groupe 5 montrent des valeurs comprises entre 0,32 et 0,52 (Figure 51). La gamme de valeurs est importante en début comme en fin de période, avec respectivement 0,14 et 0,13.

Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- L'hétérogénéité des courbes est forte avec de brusques variations sur des courts pas de temps (1-2 ans), souvent avec des corrélations entre les différents sites, mais pas toujours;
- L'allure générale des courbes de ce groupe est très similaire à celles du G4. Ces 2 groupes appartiennent au même sous-groupe de la CAH ;
- 3. Les courbes présentent de fortes progression jusqu'en 2004, puis elles se stabilisent, sauf pour le site Essonni qui continue à progresser.



Figure 51 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe 5 de la CAH

D'après les enquêtes réalisées sur le terrain, ces sites appartiennent à des oasis modernes ou traditionnelles avec beaucoup des palmiers matures de petites dimensions qui peuvent atteindre 9 m de hauteur maximum ainsi que de jeunes palmiers plus petits non encore en production. Ces parcelles sont caractérisées par une densité moyenne de végétation et de palmiers âgées entre 30 et 65 ans. Certains sites souffrent de plusieurs problèmes comme la salinité.

L'irrigation se fait à partir des puits étatiques, avec un tour d'eau chaque 15 jours voir 20 jours. La salinité de l'eau est dans les normes entre 1,5 et 1,7g/l.

Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe 6 de la CAH

Les courbes de tendance de NDVI des sites sélectionnés du groupe 6 montrent des valeurs faibles variant entre 0,2 et 0,4 (Figure 52). Au cours de la période, la gamme des valeurs de NDVI passe de 0,12 à 0,11.

Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- L'hétérogénéité des courbes est forte avec de brusques variations sur des courts pas de temps (1-2 ans), avec peu de corrélations entre les différents sites, pouvant former des sous-groupes en opposition, mais pas toujours ;
- L'allure générale des courbes de tendance montre plutôt de très légères progressions mais avec de fortes fluctuations sur des pas de temps courts. Les sites de Jhim 2, CSPS, Oued El Kebir Aval, Tozeur Géothermie 1et2 montrent des progressions plus fortes.



Figure 52 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe 6 de la CAH

D'après les enquêtes réalisées sur le terrain, la majorité des sites sont des oasis traditionnelles ayant des palmiers âgés de 45 à 65 ans. Les palmiers sont de petite taille pouvant atteindre 6 à 9 m de hauteur.

L'irrigation se fait à partir des puits privés, un tour d'eau chaque 25 jours. La salinité de l'eau est dans les normes entre 1,5 et 1,7g/l.

Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe 7 de la CAH

Les courbes de tendance pour les sites du groupe 7 de la CAH montrent des valeurs de NDVI qui varient entre 0,22 et 0,44 (Figure 53), avec des gammes de valeurs qui augmentent depuis 0,07 en début de période jusqu'à 0,12 en fin de période.

Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- 1. Des corrélations positives entre tous les sites jusqu'en 2009 ;
- La progression est très rapide jusqu'en 2004, puis elle l'est moins jusqu'en 2010, et ensuite certains continue à progression légèrement, tandis que d'autres chutent brusquement ou sont très instables comme par exemple Mraah Lahouar 3.



Figure 53 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe 7 de la CAH

D'après les enquêtes réalisées sur le terrain, ces sites font partie des oasis modernes ou traditionnelles en phase de développement avec des nouvelles implantations des palmiers (rénovation).

L'irrigation se fait à la fois à partir des puits étatiques, avec un tour d'eau chaque semaine voir deux semaines, et à partir des puits privés en cas de besoin. La salinité de l'eau est dans les normes entre 1,5 et 1,7g/l.

Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe 8 de la CAH

Les courbes de tendance de NDVI des sites sélectionnés qui se trouvent dans les oasis du groupe 8 montrent les valeurs moyennes les plus faibles, variant entre 0,1 et 0,2 (Figure 54). La gamme des valeurs de ce groupe est fiable avec 0,07 en début de période et 0,06 en fin de période.

Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- L'hétérogénéité des courbes est forte avec de brusques variations sur des courts pas de temps (1-2 ans), souvent avec des corrélations entre les différents sites, mais pas toujours;
- 2. L'allure générale des courbes de tendance varie d'un site à l'autre (progression, régression et stabilité).



Figure 54 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe 8 de la CAH

Ces sites appartiennent à des nouvelles créations à très faible densité de palmier en phase de développement, et aussi à des périmètres illicites (El Ghaouatine). Il n'y a pas de variétés cultivées autres que les palmiers sur ces sites à cause de la pénurie d'eau. Mais il y a aussi des sites qui sont abandonnés ou encore contenant des serres comme El Hamma 1bis Géothermie.

L'irrigation se fait à partir de puits privés par un tour d'eau chaque 20 à 25 jours.

Les courbes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour le groupe 9 de la CAH

Les courbes de tendance de NDVI des sites sélectionnés du groupe 9 de la CAH montrent des valeurs faibles variant entre 0,12 et 0,32 (Figure 55). La gamme des valeurs de NDVI passe de 0,09 en début de période à 0,10 en fin de période.

Les principales remarques que l'on peut faire pour ce groupe sont :

- 1. L'hétérogénéité des courbes est forte avec de brusques variations sur des courts pas de temps (1-2 ans), parfois avec des corrélations entre les différents sites ;
- Certaines allures sont à la stabilité, alors que d'autres sont à la régression, surtout à partir de 2009 comme par exemple avec les sites El Hamma 1 Géothermie, Gherida SMVDA Sud et Nord.



Figure 4 : Les courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI pour le groupe 9 de la CAH

La majorité des sites appartient à des oasis modernes bien organisées à très faible densité de palmiers. Il n'y a pas de variétés cultivées autres que les palmiers sur ces sites à cause de la pénurie d'eau. Ces sites peuvent correspondre à des nouvelles créations, des périmètres illicites ou des serres.

L'irrigation se fait à partir des puits étatiques, un tour d'eau chaque 15 jours voir 25 jours.

Les courbes moyennes de tendance de MOD13Q1-NDVI pour les 9 groupes de la CAH

Afin d'avoir une vision générale des courbes de tendances des 9 groupes issus de la CAH, nous avons calculé les courbes moyennes de tendance pour chaque groupe (Figure 56).

Les 9 courbes moyennes ont globalement des allures similaires : elles sont relativement en légère progression comme pour les groupes G2, G3, G4, G5, G6 et G7, parfois stables sur l'ensemble de cette période comme pour les groupes G1 et G8 ; un seul présente une légère régression, le groupe G9. Ces courbes moyennes sont plutôt parallèles, depuis les plus faibles valeurs de NDVI, vers 0,2, jusqu'aux plus fortes valeurs, vers 0,6. Les 5 courbes moyennes avec les valeurs les plus fortes (groupes G1, G2, G3, G4 et G5) semblent très corrélées, et relativement bien distinctes si on tient compte des écarts types. On peut donc dire en généralisant que :

- Un certain nombre de périmètres présente des comportements identiques quant à leurs activités chlorophylliennes même si elles sont à des niveaux d'intensité différents, et que cela révèle des « pulsations » positives à certaines périodes comme celle du début de l'année 2004 qui est le plus remarquable ;
- Un petit nombre de périmètres présents des dynamiques plus fortes que les autres aussi bien de façon positive, avec une plus forte augmentation du NDVI, que de façon négative, avec une plus forte diminution du NDVI.



Figure 56 : Les courbes moyennes de tendance des séries MOD13Q1-NDVI pour les 9 groupes de la CAH

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période

La courbe moyenne avec les plus faibles valeurs de NDVI entre 0,1 et 0,2 (groupe G8), correspond aux sites avec le moins de végétation. Elle présente une légère pente négative de 2004 à 2013. Les 3 courbes avec les plus fortes valeurs moyennes (G1, G2 et G3), comprises entre 0,45 et 0,65, appartiennent à la branche numéro 1 du dendrogramme (**Error! Reference source not found.**), les autres groupes appartiennent tous à la branche numéro 2. Le sous-groupe formé par les groupes G4 et G5 présentent les plus fortes valeurs moyennes de la branche numéro 2, valeurs comprises entre 0,3 et 0,45. Le sous-groupe formé par les groupes G6 et G7, dont les valeurs sont comprises entre 0,25 et 0,40, est celui qui présente le moins de corrélation : si les courbes sont presque identiques en début de période, elles se séparent nettement à partir 2003, pour se rapprocher à partir de 2012 et finir à nouveau presque identiques à partir de 2015. Le groupe G9 présente des valeurs moyennes de NDVI très proches des groupes G6 et G7 en tout début de période, vers 0,25, mais à partir de 2003 les valeurs restent stable, voire chutent à partir de 2011, en redescendant à 0,2.

Ces courbes de tendance et les courbes moyennes de chaque groupe sont porteuses d'informations globales sur l'évolution de l'état de chaque site ou de chaque groupe, avec un historique qui remonte au début de l'année 2000 : elles ont beaucoup intéressé les services agricoles, et ont donné lieu à de riches discussions, avec des questions sur les causes des fortes fluctuations sur un court pas de temps qui sont restées sans réponses, du moins pour l'instant faute des données précises pour la période considérée. Cela montre la nécessité de mettre en place un véritable dispositif de suivi sur le terrain par les services compétents de façon à pouvoir interpréter au mieux ces courbes.

3.2.2. Une proposition de graphiques de référence pour un suivi pluriannuel

Les séries chronologiques de données de MOD13Q1-NDVI obtenus à partir du site MODIS Global Subsets, nous ont permis d'établir toute une base de données pour chaque oasis étudiée. Cette base de données permet de visualiser l'évolution du NDVI entre 2000 et 2016 pour les 84 sites retenus. Le site du *MODIS Global Subsets* propose automatiquement un certain nombre de graphiques qui rendent compte de la période considérée. Il nous a semblé intéressant de garder ces graphiques dans le cas de la mise en place d'un dispositif de suivi.

Dans ce cas, ces graphiques pourraient être considérés comme des graphiques de référence pour les chercheurs, les services agricoles, voire les agriculteurs eux-mêmes afin de connaître l'état actuel de leurs parcelles par rapport aux années précédentes. Les valeurs moyennes mensuelles de MOD13Q1-NDVI de chaque site sont présentées de différentes façons soit chronologiquement mois par mois (Figure 57, A), soit sous la forme de boîte à moustaches annuellement (Figure , B) ou mensuellement (Figure 57, C) pour la période 2000 et 2016.

Les graphiques sous forme de boîtes à moustaches sont des synthèses qui permettent de comparer facilement les années entre elles, ou bien les valeurs de NDVI en cours d'acquisition par rapport à une période de référence.

Ainsi dans l'exemple pris avec le site d'Abbes (Figure 57, B), on se rend compte de la variabilité des valeurs de NDVI d'une année sur l'autre : l'année la plus homogène est l'année 2000, et celle qui est la plus hétérogène est l'année 2003. La comparaison des valeurs médianes montre que certaines années sont très proches, par exemple 2001 et 2002, alors que d'autres années qui se suivent sont assez différentes, par exemple 2006 et 2007. En suivant les variations mensuelles toujours avec les boîtes à moustaches (Figure , C), on se rend compte que le mois de novembre est le mois le plus homogène, avec la plus petite dispersion des valeurs, alors que le mois de juin est sans doute le plus hétérogène avec la plus grande dispersion des valeurs de NDVI. Les données en cours d'acquisition pour une nouvelle année peuvent facilement être replacées dans ce dernier type de graphique, qui peut alors servir de système de suivi, voire d'alerte quand les valeurs en cours s'écartent trop des valeurs médianes.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



A : Moyennes mensuelles de NDVI

B : Boîtes à moustaches calculées par année

C : Boîtes à moustaches calculées par mois

Figure 57 : Graphiques de référence pour les observations en cours en prenant l'exemple de l'oasis traditionnelle d'Abbes sur la période 2000-2016 (Source : <u>MODIS Global Subsets</u>)

3.2.3. Discussion

La méthode testée de décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI à partir d'un échantillon de sites sélectionnées dans différents écosystèmes oasiens, de façon assez exhaustive sur toutes les oasis du Djérid, révèle des ruptures inattendues dans les courbes de tendance au cours de la période analysée (2000-2016). Ces ruptures sont à mettre en relation avec des phases de sécheresse, de baisse de l'irrigation, d'abandon brutal des parcelles, voire de feux. Ainsi par exemple, suite à la révolution tunisienne du début de l'année 2011, de nombreux tours d'eau n'ont pas pu être assurés pendant plusieurs mois (11 à 12 mois) dans la région (communications orales des exploitants enquêtés). Or on remarque d'une façon assez générale sur l'ensemble des courbes de tendance une brusque chute des valeurs de NDVI, quel que soit le groupe, à ce moment-là. De même, la série d'années sèches qu'a connue le sud tunisien de 2000 à 2002, pourrait expliquer les régressions générales observées sur les courbes de tendance en début de période, ainsi que la reprise de progressions après 2003.

Les travaux menés dans ce chapitre sur l'utilisation de la décomposition des séries temporelles MOD13Q1-NDVI confortent l'idée que cette technique présente un potentiel intéressant pour aller plus loin dans l'exploitation de la dimension temporelle des séries d'images satellitaires du type MODIS. Ils font apparaître, en particulier, trois axes de recherche future :

- L'interprétation des brusques changements des courbes de tendance en mettant au point un dispositif d'observation spécifique sur la phénologie des différents espèces ou variétés des plantes cultivées (palmiers, fruitiers, plantes maraichères-vivrières-fourragères), ainsi que sur les pratiques agricoles (calendrier cultural, nettoyage des parcelles/labour, irrigation...);

- Le besoin de faire évoluer la méthode d'extraction de la courbe de tendance pour pouvoir détecter des changements (progression-régression-stabilité) en l'automatisant au maximum pour une période donnée ;

- L'analyse et l'interprétation des courbes de variations saisonnières moyennes issues de la décomposition temporelle qui n'ont pas pu être menées jusqu'au bout dans ce travail.

La caractérisation des dynamiques de végétation des oasis du Djérid par télédétection avec des produits MOD13Q1-NDVI est difficile sur une longue période pour 3 raisons principales :

1) La forte hétérogénéité de structure (entre 1 et 3 étages) et de fonctionnement (pratiques agricoles, irrigation) des oasis à l'échelle de toute la région d'étude ;

2) La forte hétégénéité du signal recueilli avec ses brusques changements de dynamique sur des courts pas de temps, qui fait que chaque site étudié apparaît comme particulier ;

3) L'absence d'informations nécessaires pour l'interprétation de tous les sites étant donné la durée de la période d'étude (2000-2016).

Cependant, les séries temporelles MOD13Q1-NDVI présentent un certain nombre de caractéristiques qui laissent à penser qu'elles présentent un fort potentiel pour répondre aux objectifs fixés de mise en place d'un dispositif de suivi :

- ✓ La disponibilité des séries temporelles assez anciennes et longues pour mettre en évidence des différences de dynamiques de la végétation au sein des oasis en termes de progression / régression / stabilité ;
- ✓ L'existence d'une information sur la qualité des images ayant servi à fabriquer les synthèses MOD13Q1-NDVI pour faciliter l'identification de données aberrantes dans la série temporelle, même si elle n'a pas été utilisée pour notre étude ;
- ✓ La résolution spatiale de 250 m qui est la meilleure dans la gamme de ce type de capteurs avec un recul historique aussi important (depuis février 2000) ;
- ✓ La résolution temporelle d'un produit tous les 16 jours adaptée pour caractériser les variations interannuelles et saisonnière de l'activité végétale des oasis.

Le traitement des séries temporelles MOD13Q1-NDVI nécessitent des données de références de terrain pour caractériser l'état de la végétation et les différentes dynamiques de végétation. Une base de données de références de terrain a pu être commencée et renseignée sur la période 2016–2018. Mais elle reste encore largement insuffisante, car aucun suivi saisonnier de la phénologie des cultures n'a pu être mise en place. Cela devrait se faire en collaborant avec les services agricoles locaux, voire les agriculteurs eux-mêmes, si on veut pouvoir interpréter de façons plus poussées les séries temporelles recueillies.

Un problème persiste pour établir le lien entre des observations faites à l'échelle des séries MOD13Q1-NDVI et à celle des zones enquêtées sur le terrain. Comment faire des observations de terrain qui correspondent à des pixels de 250m ? En effet, dans ce travail, les résultats des traitements des séries MOD13Q1-NDVI sont évalués par des observations de terrain qui restent très ponctuelles dans l'espace comme dans le temps.

En résumé, le point fort qui ressort de ce travail d'exploitation de séries temporelles MOD13Q1-NDVI est le suivant :

La capacité de la méthode utilisée, celle de la décomposition de séries temporelles, à révéler les dynamiques de végétation des oasis, qui n'étaient pas jusqu'à présent connues, aussi bien sur des courts pas de temps que sur des périodes plus longues.

4. Le suivi pluriannuel de la végétation par des cartes de synthèse

Comme la partie précédente (Chapitre 3, section 3 ci-dessus), cette section porte sur l'évaluation de séries temporelles à moyenne résolution spatiale d'images optiques, pour caractériser l'état des oasis du Djérid. Alors que nous avons montré que des séries temporelles d'images à haute résolution spatiale permettent de caractériser les principaux types d'oasis sur une courte période temporelle (Chapitre 2), nous avons montré précédemment que les séries temporelles d'images à moyenne résolution spatiale permettent de décrire les variations interannuelles de la végétation à l'échelle du pixel MODIS en analysant les courbes de tendances obtenues par décomposition d'une série temporelle.

Dans cette section, l'idée n'est plus de suivre individuellement quelques pixels MODIS, mais de réaliser des cartes de synthèse à partir du calcul de variables statistiques descriptives simples obtenues à partir des séries temporelles d'images satellites. Les cartes ainsi réalisées doivent permettre de caractériser des dynamiques des oasis, afin d'élaborer une typologie de ces dynamiques régionales pour la période considérée.

L'utilisation d'indicateurs phénologiques issus d'imagerie satellitaire pour caractériser la végétation constitue une approche déjà bien répandue depuis les années 90 (Reed et al., 1994; White et al., 1997). Ces indicateurs phénologiques renseignent quant aux dates de début de période de croissance, de maximum, de sénescence et de minimum végétal. Ainsi, avec la possibilité de détecter de façon homogène, objective dans le temps et à l'échelle globale la phénologie de la végétation, les séries d'images satellite à moyenne résolution permettent aujourd'hui d'étudier la phénologie en relation avec la variabilité climatique et l'action de l'homme (Zhang et al., 2009). D'une année à l'autre, la dynamique de la végétation peut être différente : en fonction des conditions météorologiques et des tours d'irrigation qui diffèrent, elle s'écarte de la moyenne climatique, ce qui se traduit par des anomalies positives ou négatives. Une première motivation pour s'intéresser à ces variations est que l'étude de la végétation aux échelles interannuelles constitue un moyen d'investigation de l'impact du climat. Cependant, ces données climatiques sont soit estimées à partir de données satellitaires, mais avec une résolution spatiale très faible et une précision qui ne répond pas toujours aux exigences des modèles de cultures et qui n'est pas efficace par rapport à la superficie de notre zone d'étude, soit interpolées à partir des stations synoptiques (peu nombreuses dans la plupart des régions arides et dont les données sont difficilement accessibles). Ainsi, une démarche d'évaluation des résultats est proposée. Elle se base sur la caractérisation des dynamiques de végétation observées à partir des traitements de la série temporelle des images MOD13Q1-NDVI à l'échelle des oasis du Djérid pour la période 2000-2016, puis dans un deuxième temps nous avons validé les résultats de l'activité chlorophyllienne obtenus avec des données de terrain et des données climatiques (pluviométries) qui nous ont été fournies par les services agricoles de la région de Nefta-Tozeur.

Le développement informatique des méthodes d'analyse présente des potentiels pour une meilleure exploitation de ces données. Différentes approches existent et s'appliquent en fonction des objectifs d'études. Pour des analyses à petite échelle et à caractère exploratoire, l'approche non supervisée est couramment utilisée et fournit des résultats satisfaisants même s'ils sont généraux. Dans cette famille se trouvent les algorithmes des k-moyennes (*k-means*) et *mean shift*.

4.1. La méthodologie : cartographie de synthèse pluriannuelle des NDVI des oasis

4.1.1. La cartographie comparative classique de la végétation des oasis

Bien souvent, le suivi de la dynamique temporelle d'un processus, quel qu'il soit, se fait en comparant deux dates. Comme exemple, nous présentons ici les résultats cartographiques des années 2000 et 2016 obtenues à partir du calcul de la moyenne annuelle du MOD13Q1-NDVI pour comparer la végétation des oasis entre ces 2 dates.

La simple analyse par photo-interprétation des cartes de ces deux années, 2000 et 2016, a permis d'identifier les pixels pour lesquels on observe un changement significatif de l'activité végétale à travers leurs changements de couleurs.

A partir de ce type de cartes, une démarche consistant à établir des classes de changements pourrait être mise en place. Ces classes de changement traduisent alors les dynamiques de végétation dans les oasis entre 2000 et 2016.





Figure 58 : Suivi de la dynamique de la végétation en comparant les valeurs moyennes annuelles de MOD13Q1-NDVI en 2000 et en 2016, à partir de quelques exemples

Selon les cas, on peut observer localement une diminution, une augmentation ou un maintien de l'activité végétale des oasis entre 2000 et 2016. Par exemple, on constate une progression de l'activité chlorophyllienne au niveau des oasis de Nefta, Ibn chabbat et Chamsa (Figure A et B), ainsi que pour les oasis qui se trouvent entre Nefta et Tozeur (Figure 1 C). Par contre, dans la région d'El Hamma (Figure 58 F), on observe une régression de l'activité chlorophyllienne, et au niveau de la région de Tozeur (Figure D) un maintien de l'activité chlorophyllienne. Mais ces analyses purement visuelles restent très subjectives, même à l'échelle d'une seule oasis.

4.1.2. La cartographie de synthèse testée pour une série temporelle d'images

4.1.2.1. La mise en forme des données MODIS

Pour réaliser les cartes de synthèses, les images MOD13Q1-NDVI subissent deux pré traitements : 1) le lissage des valeurs ; et 2) l'extraction de la zone d'étude.

Lissage des valeurs de NDVI

Une série temporelle de NDVI contient toujours des erreurs se traduisant généralement par une baisse de NDVI. Pour les corriger, il convient d'utiliser des méthodes de lissage. D'après plusieurs auteurs, le choix de la méthode de lissage d'une série temporelle d'images satellitaires ne semble pas crucial (Diello *et al.*, 2009 ; Leroux. 2015). Cependant, en fonction du niveau de bruit caractérisant la série originale et du type d'analyse réalisé, plusieurs méthodes de lissage sont intéressantes pour vérifier l'amélioration de la qualité des données : elles permettent de corriger la majeure partie des données aberrantes observées. Selon les techniques employées, celles qui suivent au plus près la série originale sont du type méthode BISE - Best Slope Index Extraction - (Viovy *et al.*, 1992), ou celles qui ont tendance à moyenner ou être très influencées par des valeurs hautes ou basses, sont du type méthode de Savitsky-Golay (Chen *et al.*, 2004). Ainsi certains pics isolés peuvent correspondre à des valeurs aberrantes, mais ils peuvent aussi représenter de vrais pics, ils seront alors éliminés, ou pas, de la série temporelle.

Dans ce travail, nous avons utilisé la méthode du filtrage/lissage (*smoothing*) par l'algorithme Savitzky-Golay (Figure 59), considérée comme performante pour ce type d'application (Chen *et al.*, 2004), qui nous permet l'amélioration des corrections radiométriques et l'homogénéisation des 343 images MOD13Q1-NDVI, couvrant la période 2000-2016.

Le filtrage/*smoothing* est une opération qui consiste à atténuer les effets de la nébulosité atmosphérique et les effets bidirectionnels du capteur sur les valeurs de pixel (Boschetti *et al.*, 2009). Il favorise ainsi l'harmonisation des données de la série temporelle. Pour rappel, ces images MOD13Q1-NDVI sont les résultats de synthèse des valeurs de réflectance des cibles dont les plus élevées sont maintenues sur les observations de 16 jours (couverture temporelle de la production d'une image MOD13Q1). Malgré tout, ce traitement supplémentaire est recommandé (Feng *et al.*, 2008 ; Boschetti *et al.*, 2009) pour améliorer la qualité des données. L'algorithme utilisé sous *R project* est celui de Savitzky-Golay : il est exécutable avec la fonction "*sgolayfilter*" de la bibliothèque "*Signal*". Cet algorithme est récemment implémenté sous le logiciel QGIS à travers l'extension VERSAO VEGAMONITOR (Vers une Estimation Spatialisée des Rendements par la télédétection pour la Sécurité Alimentaire en Afrique de

l'Ouest). En pratique, la fonction corrige les valeurs considérées aberrantes (appelées bruit) en les optimisant le mieux possible sans autant déformer les valeurs initiales. Elle a été appliquée sur notre base de données constituée par les 343 images.



Figure 59 : Filtrage des données MOD13Q1-NDVI par l'algorithme Savizky-Golay réalisé sous R-project

Sur le graphique de comparaison entre les courbes MOD13Q1-NDVI brute et filtrée (Figure 59), les valeurs extrêmement basses ou hautes (en rouge), considérées comme anormales, ont été ajustées (en vert) par le filtrage de Savizky-Golay.

Les 343 images d'entrée de la série temporelle (2000-2016) sont ainsi homogénéisées et préparées pour la production de nos indicateurs de dynamiques.

L'extraction de la zone d'étude

Après cette correction préliminaire de nos produits satellitaires, nous avons extrait notre zone d'étude (Figure 60).

La tuile MOD13Q1-NDVI d'entrée est de format HDF et le système de référence géographique est sinusoïdale avec une résolution de 250 m. L'image de sortie est de format GeoTIFF avec le système référentiel géodésique projeté WGS84 UTM zone 32 Nord.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période

Le traitement appliqué sur les données MOD13Q1-NDVI a consisté à reprojeter et à extraire la zone d'étude pour chaque date d'observation. En sortie, on obtient une base de 343 images pour la série temporelle 2000-2016, sachant que l'année d'observations qui compte 23 images est l'année agricole, qui va du 1^{er} septembre au 31 août. Cette étape a été réalisée à l'aide du logiciel *R project* en utilisant la couche vectorielle des limites des périmètres publics irrigués fournie par le CRDA de Tozeur.



1 tuile MODIS Figure 60: Exemple de résultat obtenu par extraction de la zone d'étude à partir d'une tuile MOD13Q1-NDVI

4.1.2.2. Le calcul des moyennes annuelles et de la moyenne pluriannuelle sur la période 2000-2016

Le traitement à proprement parler repose sur deux étapes. Il s'agit de réaliser, en premier lieu, le calcul des deux indicateurs phénologiques dérivés des produits MOD13Q1-NDVI, et en second lieu la cartographie de la répartition spatiale du couvert végétal en utilisant la classification K-means et CAH.

La première étape nous permet de calculer les deux types d'indicateurs qui sont indispensables pour la suite de l'analyse. Il s'agit du calcul des moyennes annuelles de MOD13Q1-NDVI par année agricole et de la moyenne de ces moyennes annuelles, appelé cumul pluriannuel (Figure 61).



Figure 61 : Processus de calcul des indicateurs phénologiques dérivés des MOD13Q1-NDVI

Ces indicateurs vont aider à comprendre les variabilités interannuelles de l'activité chlorophyllienne du couvert végétal des oasis pour la période 2000-2016.

La moyenne annuelle du NDVI est la moyenne de l'activité chlorophyllienne de la biomasse végétale produite sur une unité d'observation, ce qui correspond à une étendue de 6,25 ha pour un pixel NDVI MODIS de 250m, pour toutes les saisons de l'année. La moyenne annuelle du NDVI est utilisée pour la classification des pixels en fonction de leurs dynamiques interannuelles au cours de la période d'étude. Ce calcul a été réalisé sous *R project* avec la fonction "*calc*" de la librairie "*Stats*".

Nous avons obtenu 15 images de moyennes annuelles de NDVI. Chaque pixel d'une image correspond à la moyenne annuelle de l'activité chlorophyllienne de la végétation.

Le cumul pluriannuel est la moyenne des moyennes annuelles de NDVI. Cet indicateur ne cumule seulement que les pixels à NDVI positif (Leroux. 2015). Cela évite des valeurs aberrantes qui peuvent engendrer les pixels de NDVI négatif qui représentent des surfaces autres que la végétation. Le cumul annuel intégré du NDVI va servir aux analyses statistiques qui sont faites par la suite de notre analyse dont les " anomalies ".

Sous *R project*, cet indicateur est calculé par la même fonction que la moyenne annuelle (*calc*). Dans l'image finale obtenue, chaque pixel contient la valeur moyenne des moyennes des quantités de biomasse végétale mesurées par le NDVI au cours de la période 2000-2016.

4.1.2.3. La carte de synthèse obtenue par classification non supervisée K-means de la série des moyennes annuelles de NDVI

Des algorithmes de classification automatique non supervisée, orientée pixel, ont été utilisés pour cette cartographie. En effet, il s'agit de regrouper en différentes classes des paysages végétaux dont les dynamiques au cours des 15 années agricoles 2000-2016 ont été similaires. Une telle approche nous permet d'avoir une vue d'ensemble de la répartition spatiale de ces dynamiques pour les oasis de Djérid, avec la résolution des images à 250 m.

Nous avons utilisé sous *R project*, deux algorithmes de classification basés sur l'approche de distance euclidienne (écarts ou longueurs entre individus calculés d'après leurs coordonnées sur les axes du repère orthonormé) dans le souci de constituer les classes d'individus les plus homogènes possibles. Nous cherchons alors à distinguer au mieux les différents paysages végétaux.

La méthode s'applique en deux étapes sur les données d'entrées constituées par les 15 images de MOD13Q-NDVI moyen annuel, contenant chacune 1200 pixels. La première est exploratoire et permet la faisabilité de la seconde. Ainsi les classes résultant de la première étape qui est celle d'une classification non supervisée par la méthode des *k-means*, avec l'algorithme de Hartigan-Wong, seront regroupées par l'algorithme de Ward avec une classification ascendante hiérarchique (CAH). La démarche nous permet d'exploiter l'optimisation de temps de traitement de l'une (*k-means*) et la simplicité de l'utilisation de l'autre (CAH) pour regrouper les classes similaires.

La classification par K-means

L'algorithme *k-means* est l'un des algorithmes les plus connus en classification non supervisée, appelé aussi algorithme des centres mobiles. Il partitionne un ensemble de données en un nombre prédéfini de régions ou groupes K.

Chaque groupe est représenté par sa moyenne (centre de la classe) dont les coordonnées sont la moyenne arithmétique pour chaque dimension séparément de tous les points dans le groupe.

Les centres des groupes sont mobiles au cours de l'exécution de l'algorithme.

L'algorithme peut se présenter comme suit :

- Le nombre de clusters, c'est-à-dire le paramètre K, est fourni au départ ;
- Un ensemble de K centres est choisi aléatoirement dans l'ensemble des données ;
- Les K clusters sont formés en regroupant l'ensemble des données autour du centre dont elles sont le plus proche ;
- Le centre de chaque groupe est alors recalculé et devient le nouveau centre ;
- L'algorithme boucle alors sur l'étape précédente, les données sont réaffectées en fonction de ces nouveaux centres et la condition d'arrêt de cette boucle est que les centres des groupes deviennent immobiles ou presque.

L'algorithme de Hartigan-Wong part d'une observation individuelle des valeurs moyennes annuelles de NDVI des 1200 pixels qui couvrent les oasis du Djérid au cours des 15 années pour les regrouper en fonction de leur profil de variabilités interannuelles, traduites en

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période

distance euclidienne. La Figure 62 montre les profils des variabilités interannuelles du NDVI de 3 pixels pour la période 2000-2013. Ces profils sont formés à partir des moyennes annuelles des MOD13Q1-NDVI d'un pixel au cours des 15 années agricoles (2000-2015).





Profil des moyennes annuelles de NDVI du pixel 51



Profil des moyennes annuelles de NDVI du pixel 816



Figure 62 : Exemples de profils des variabilités interannuelles des moyennes annuelles de MOD13Q1-NDVI pour quelques pixels et sur la période 2000-2013

Sous *R project*, nous avons utilisées les librairies " *cluster* ", " *fpc* " et " *raster* " pour l'application de la fonction *k-means* avec l'algorithme de Hartigan-Wong.

D'autres algorithmes différents de "Hartigan-Wong", comme celui de "Lloyd" ou de "MacQueen" peuvent être utilisés. Mais le plus couramment employé est celui de "Hartigan-Wong" pour ses meilleurs résultats.

Nous avons ainsi constitué 12 groupes de pixels (Figure 63). Ce nombre choisi par l'utilisateur, est lié à l'objectif assigné à cette étape de la classification. En effet, elle doit nous permettre une large exploration des classes de comportement que l'on pourrait observer d'une part et servir une diversité de comportements d'individus à analyser par la classification ascendante hiérarchique. Ainsi une classe *k-means* devient un individu caractérisé par les valeurs moyennes de son groupe, à l'étape de la CAH.



Figure 63 : Répartition des 1200 pixels entre les 12 groupes obtenues par la méthode de classification des K-means

Le graphique de la Figure 63 donne le nombre d'individus des 12 groupes. La classe 1 est celle ayant le plus grand nombre de pixels, plus de 120 individus.

La fonction " *cluster.stats* " fournit un rapport statistique de la classification qui permet une évaluation de sa qualité. Cette évaluation permet une validation interne de la classification.

La Figure 64 suivante présente les profils moyens annuels des MOD13Q1-NDVI des 12 groupes. Ce graphique porte en ordonnées les valeurs moyennes pluriannuelles calculées à partir des moyennes annuelles de MOD13Q1-NDVI des pixels constituant une classe. Ces valeurs varient entre 0,1 (zone à végétation faible, voire sans végétation) et 0,6 (zones à végétation dense). Les allures de ces 12 courbes rappellent celles des 9 groupes obtenus à

partir des courbes tendances issues de la décomposition temporelle pour les 92 sites sélectionnés (Figure 56).



Figure 64 : Profils moyens des 12 classes des moyennes annuelles des MOD13Q1-NDVI obtenus à partir de la classification par K-means pour la période 2000-2015

Les profils des 12 groupes présentent des courbes avec évolutions similaires, plutôt parallèles, réparties régulièrement depuis les valeurs de NDVI les plus faibles jusqu'au plus fortes. Les tendances globales des évolutions sont entre la stabilité et une légère progression. On note en tout début de période des régressions plus ou moins marquées entre 2001 et 2002, suivies systématiquement d'une progression plus ou moins forte. Tout au long de la période, on observe peu de croisement de courbes. A partir de ces profils, on constate que certains groupes se ressemblent beaucoup, avec des silhouettes (formes) et des valeurs de NDVI moyens très proches. C'est le cas des groupes 1, 3 et 11, avec les plus fortes valeurs ; des groupes 2 et 10, avec des valeurs intermédiaires hautes ; des groupes 9, 12, 8, 7 et 6, avec des valeurs intermédiaires basses ; et des groupes 5 et 4, avec des valeurs faibles.

La Figure 65 montre la carte de la répartition des 12 groupes obtenus à partir des moyennes annuelles des MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2015, en tenant compte de la position relative des groupes en termes de valeurs moyennes de NDVI.



Note : les groupes sont rangés depuis les plus fortes valeurs moyennes de MOD13Q1-NDVI en vert, jusqu'aux plus faibles en rouge

Figure 65 : Carte de la répartition des 12 groupes de pixels MODIS obtenus par K-means à partir des moyennes annuelles MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2015

A l'issue de cette observation exploratoire des classes, un nouveau partitionnement a été exécuté qui regroupe les 12 groupes d'entrée dans 7 clusters (voir ci-dessous).

La validation interne de la classification K-means

L'évaluation de la qualité d'une classification par l'approche automatique non supervisée peut être faite à partir d'indicateurs statistiques résultant de l'algorithme employé. On emploie ainsi l'expression de validation interne. *K-means* visant un partitionnement par le maximum de ressemblance possible entre individus d'un même cluster, qui veille à minimiser la somme

des carrés des écarts des individus au point central de la classe. Ainsi les indicateurs suivants sont pertinents à observer :

- withinss, la somme des carrés des distances entre chaque individu et le centre d'un cluster ;
- tot.withinss, le total des sommes des carrés des distances à la moyenne à l'intérieur des clusters, c'est-à-dire la somme des withinss ;
- betweenss, la somme des carrés des distances entre les individus des classes ;
- totss, le total des sommes des carrés des distances toutes confondues, c'est à dire intra et inter-classes.

Plus le **tot.withinss** est largement inférieur comparativement à la **betwennss**, plus la classification *k-means* aurait atteint son objectif dont la construction des classes intrahomogènes et inter-hétérogènes. Nous avons obtenu à la suite du partitionnement des pixels par l'algorithme de Hartigan-Wong un *tot.withinss* de 12 contre un *betweenss* de 241 pour un *totss* de 254 ce qui est bon, et aussi un ratio inertie inter/inertie totale de 0,94 (94%), ce qui peut être considéré comme très bon.

La classification ascendante hiérarchique (CAH) appliquées aux 12 groupes de la classification non supervisée

Cette seconde étape de notre classification permet de réduire le nombre des classes obtenu à l'étape précédente de classification par *K-means*. L'algorithme appliqué part de l'observation du profil de variabilités interannuelles de chaque classe pour ensuite les agréger dans de nouveaux clusters par des critères de ressemblances. Il s'agit donc d'une reclassification des 12 premières classes obtenues à l'étape précédente.

Sous *R project*, la fonction " rect.hclust " ou " cutree " permet de découper le dendrogramme en un nombre de classes défini par l'utilisateur. Nous avons choisi de former 7 clusters pour une observation détaillée des 12 groupes. Le dendrogramme a été découpé à une hauteur nous permettant de repartir les 12 classes *k-means* entre 7 clusters (Figure 66). L'idée ici est de réduire au mieux le nombre des groupes pour les tendances pluriannuelles, tout en gardant le maximum d'information. Cette approche reste exploratoire dans le but de créer une base de données sur les tendances pluriannuelles de la végétation des oasis pour pouvoir faire des comparaisons entre différentes régions oasiennes, d'abord en Tunisie, mais également en Afrique du Nord, voire en Afrique sub-saharienne et pourquoi pas à une échelle mondiale.



Arbre de classification

Figure 66 : Regroupement des 12 classes obtenues par K-means en 7 classes par CAH représentée ici par le dendrogramme

Les 1200 pixels de départ sont désormais repartis entre 7 classes au lieu de 12. La Figure 67 suivante présente les profils moyens de ces 7 nouvelles classes.

Le NDVI dans son ensemble donne une bonne idée de l'état des zones de végétation en fonction de leur activité chlorophyllienne. Chaque courbe s'interprète au cas par cas. Dès que la tendance est à la régression, cela peut déclencher une alerte, car on aura tendance à l'interpréter comme une dégradation de la végétation. Par contre, si elle est à la progression, on aura tendance à l'interpréter comme une amélioration. Si la courbe est stable, deux interprétations sont possibles : soit le système a atteint sa maturité et tout va bien, soit en principe la courbe devrait croître mais elle stagne ce qui peut à nouveau déclencher une alerte.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 67 : Profils moyens des 7 classes des MOD13Q1-NDVI obtenues à partir de la CAH pour la période 2000-2015

Le choix de 7 classes se justifie par notre objectif de cartographier la répartition spatiale à partir du même nombre de classes que celui retenu dans la partie SPOT5 (Take5) du chapitre 2. La réparation du couvert végétal à travers ses dynamiques des 15 dernières années fait l'objet d'une représentation cartographique dans la partie Résultats présenté ci-dessous. En plus les statistiques vérifient ce choix par des valeurs d'indices de validation (détails dans le paragraphe validation interne de la classification) témoignant la compacité de ces 7 classes.

4.1.2.4. La cartographie des anomalies annuelles de NDVI pour la période 2000-2016

Cette méthode permet de déterminer sur la période d'étude les années " d'irrégularités " de la production végétale et de les comparer à celles de la pluviométrie.

Une anomalie, encore appelée irrégularité, est un écart par rapport à une norme ou valeur de référence. La moyenne de l'ensemble de la série temporelle observée étant considérée comme cette norme, tout écart à cette valeur est considéré comme anormale. On parle d'anomalie positive quand elle est supérieure à 0 et d'anomalie négative dans le cas où elle est inférieure à 0.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période

La méthode des anomalies dans le cadre de notre analyse s'appuie donc sur l'indicateur d'écart à la moyenne qui est la différence entre la moyenne de la variable observée sur une courte période dans la série et la moyenne de l'ensemble de la série temporelle utilisée. Pour les données de la végétation, il s'agit de la différence entre la valeur moyenne de l'année et celle de la moyenne de toutes les années.

De l'exécution du programme sous *R-project*, on obtient pour chaque année un raster en sortie dont les valeurs de pixels sont soit positives, soit négatives. Elles correspondent à l'écart entre la valeur moyenne de l'année étudiée et la moyenne de la série prise comme référence.

Pour une observation à la fois spatiale et temporelle des anomalies sur une même variable, la fonction "*spplot* "des librairies "*raster*" et "*sp*" sous *R project* a été utilisée et le résultat est une cartographie des anomalies avec une série d'images correspondant à la série temporelle d'entrée. L'exemple donné ici (Figure 68) est celui des anomalies de l'année agricole de septembre 2000 à août 2001, par rapport à la période 2000-2015. Pour cette année 2000-2001, on observe qu'une majorité de périmètres présentent des anomalies négatives fortes de NDVI : ce sont majoritairement des périmètres modernes. Les oasis traditionnelles, comme Tozeur, El Ouedienne, El Hamma et en partie Nefta présentent des anomalies négatives moins fortes, voir des anomalies positives.



Figure 68 : Exemple de carte d'anomalies obtenue à partir du MOD13Q1-NDVI pour l'année agricole 2000-2001 par rapport à la période 2000-2015

4.2. Résultats et discussion

4.2.1. Les tendances du couvert végétal à partir des séries de moyennes annuelles

La carte présentée sur la Figure 69 représente la répartition spatiale des 7 classes, obtenues par la CAH, de comportement pluriannuel du couvert végétal dans les oasis du Djérid sur la période 2000-2015. La répartition spatiale sur le site d'étude de ces classes de NDVI fait apparaître de fortes hétérogénéités spatiales, principalement inter-oasis, mais également intra-oasis. Pour rappel, les valeurs de NDVI pour les 7 classes varient en moyenne entre 0,2 et 0,6, en présentant une relative stabilité entre 2000 et 2015.

Les classes 1 et 2 qui enregistrent des moyennes annuelles de NDVI les plus fortes entre 2000 et 2015, respectivement vers 0,6 et vers 0.5, correspondent principalement au cœur des oasis traditionnelles d'El Ouedienne, Tozeur et Nefta, avec une forte densité de palmiers et d'arbres fruitiers, et donc le plus fort couvert végétal.

Les classes 5, 6 et 7 enregistrent des moyennes annuelles de NDVI qui varient entre 0,3 et 0,45 : elles correspondent aux grandes structures modernes de la région de Chamsa et d'Ibn Chabbat ainsi que de la région située entre Nefta et Tozeur, ces oasis récentes ont des densités moyennes de plantation, avec presqu'exclusivement la variété Deglet Nour.

Les classes 3 et 4 présentent les moyennes annuelles de NDVI les plus faibles, respectivement vers 0,2 et 0,35, ce qui correspond à une faible à très faible activité chlorophyllienne, et donc un faible à très faible couvert végétal. La majorité des pixels de ces 2 classes sont soit des périmètres illicites/privé avec des plantations très récentes et de difficultés d'approvisionnement en eau (uniquement des puits privés de surface), soit des serres. Mais on note une tendance générale marquée des courbes de NDVI moyen à la progression après 2002 (Figure 67).



Note : les groupes sont rangés depuis les plus fortes valeurs moyennes de MOD13Q1-NDVI en vert, jusqu'aux plus faibles en rouge

Figure 69 : Répartition spatiale des 7 classes obtenues par CAH pour la période 2000-2015

On note que les pixels isolés sont en général ceux des classes 7, 4 ou 3 qui ont les plus faibles NDVI. Il y a aussi des effets de bord des périmètres irrigués qui s'expliquent de deux façons :

- Soit ce sont des extensions « illicites », où les agriculteurs profitent des canaux d'irrigation qu'ils détournent pour irriguer leurs parcelles. Cela se fait en général sur les parties avales : ces extensions sont souvent récentes et souffrent soit de salinité, soit d'hydromorphie, soit des deux à la fois, et en conséquence la végétation a du mal à se développer.
- Soit ce sont des pixels qui sont à cheval sur la bordure du périmètre irrigué, les valeurs de leur NDVI sont alors des artefacts. Il suffit pour le vérifier de superposer la couche vecteur des limites des oasis à celles des pixels MODIS.

La carte de la répartition de ces 7 classes (Figure 69) est intéressante dans le sens où elle permet de distinguer la répartition de l'activité chlorophyllienne et de distinguer les différentes tendances des oasis sur la période 2000-2015. Elle ressemble beaucoup à la carte

de la Figure qui présentait les 12 classes, ce qui est normal. Ici les oasis sont plus homogènes, puisqu'il y a moins de classes.

4.2.2. Les dynamiques du couvert végétal à partir des anomalies annuelles

La Figure 70 montre les anomalies annuelles de la végétation à partir de 15 de cartes couvrant la période 2000-2015. Cette cartographie donne une vision d'ensemble des anomalies sur les 15 années observées. Ces anomalies sont calculées à partir de l'écart à la valeur moyenne de la série temporelle : quand les valeurs inférieures à 0, l'année est considérée en moyenne comme anormale avec une faible activité de la végétation par rapport à la moyenne de référence ; elle est dite positive dans le cas contraire, avec une plus forte activité de la végétation par rapport à la moyenne de référence.

On constate que les anomalies sont faibles dans toute la région du Djérid, puisque les écarts vont de -0,1 à +0,1. Un premier constat peut être fait à cette échelle régionale en deux points :

- Globalement, les oasis de la région du Djérid ont enregistré une succession d'anomalies négatives de l'activité végétale à partir de l'année 2000-2001 et pour les 4 années suivantes jusqu'en 2004-2005, l'année 2003-2004 étant meilleure que cette dernière année.
- 2. Après 2 années qui peuvent être qualifiées de transition (2005-2006 et 2006-2007), l'ensemble de la région présente globalement des anomalies positives jusqu'en 2014-20015, avec localement de plus en plus d'anomalies fortement positives. Pendant cette seconde période, les oasis traditionnelles, Nefta, Tozeur, El Hamma et El Ouedienne, restent assez hétérogènes avec à la fois des anomalies positives et négatives.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 70 : Cartes des anomalies temporelles de NDVI montrant différentes dynamiques globales et locales sur la période 2000-2015





Figure 70 : Cartes des anomalies temporelles de NDVI montrant différentes dynamiques globales et locales sur la période 2000-2015 (suite et fin)

Le deuxième constat qui peut être fait toujours à l'échelle régionale est le suivant, en deux points :

- 1. Quelle que soit l'année, on observe toujours localement des pixels, isolés ou en petits groupes, qui sont à l'inverse des tendances régionales.
- 2. Parfois ces inversions locales perdurent sur plusieurs années, parfois non elles ponctuelles dans le temps.

Le troisième constat est en deux points :

- Le cœur des oasis traditionnelles, Nefta, Tozeur, El Ouedienne et El Hamma varie peu dans le temps, et présente très souvent des anomalies faibles, qu'elles soient positives ou négatives.
- Inversement, ce sont les oasis les plus récentes qui varient le plus au cours du temps en passant d'anomalies très négatives à des anomalies très positives.

Au cours de la période 2000-2015, les oasis traditionnelles apparaissent donc plus stables, avec moins de valeurs extrêmes, que les oasis modernes, qui passent d'anomalies très négatives à des anomalies positives. Cette dynamique des oasis modernes est typique d'un développement de nouvelles parcelles d'oasis : les palmiers croissent d'année en année avec une augmentation de la phytomasse des couronnes de palmes, jusqu' à atteindre un certain équilibre en fonction de la densité de plantation.

Mais il faut sans doute tenir compte également des tendances climatiques pour cette même période : la dynamique de la végétation constitue un bon intégrateur du climat, et les tendances des anomalies observées globalement pour la région du Djérid pourraient être le reflet de tendances climatiques. Chaque périmètre irrigué a sa propre source d'alimentation en eau par un forage profond dont le débit et la distribution varient peu dans le temps, même si bien sûr localement le débit finit toujours par baisser au bout d'une période plus ou moins longue : c'est l'usure normale d'un forage, il faut alors en refaire un autre à proximité. Régionalement, du fait de cette irrigation l'activité de la végétation devrait donc peu varier. Dans les régions arides, le cycle de la végétation étant lié en premier lieu à celui des précipitations, nous présentons (Figure 71) les pluies moyennes annuelles sur la période de 16 ans sous la forme des cumuls annuels de 2000 à 2015.



Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période

Figure 71 : Pluviométrie annuelle (mm) à Tozeur entre 2000 et 2015

Deux maxima se remarquent en 2007 et 2009 où les précipitations sont aux alentours de 200 mm, pour les autres années, les précipitations sont nettement plus faibles en variant entre 25 et 100mm, avec une valeur minimale observée pour l'année 2002. De plus, en début de période, on observe la succession de 3 années particulièrement déficitaires en pluies, par rapport au reste de la période. Cette faiblesse des précipitations entre 2000 et 2002 renforce sans doute les anomalies négatives, sans qu'il soit vraiment possible de faire la part entre ce début de période très sec, et le développement normal des périmètres récents.

Toujours avec ces mêmes cartes d'anomalies, nous pouvons travailler également à une échelle plus fine, même avec ces pixels à 250m de résolution spatiale : nous pouvons faire des zooms sur certains secteurs afin de faire des observations plus détaillées inter et intrapérimètres irrigués.

Deux zones ont ainsi été prises comme exemples : celle de l'oasis traditionnelle de Nefta (Figure 72), et celle de la région nord-est à proximité de l'oasis d'El Ouedienne (Figure 73).

Les anomalies du MOD13Q1-NDVI de l'oasis de Nefta

L'oasis de Nefta se compose de 4 périmètres publics irrigués : trois sont traditionnels, Beni Ali, Fatnassa et Remada ; un est moderne, El faraj ; et d'un périmètre privé, El Ghaouatine, qui est un périmètre illicite, d'initiatives privées, où seules quelques parcelles sont exploitées à partir de puits de surface individuels. Globalement pour les 4 périmètres publics, on retrouve bien la même tendance locale pour la période 2000-2015 que celles observée régionalement, mais avec des valeurs moins fortes : une première période où dominent les anomalies négatives, puis une seconde où les anomalies sont plutôt positives. Cependant, les plus fortes valeurs positives sont observées pour l'année 2003-2004 et pour les 3 périmètres traditionnels de Beni Ali, Fatnassa et Remada. Et les anomalies négatives sont encore importantes jusqu'en 2006-2007.

On remarque sur l'ensemble de la période une certaine hétérogénéité dans les anomalies, en particulier pour les 2 plus grands périmètres publics, Fatnassa et Remada : quelle que soit la date il existe toujours des pixels qui présentent des anomalies à l'opposé du reste du périmètre. Et ces pixels ne sont jamais les mêmes.

L'hétérogéniété spatiale du périmètre privée d'El Ghaouatine, constitué par quelques parcelles distantes les unes des autres, et séparées par de larges zones de sol nu, rend difficile sont interprétation.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 72 : Cartes des anomalies MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2015 pour l'oasis de Nefta
Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 72 : Cartes des anomalies MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2015 pour l'oasis de Nefta

Les anomalies du MOD13Q1-NDVI de la zone nord-est à proximité de l'oasis d'El Ouedienne

Dans la région nord-est de l'oasis d'El Ouedienne, quatre périmètres modernes de petites tailles ont retenu notre attention : Ghedira SMVDA, Cedada SMVDA, Cedada GIC et Dghoumès plaine. En effet, ils présentent des dynamiques d'anomalies très différentes : elles sont parfois similaires et parfois en opposition, ce qui montre des changements désordonnés dans l'activité de la végétation à l'échelle de chaque périmètre. A chaque date, les valeurs des pixels de chaque périmètre restent plutôt homogènes. Ces petits périmètres ont donc l'air de fonctionner individuellement d'une façon homogène mais avec de brusques changements d'une année sur l'autre, en passant d'anomalies négatives à des anomalies positives et viceversa.

Le périmètre de Ghedira SMVDA présente une série presque continue d'anomalies positives jusqu'en 2010-2011, puis ces anomalies deviennent toutes fortement négatives à partir de 2011-2012.

Le périmètre de Cedada SMVDA commence par 3 années, de 2000-2001 à 2002-2003, d'anomalies fortement négatives. Puis elles deviennent nettement positives jusqu'en 2010-2011, pour finir fortement négatives à partir de 2011-2012.

Le périmètre de Cedada GIC, qui est jointif à celui de Cedada SMVDA ne présente pas la même dynamique. Il passe progressivement d'anomalies très négatives en 2000-20001 à des anomalies faiblement positives 2005-2006. Ces anomalies resteront positives jusqu'en 2014-2015.

Le périmètre de Dghoumes plaine a d'abord des anomalies négatives entre 2000-2001 et 2002-2003. Puis elles deviennent positives et elles restent jusqu'en 2014-2015, mais avec des changements intra-périmètres, c'est-à-dire des anomalies localement opposées, positives et négatives, avec de faibles valeurs.

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 73 : Cartes des anomalies MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2015 pour la zone nord-est à proximité de l'oasis d'El Ouedienne

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période



Figure 73 : Cartes des anomalies MOD13Q1-NDVI pour la période 2000-2015 pour la zone nord-est à proximité de l'oasis d'El Ouedienne

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période

Ainsi, la méthode des anomalies, à travers ses résultats cartographiques, nous fournit des indications très utiles dans la compréhension des dynamiques de la végétation à une échelle régionale. Dans le cas présent, les années d'extrêmes climatiques identifiés (très faibles pluviométries) correspondent à celles des plus fortes anomalies régionales de la variable végétation. Cette tendance climatique se superpose à la tendance naturelle du développement de la végétation plus les périmètres les plus récents qui n'ont pas encore atteint une certaine maturité dans leur développement. Il serait donc intéressant de poursuivre ce suivi sur une plus longue période, ou bien de décomposer cette période en sous période plus courte pour pouvoir suivre de façon plus fine les changements dans les dynamiques de la végétation des oasis.

5. Synthèse et conclusion du troisième chapitre

Pour analyser la répartition spatiale du couvert végétal et ses dynamiques temporelles à une échelle pluriannuelle sur 15 ans, deux approches méthodologiques principales ont été utilisées sur un même type de données, le produit MOD13Q1-NDVI calculé par période de 16 jours :

- La décomposition de séries temporelles selectionnées à partir d'une sélection de 92 sites couvrant l'ensemble des PPI ;
- La cartographie des valeurs moyennes annuelles et des anomalies annuelles sur l'ensemble des PPI.

Les résultats obtenus révèlent un certain nombre de faits importants :

A partir des courbes de tendance obtenues par décomposition des séries temporelles

- Il existe de grandes tendances régionales, dans lesquelles on peut regrouper les différents sites suivis avec de fortes corrélations entre ces groupes de sites. La majorité des sites retenus montre une certaine stabilité voire une légère progression sur la période 2000-2016, ce sont les sites qui ont en moyenne les plus fortes valeurs de NDVI. Mais quelques sites présentent relativement une plus grande variabilité, ceux sont plutôt les sites avec des valeurs de NDVI intermédiaires. Et quelques sites, ceux avec les plus faibles valeurs, présentent au contraire une légère régression.
- L'étude de chaque site, pris individuellement, révèle l'existence de fortes variabilités de l'activité de la végétation à l'échelle de l'année, sans qu'il s'agisse de variations saisonnières puisqu'elles ont été d'une certaine façon éliminées par la méthode de décomposition temporelle. De plus, ces fortes variations peuvent être observées simultanément pour certains sites, ou au contraire en décalage. De même, au cours de la période, à certains moments des sites peuvent montrer des corrélations positives, alors qu'à d'autres moments elles sont négatives ou absentes.

A partir des cartes des moyennes et des anomalies annuelles

 La carte à 7 classes obtenue par classification non supervisée par K-means des 15 images moyennes annuelles de MOD13Q1-NDVI montre l'organisation spatiotemporelle de l'activité chlorophyllienne des oasis sur la région de Tozeur. Globalement cette activité s'organise par périmètre, et on retrouve clairement les

Chapitre 3 : Exploitation de séries temporelles d'images stellites à moyenne résolution spatiale pour la caractérisation des oasis sur une longue période

périmètres traditionnels anciens avec les plus fortes valeurs moyennes de NDVI, dans une gamme de valeurs comprises entre 0,4 et 0,6, et les périmètres modernes avec des valeurs moyennes plus faibles, s'étalant sur une gamme de valeurs un peu plus large, de moins de 0,2 à plus de 0,4. Les périmètres les plus étendus en surface, c'est-à-dire les traditionnels, montrent souvent une certaine hétérogénéité, qui est moindre voire absente pour les plus petits périmètres.

Les 15 cartes d'anomalies moyennes annuelles montrent 2 grandes tendances régionales. La première est l'évolution des anomalies négatives généralisées en début de période vers des anomalies positives également généralisées en fin de période. La seconde est le plus fort changement en terme de valeurs d'anomalies extrêmes pour les périmètres les plus récents, alors que les périmètres traditionnels sont plus stables. Une autre information concerne l'hétérogénéité intra-périmètre : elle est plus importante pour les périmètres anciens que pour les modernes.

La répartition spatiale et les dynamiques temporelles de la végétation dans les oasis résultent d'un système complexe où interagissent un certain nombre de facteurs : sans doute climatiques (précipitations, températures...), bien sûr environnementaux (pédologie, topographie, hydrographie...) et surtout anthropiques (pratiques culturales, irrigation, stratégie...). L'ensemble des résultats apportés dans cette partie du travail, constituent une source d'informations d'une grande richesse en terme de diversités de dynamiques spatio-temporelles sur une période de 15 ans, obtenues à partir d'images satellites avec des pixels à 250m de résolution. Ici, encore plus que pour le chapitre 2 où les résultats obtenus ne concernaient qu'une période de 6 mois, la difficulté reste l'interprétation de ces résultats étant donné la longueur de la période étudiée : où peut-on trouver des informations qui couvrent autant d'oasis sur une aussi longue période ?

Conclusion Générale

L'objectif des travaux présentés dans cette thèsea été d'analyser les variations spatiotemporelles de la végétation des oasis à partir de séries temporelles d'images de télédétection à haute et à moyenne résolution spatiale, et à forte répétitivité temporelle, avec comme objectif à moyen terme de mettre en place un dispositif de suivi/alerte des oasis. Plus précisément, nous avons cherché à savoir s'il était possible de surveiller les systèmes oasiens et de caractériser l'état de chaque oasis à l'aide de ces données. Nous avons aussi cherché à élaborer une typologie des oasis en fonction de leurs caractéristiques propres (diversité des espèces cultivées, organisation spatiale des plantations et des parcelles, âge, systèmes et tours d'irrigations...). Pour cela, nous avons développé une série d'approches basées sur l'analyse de série temporelle d'images de télédétection à haute et à moyenne résolution spatiale en utilisant des données acquises respectivement par les satellites SPOT5 et MODIS. D'un point de vue thématique, les résultats obtenus à partir du traitement et de l'analyse de ces séries temporelles ont permis de montrer qu'ils étaient riches d'informations sur les dynamiques spatio-temporelles de la végétation des oasis, et qu'ils permettaient d'envisager la mise en place d'un suivi saisonnier et pluriannuel, dans le cadre d'un dispositif plus large de surveillance et d'alerte pour le développement durable des oasis

Plus précisément, nous avons tout d'abord évalué le potentiel de la série temporelle d'images produites par l'expérience SPOT5 (Take5) sur la région de Nefta-Tozeur d'avril à septembre 2015 (répétitivité : 5 jours) pour identifier et caractériser les périmètres irrigués de cette région. Cette expérience unique reproduite sur 100 sites à travers le monde, a été menée par l'Agence Spatiale Européenne en prévision de l'arrivée des images Sentinel2. Cette évaluation repose sur 2 approches basées sur le calcul d'un indice de végétation classique en télédétection, le NDVI :

La première approche a été faite à l'échelle de chaque périmètre irrigué en étudiant les signatures temporelles à partir du calcul des valeurs moyennes pour chaque date et pour chaque périmètre. Les résultats obtenus montrent que 1) l'activité chlorophyllienne est très différente d'un périmètre à l'autre et couvre une large gamme de valeurs de NDVI, tout en présentant les mêmes tendances, et donc avec une certaine corrélation, ainsi 7 groupes de périmètres ont été déterminés depuis ceux qui ont les plus faibles activités chlorophylliennes jusqu'à ceux qui ont les plus fortes, 2)

plus les valeurs de NDVI sont élevées, plus l'amplitude des variations est importante. Les causes précises de ces variations n'ont pas pu être identifiées faute d'un dispositif adéquat d'observations mis en place sur le terrain, mais il y a de fortes présomptions sur le rôle déterminant du cycle végétatif du palmier, en particulier pour la période considérée d'avril à septembre. Ainsi dans un premier temps, la fin de la floraison et le début de la fructification feraient chuter l'activité chlorophyllienne, puis en fin de période la reprise de la production de palmes l'augmenterait.

La seconde approche a été faite à l'échelle de toute la région en réalisant une carte de synthèse construite à partir de la valeur moyenne et de l'écart-moyen de NDVI. Cette carte rend compte de l'activité chlorophyllienne moyenne et de sa variabilité pour la période considérée, d'avril à septembre. Cette carte met à jour non seulement des dynamiques très différentes d'un périmètre à l'autre, mais également une certaine variabilité intra-périmètre à mettre en relation avec la diversité parcellaire qui peut exister au sein d'un même périmètre (niveau d'entretien, de développement et d'abandon des parcelles). La précision spatiale de ces données avec des pixels à 10m est un atout majeur pour faire le lien avec le terrain à l'échelle de la parcelle, surtout pour les services agricoles en charge de la gestion de ces périmètres.

D'autre part, nous avons également travaillé avec un autre type de séries temporelles d'images satellites : celles du produit MOD13Q1-NDVI à 250m de résolution et avec une répétitivité de 16 jours, issues du capteur MODIS. L'intérêt de ces données réside dans le fait qu'elles existent depuis février 2000. Cette profondeur historique nous a permis d'étudier la dynamique de la végétation des oasis avec une échelle temporelle pluriannuelle. Cette étude a également été menée par deux approches :

• La première approche repose sur la décomposition temporelle des courbes de MOD13Q1-NDVI extraites à partir de 92 sites, composés d'un seul pixel MODIS, pris sur l'ensemble des 38 périmètres irrigués de la région. Seules les courbes de tendance ont été étudiées sur la période février 2000-septembre 2016. Ces courbes de tendance ont été classées en 9 groupes dont les séries temporelles de NDVI s'organisent globalement depuis les plus faibles valeurs jusqu'au plus fortes, chaque groupe gardant son rang sur toute la période. Les 9 courbes moyennes calculées pour chaque groupe sont relativement stables voire en légère progression, à l'exception des 2 groupes aux NDVI les plus faibles qui seraient plutôt en légère régression. Ces 9 courbes moyennes présentent de légères variations sur de courtes périodes, et elles

apparaissent comme relativement corrélées, à l'exception de 3 groupes aux valeurs de NDVI intermédiaires qui présentent aussi des dynamiques plus marquées. Dans chacun de ces 9 groupes, selon les périodes, différentes d'un groupe à l'autre, on observe soit des corrélations positives, soit des corrélations négatives, soit encore une absence de corrélation entre les courbes de tendance prises individuellement. Chaque pixel MODIS, et donc chaque site, a alors sa propre dynamique, qui peut, varier rapidement d'une année à l'autre, indépendamment des autres sites. Il existe ainsi une différence d'analyse de l'activité chlorophyllienne selon que l'on considère un ensemble de courbes de tendance, ou bien les courbes de tendance prise séparément les unes des autres.

La seconde approche repose sur le calcul de la valeur moyenne annuelle du MOD13Q1-NDVI sur l'ensemble des périmètres irrigués de 2001 à 2015. Une première carte de synthèse a été produite en regroupant l'ensemble des pixels en 7 classes. Les profils temporels de ces 7 classes sont légèrement différents de ceux obtenus à partir des courbes de tendance, en particulier pour les 2 classes avec les valeurs les plus faibles, inférieures à 0,3, qui présentent les progressions les plus marquées pour la période. Ensuite la série des cartes annuelles d'anomalies calculées sur la période 2000-2015 pour l'ensemble des périmètres montre bien la tendance régionale à une augmentation de l'activité chlorophyllienne, en passant en début de période d'un grand nombre d'anomalies négatives, à un grand nombre d'anomalies positives en fin de période. En valeurs absolues, les anomalies négatives de début de période sont plus élevées que les anomalies positives de fin de période. Cette observation est à mettre en relation avec une série d'années très sèches qui a touché l'ensemble de la Tunisie de 2000 à 2003, et d'après les cartes d'anomalies ceux sont en majorité les périmètres modernes qui sont les plus touchés par ces anomalies négatives, donc les plus sensibles au manque de précipitations de cette période. Malgré les tailles des pixels (résolution : 250m), ces cartes d'anomalies révèlent de fortes hétérogénéités intra-périmètres tout au long de la période. Et à l'intérieur d'un même périmètre, la localisation des anomalies positives et négatives peut changer d'une année à l'autre.

L'ensemble de ces résultats obtenus à partir de séries temporelles à différents résolutions spatiales et temporelles permet d'identifier des grands types de périmètres irrigués. Pour

résumer, trois grandes familles peuvent être distinguées d'après leurs valeurs de NDVI que ce soit sur une courte période, 6 mois, à 10m de résolution, ou bien sur une plus longue période, 16 années, à 250m de résolution : la première famille est celle des plus faibles valeurs de NDVI, vers 0,2, qui correspond soit à des périmètres illicites peu mis en valeurs et un accès à l'eau limité à des puits individuels de surface, soit à l'exploitation de serres sans plantations de palmiers ; la seconde famille, avec des valeurs intermédiaires de NDVI, entre 0,2 et 0,4, correspond aux nouveaux périmètres encore en phase de développement ou connaissant des problèmes d'alimentation en eau dus à de trop faibles quantités ou bien une désorganisation de tours d'eau ; la troisième famille, présentent les plus fortes valeurs de NDVI, supérieures à 0,4, correspond soit aux périmètres traditionnels avec les plus fortes densités de palmiers, soit aux périmètres modernes monospécifiques, les mieux développés et sans problème d'irrigation.

De plus, ces suivis temporels de l'activité chlorophyllienne par le NDVI, effectués à court terme comme à long terme, montrent que l'ensemble des périmètres sont affectés par des variations relativement importantes aux différents pas de temps explorés. Les facteurs liés à ces variations sont nombreux : il y a bien sûr le cycle végétatif des palmiers lié à la succession des saisons, comme celui des cultures mis en place par les agriculteurs sur les parcelles qui change d'une année sur l'autre en fonction des cultures mises en place au sol, auxquels se rajoute celui des tours d'eau qui est différent d'une périmètre à l'autre, et qui peut également changer en fonction des problèmes rencontrés d'extraction à partir des forages et d'arrivée d'eau selon l'état des canalisations, auxquels se rajoutent les problèmes liés à l'hydromorphie et la salinisation selon l'entretien des canaux de drainage, à l'abandon des parcelles et aux maladies phytosanitaires. Malheureusement, les observations faites sur le terrain au cours de la période 2015-2017 ne sont pas suffisantes pour pouvoir expliquer parcelle par parcelle, ni même périmètre par périmètre l'ensemble des dynamiques mises en évidence : le territoire à couvrir est trop étendu, et la profondeur historique est trop importante.

Mais grâce à l'ensemble de ces résultats, une réflexion peut être menée en concertation avec les acteurs locaux, recherche et service agricole, pour mettre en place un dispositif de suivi ad-hoc inter et intra-périmètres, de façon à analyser les facteurs déterminants pour les dynamiques mises en évidence, que ce soit à court terme comme à long terme.

171

L'ensemble des approches et méthodes explorées dans ce travail peut être pérennisé grâce aux lancements de nouveaux capteurs comme ceux embarqués à bord des satellites Sentinel2, dans la suite de l'expérience SPOT5 (Take5), et aussi VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), dans la suite de MODIS. Ainsi l'objectif initial de mettre en place un dispositif de suivi-surveillance des oasis par télédétection à moyenne et haute résolution spatiale garde tout son sens pour les années à venir. Au cours de ce travail, des réunions de travail ont eu lieu avec les services agricoles locaux pour les tenir informer des résultats, et avoir leur retour quant à l'usage qu'ils pourraient en faire, et aussi la façon dont ils pourraient participer à l'interprétation de ces résultats. Dans un avenir proche, les mêmes approches et méthodes pourraient alors être testées sur d'autres régions oasiennes en Tunisie : les oasis de montagne, la région du Nefzaoua et celle des oasis littorales. On élargirait ainsi le champ d'investigation à d'autres environnements et d'autres types d'oasis. A une échelle plus régionale, des échanges qui vont dans ce sens se sont déjà mis en place dans le cadre d'un programme de la FAO intitulé « Adaptive Management and Monitoring of Oasis Eco-systems in the Maghreb », pour le Maroc, la Mauritanie et la Tunisie, pour la période 2016-2019. En allant encore plus loin, avec la disponibilité et la facilité d'accès à ce type de données d'observation de la Terre, on peut imaginer le développement d'un tel dispositif de suivisurveillance des oasis à l'échelle de toute l'Afrique, voire celle des autres continents. L'existence aujourd'hui en 2019 des séries temporelles d'images comme celles produites par les satellites Sentinel2 offre de nouvelles perspectives pour le suivi spatio-temporel des oasis, en tenant compte des saisons et dans le cadre des effets prévisibles du changement climatique.

Bibliographie

Abbassi N. (2009). Développement de modèles de fusion et de classification contextuelle d'images satellitaires par la théorie de l'évidence et la théorie du raisonnement plausible et paradoxal. Mémoire, Université des sciences Houari Boumediene, Alger, 89p.

Abdedayem S. (2015). Stratégie et plan d'action de développement durable des oasis. Rapport, Global Environnement Facily, World Bank, Gestion durable des écosystèmes oasiens en Tunisie, 150 p.

Abdedayem S., et Veyrac-Ben Ahmed S. (2014). Le paradoxe des oasis du sud tunisien : rénovation ou mort d'un concept ? In : *Actes du colloque Oasis dans la mondialisation : ruptures et continuités*, Marshall, Lavie, Chaléard, Fort, Lombard (Dir.), Paris, 16 et 17 décembre 2013, 21–28.

Abdelbaki A. (2012). Utilisation de SIG et télédétection dans l'étude de la dynamique du couvert végétal dans le sous bassin versant d'Oued Bouguedfine (Wilaya de Chlef). Thèse doct, Université Hassiba Ben Bouali, Chlef, 110 p.

Abdellaoui N. N. (2014). La classification hiérarchique ascendante. Mémoire, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 73p.

Adami M., Bernardes S., Arai E., Freitas R.M., Shimabukuro Y.E., Espirito-Santo

F.D.B., Rudorff B.F.T., & Anderson L.O. (2018). Seasonality of vegetation types of South

America depicted by moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) time series.

Int. J. Appli. Earth Obs. Geoinf, 69, 148-163.

Adams B.J., Huyck C.K., Mansouri B., Eguchi R.T., & Shinozuka M. (2004). Application of High-Resolution Optical Satellite Imagery for Post-Earthquake Damage Assessment: The 2003 Boumerdes (Algeria) and Bam (Iran) Earthquakes. *Research Progress and Accomplishments*, MCEER-04-SP01, Buffalo, NY, 173-186.

Adole T., Dash J., & Atkinsou P.M. (2018). Characterising the land surface phenology of Africa using 500 m MODIS EVI. *Applied Geography*, 90, 187-199.

Alary V., Daoud I., Abdelzaher M., Salama O., Aboul-Naga A., Merveille N. (2012). Adaptation des sociétés bédouines de la côte Nord-Ouest de l'Égypte au changement global. Autrepart 62: 183–200. Anchang J.Y., Ananga E.O., & Pu R. (2016). An efficient unsupervised index based approach for mapping urban vegetation from IKONOS imagery. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*, 50, 211-220.

Anyamba A., et Tucker C.J. (2005). Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAAAVHRR NDVI data from 1981 to 2003. *Journal of Arid Environments*, 63, 596-614.

Armenakis C., Cyr I., & Papanikolaou E. (2002). Change Detection Methods for the Revision of Topographic Databases. *In : Proceeding of ISPRS Symposium on "Geospatial Theory, Processing and Applications*, July 9-12 2002, Ottawa, XXXIV Part 4, Commission IV, 6p.

Atzberger C. (2013). Advances in Remote Sensing of Agriculture: Context Description, Existing Operational Monitoring Systems and Major Information Needs. *Remote Sensing*, 5(2), 949–981. DOI : 10.3390/rs5020949

Bai J., Chen X., Li L., Luo G., & Yu Q. (2014). Quantifying the contributions of agricultural oasis expansion, management practices and climate change to net primary production and evapotranspiration in croplands in arid northwest China. *J. Arid Environ*, 100, 31–41.

Bai Z.G., Dent D.L., & Schaepman M.E. (2005). Quantitative global assessment of land degradation and improvement: pilot study in North China. Report 2005/6, *ISRIC - World Soil Information*, Wageningen, 46p.

Battesti V. (1993). Approche ethnobotanique d'une oasis saharienne : Djanet (Algérie). Mémoire principal de DEA (Sciences sociales), université R. Descartes-Sorbonne (Paris-V), Muséum national d'histoire naturelle, Paris, 96 p.

Battesti V. (2002). Les jardins d'oasis : des natures en construction. Séminaire Ethnohistoire des jardins, dirigé par Georges Métailié, au Museum national d'Histoire naturelle, Paris, France.

Battesti V. (2005). Jardins au désert. Évolution des pratiques et savoirs oasiens, Jérid tunisien. IRD Éditions, coll. À travers champs, 440 p.

Bechraoui A. (1980). La vie rurale dans les oasis de Gabès (Tunisie). Publication de la Faculté des Sciences Humaines. Université de Tunis, Tunisie, 301 p.

Belguedj M. (2010). Préservation des espèces oasiennes et stratégie à mettre en oeuvre. Cas du palmier dattier (Phoenix Dactylifera. L) Institut Technique de Développement Agricole Saharienne, ITDAS/OADA 13-14/12/2010.

Ben Khalfallah, C., Ouerchefani, D., Mazouzi, K., Delaitre, E., Khebour-Allouche. F. (2017). Land Cover Change detection in Tunisian Oases through MODIS data (Products:

MOD13Q1). Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. pp 1767-1769. [doi: 10.1007/978-3-319-70548-4_513]

Ben Khalfallah, C., Delaitre, E., Ouerchefani, D., Demagistri, L., Khebour-Allouche, F., Darragi, F., Seyler, F. (**2018**). Monitoring vegetation dynamics in southern Tunisia using SPOT-5 (TAKE5) data – A case study of the Tozeur oases. *Journal of applied remote sensing*. 12 (4), 046002. [doi: 10.1117/1.JRS.12.046002].

Ben Salah M. (1992). Premier répertoire des variétés de palmier dattier dans les oasis littorales tunisiennes: Séminaire les oasis en Tunisie: Patrimoine Mondial: Fédération Tunisiennes des Clubs UNESCO, ALECSO Chenini- Gabès du 27 au 30/12/1992.

Ben Salah M. 1993. Description phénopomologique de treize variétés de palmier dattier des oasis tunisiennes : 1- Partie végétative. *Revue des régions arides*, 5/93 : 3–22.

Ben salah M., & Hellali R. (2006). Description phénopomologique de 15 cultivars tunisiens de palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.). *Plant Genetic Ressources Newsletter*, FAO & BIODIVERSITY, 148: 19-25.

Ben Salah M. (2012). Rapport d'expertise technique sur la biodiversité oasienne en Tunisie. Edt. RADDO-ASOC, Gabès, Tunisie. 76 p.

Belhedi A. (1999). Les disparités spatiales en Tunisie, état des lieux et enjeux. *Méditerranée*, 91(1): 63-72.

Berg L. V. D. & Kellner K. (2005). Restoring degraded patches in a semi-arid rangeland of South Africa. *J. Arid Environ*, 61(3): 497-511.

Besbes M., Abdous B., Abidi B., Ayed A., Bachta M., Babasy M., Ben Baccar B., EL Batti D., Ben Salah Y., Biet Charreton M., Biout F., Douma A., Fezzani C., Gadhi M., Horriche F., Kadri S., Khadraoui A., Khanfir R., Kinzelbach W., Larbes A., Latrech D., Margat J., De Marsily G., Mamou A., El Mejerbi M., Mekrazi A., Mhiri A., Moumni L., Nanni M., Pallas P., Pizzi G., Salem A., Salem O.M., Taibi R., Zammouri M. (2003). Système Aquifère du Sahara septentrional Gestion commune d'un bassin transfrontière, *La Houille Blanche*, 5 : 128-133. DOI : 10.1051/lhb/2003102

Beuchle R., Grecchi R.C., Shimabukuro Y.E., Seliger R., Eve H.D., Sano E., & Achard F. (2015). Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. *Applied Geography*, 58, 116-127.

Blaschke T. (2005). Toward a Framework for Change Detection Based on Image Objects. In: Erasmi, S., Cyffka, B., Kappas, M. (Eds.), *Remote Sensing & GIS for Environmental Studies*, Göttinger Geographische Abhandlungen, Göttingen, 113, 1-9.

Boschetti. M., Stroppiana D., Brivio P.A., & Bocchi S. (2009). Multi-year monitoring of rice crop phenology through time series analysis of MODIS images. *International Journal of Remote Sensing*, 30(18), 4643-4662.

Boubou M. (2007). Contribution aux méthodes de classification non supervisée via des approches prétopologiques et d'agrégation d'opinions. Mémoire, Université Claude Bernard – Lyon I, 204p.

Boudet G. (1984). Manuel sur les pâturages tropicaux et les cultures fourragères. 4 ème édition révisée. Institut d'Elevage et de Médecine Vétérinaire des Pays Tropicaux. 237 p.

Bras JP. (1996). L'autre Tunisie de Bourguiba: Les ombres du Sud. In : Camau M, Geisser V, eds, Bourguiba, la trace de l'héritage, Karthala. Paris, pp. 295-312.

Brockwell P.J., & Davis R.A. (1996). *Introduction to Time Series and Forecasting.* Springer, New-York : 437p.

Bruns R., Scarminio L., & Barros Neto B. (2006). Statistical design: chemometrics. *Data Handling in Science and Technology*, Elsevier Science, Amsterdan, The Netherlands, 25, 412p.

Carpentier I. (2017). Diversité des dynamiques locales dans les oasis du Sud de la Tunisie. *Cah. Agric.*, 26, 35001, 8p. DOI: 10.1051/cagri/2017017

Carpentier I., & Gana A. (2014). Les oasis de Tozeur et Chenini Gabès : diversité et durabilité des formes de valorisation à l'ère de la mondialisation et des crises du développement. In : Actes du colloque "Oasis dans la mondialisation : ruptures et continuités", décembre 2013, Paris, pp.105-112.

Carlson T.N & Riplay D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sens. Environ.*, 62(3), 241–252.

Carrão H., Gonc alves P., & Caetano M. (2008). Contribution of multispectral and multitemporal information from MODIS images to land cover classification. *Remote Sensing Environ.*, 112(3), 986–997. DOI : 10.1016/j.rse.2007.07.002

Chaieb M. (1989). Influence des réserves hydriques du sol sur le comportement comparé de quelques espèces végétales de la zone aride tunisienne. Doct. USTL, Acad. Montpellier, 293 p.

Chaléard JL. (2008). « Les grandes mutations des territoires ruraux dans les pays du sud : problèmes et enjeux ». In : *Ruralités Nords-Suds : inégalités, conflits, innovations,* H. Rakoto

Ramiarantsoa (dir.), B. Thibaud (dir.), D. Peyrusaubes (dir.), Actes du colloque du laboratoire ICOTEM, Poitiers, 19-20 octobre 2006, Paris, L'Harmattan, p. 19-30.

Chen. J., Jönsson. P., Tamura. M., Gu. Z., Matsushita. B., & Eklundh. B. (2004). A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. *Remote Sensing of Environment*, *91*, Issues 3-4: 332-334.

Centre canadien de télédétection (CCT). (2015). Notions fondamentales de télédétection, Candada, 266p.

Cheret V., Denux J. P., Gacherieu C., & Ortisset J. P. (2011). Utilisation de séries temporelles d'images satellitales pour cartographier le dépérissement des boisements résineux du Sud Massif Central. Rendez-vous Techniques ONF, pp.55-62. <hal-01511003>

Chuvieco E., Englefield P., Trishchenko A.P., & Luo Y. (2008). Generation of long time series of burn area maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data. *Remote sensing of environment*, *112*, 2381-2396.

Cleveland W.S., & Delvin S.J. (1988). Locally Weighted Regression: An Approach to Regression Analysis by Local Fitting. *Journal of the American Statistical Association*, 83, 596-610.

CNEA (**Centre national d'études agricoles**) (**1976a**). Etude de création d'oasis nouvelles, Ministère de l'Agriculture, Tunis, 69 p.

CNEA (**Centre national d'études agricoles**) (**1976b**). Etude de sauvegarde des oasis du Sud tunisien. 11 v. 405 p (2384).

CNEA (Centre National des Etudes Agricoles) (2009). Etude d'orientation stratégique sur le développement durable et agriculture dans le gouvernorat de Gabès. Tunisie, Phase 3, 76 p.

CNEARC. (2003). Étude de quatre oasis de la région de Tata, Maroc. CNEARC, IRC-SUPAGRO, Montpellier.

Conforti J, & Tonneau JP. (1999). Les systèmes de production oasiens- le cas des oasis du Djérid. In: Ferry M, Bedrani S, Greiner D, eds. Agroéconomie des oasis. Montpellier: CIRAD, pp. 103–115.

Cournoyer C. (2004). LE PAYSAGE DE L'OASIS DANS LE SUD DU MAROC, La Palmeraie de Marrakech – un paysage périurbain. Workshop de la CUPEUM Marrakech, Université de Montréal, 15 p.

CRDA Tozeur (Commissariat Régional du Développement Agricole de Tozeur). (2004). Rapport annuel d'activité. Ministère de l'Agriculture, 200 p.

CRDA Tozeur (Commissariat Régional du Développement Agricole de Tozeur). (2013). Rapport annuel d'activité. Ministère de l'Agriculture, 160 p.

CRDA Tozeur (Commissariat Régional du Développement Agricole de Tozeur). (2017). Rapport annuel d'activité. Ministère de l'Agriculture, 220 p.

De Beurs K.M., & Henebry G.M. (2010). A land surface phenology assessment of the northern polar regions using MODIS reflectance time series. *Canadian Journal of Remote Sensing, 36*, S87–S110.

Desjardins R. (2000). La télédétection : perspective analytique Paris, ESTEM, 226 p.

Deshayes M., Guyon D., Jeanjean H., Stach N., Jolly A., Hagolle O. (2006). The contribution of remote sensing to the assement of drought effects in forest ecosystems, Ann. For. Sci. 63 (2006) 579–595.

Didan, K., Munoz, A.B., Solano, R., Huete, A. (**2015**). MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series), Version 3.00, (Collection 6)

Diello P., Mahe G., Paturel J.E., Dezetter A., Delclaux F., Servat E., & Ouattra F. (2009). Relations indices de Végétation–Pluie au Burkina Faso: Cas du Bassin Versant du Nakambé/Relationship between Rainfall and Vegetation Indexes in Burkina Faso: A Case Study of the Nakambé Basin. *HYDROLOG SCI J*, 50, Issue 2, 221. [doi.org/10.1623/hysj.50.2.207.61797].

Doraiswamy P.C., Hatfield J.L., Jackson T.J., Akhmedov B., Prueger J., & Stern A. (2004). Crop condition and yield simulations using Landsat and MODIS. Remote Sensing of Environment 92, 548–559.

Dusseaux P. (2014). Exploitation de séries temporelles d'images satellites à haute résolution spatiale pour le suivi des prairies en milieu agricole. Géographie. Université Rennes 2

El Bekr A. (1972). The date palm. A review of its past, present status and the recent advances in its culture industry and trade. Imp. El Ani. Bagdad. Irak 1050p. (En arabe).

El Hajj M., Bégué A., Guillaume S., & Martiné J.F. (2009). Integrating SPOT-5 time series, crop growth modeling and expert knowledge for monitoring agricultural practices— The case of sugarcane harvest on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment, 113,* (10):2052-2061.

Fan X., Liu Y., Tao J., Wang Y., & Zhou H. (2018). MODIS detection of vegetation changes and investigation of causal factors in Poyang lake basin, China for 2001-2015. *Ecological Indicators*, *91*, 511-522.

178

Fargette M., Loireau M., Raouani N., Kadri Zara M., Simon H., Libourel T., Sghaier
M., & Leibovici D. (2017a). Modélisation de la diversité des systèmes de culture, de l'observation à la détection : cas de l'oasis de Nefta (Djérid, Tunisie). Cah. Agric. 26: 45009.

Fargette M., Loireau M., Sghaier M., Raouani N., & Libourel T. (2017b). The future of oases in Maghreb as through the prism of a systemic approach: which viability and coviability? In: Barrière O., Morand S., Behnassi M., David G., Douzal V., Canete V., et *al.*, eds. Coviability of social and ecological systems: reconnecting mankind to the biosphere in an era of global change. Dordrecht, New York, Heidelberg, London: Springer.

Fassi D. (2017). Les oasis du Monde, carrefour des civilisations et modèle fondamental de durabilité. *Cah. Agric*.26: 46001.

Feng. G., Morisette J.T., Wolfe R.E., Ederer G., Pedelty J., Masuoka E., Myneni R.,

Bin T., & Nightingale J. (2008). An algorithm to produce temporally and spatially continuous MODIS-LAI time series. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5, 60-64.

Fensholt R., Rasmussen K., Nielsen T. T., & Mbow C. (2009). Evaluation of earth observation based long term vegetation trends - intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote sensing of environment, 113*, 1886-1898.

Feranec J., Hazeu G., Christensen S., & Jaffrain G. (2007). Corine Land Cover Change Detection in Europe (Case Studies of the Netherlands and Slovakia). *In Land Use Policy, Science Direct, 24*, 234-247.

Ferchichi A., & Hamza H. (2008). Le patrimoine génétique phoenicicole des oasis continentales. Institut des Régions Arides de Médenine, ISBN : 978-9973-0-05-27-4.

Gachet J-P. (1987). L'agriculture, discours et stratégies. *In : Camau M, ed. Tunisie, une modernité au-dessus de tout soupçon ?* Aix-en-Provence : IREMAN, CNRS, pp. 181-228.

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

Gao B. (2009). Chapter 13: Multi-TemporalImage Analysis, In J. Gao (Eds). *Digital Analysis of Remotely Sensed Imagery*, 525-566, Publisher: The McGraw-Hill Companies.

Gana A. (2013). Aux origines rurales et agricoles de la révolution tunisienne. Maghreb Machrek 1(215): 57–80.

Gana A. (2008). Restructurations agricoles en Tunisie : adaptations et différenciation. Autrepart 2(46): 81–96. **Gascon F. (2001).** Modélisation physique d'images de télédétection optique. Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III

Gharbi N. (2009). Aménagements hydrauliques et amélioration de la gestion de l'eau dans les oasis du Sud. Atelier Sima « Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua, 25-27 Février 2009, Douz, Tunisie (Actes publiés par S. Marlet et I. Mekki. Editeurs scientifiques, 2010, Cirad, Montpellier, France).

GIZ. Ministère de l'Environnement tunisien. (2012). Les oasis de Tunisie à protéger contre la dégradation et les effets du changement climatique. 34p. Disponible sur <u>http://www.environnement.gov.tn/</u> PICC/wp-content/uploads/Les-oasis-face-au-changement-climatique.pdf.

Girard M.C. & Girard C.M. (1999). Traitement des données de télédétection. Paris, France.

Guittonneau G.G. (2011). Documents sur les Activités de la Société botanique de France La flore et la végétation de la Tunisie méridionale. Voyages d'études de la SBF (27 mars -3 avril 2008), 283-359 p

Gvozdetskiy N.A., & Mikhaylov N.I. (1963). Physical geography of USSR (Asian part). Moscow: Governmental publishing house of geographical literature.

Hakkou A., & Bouakka M. (2000). « Programme de sauvetage de la palmeraie de Figuier et encouragement des coopératives agricoles » Miméo, Univ. Mohamed 1 Oujda, Fondation CIPE(Espagne) Amicale Amitié Coopération Figuier (Maroc), 211 p.

Hall O., & Hay G. (2003). A Multiscale Object-Specific Approach to Digital Change Detection. In International Journal of Applied Earth Observation and GeoInformation, 4, 311-327.

Hill T., & Lewicki P. (2007). STATISTICS Methods and Applications. Tulsa, OK: StatSoft
Hountondji Y.C., Sokpon N., & Ozer P. (2006). Analysis of the vegetation trends using
low resolution remote sensing data in Burkina Faso (1982–1999) for the monitoring of
desertification. International Journal of Remote Sensing, 27, 871–884.

Huete A.R., Justice C.O., & van Leeuwen W. (1999). MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document (ATBD), version 3.0. In (p. 129): University of Arizona.

Huete A.R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Remote Sensing of Environment, 25, 295-309.

180

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E., Gao X., & Ferreira L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *83*, 195–213.

Huete A., Didan K., Leeuwen W.V., Miura T., & Glenn E. (2011). MODIS vegetation indices. In B. Ramachandran, C. O. Justice, & M. J. Abrams (Eds.).Land remote sensing and global environmental change. *Springer New York Springer NewYork*, 579–602.

Ippoliti-Ramilo G.A., Epiphanio J.C.N., & Shimabukuro Y.E. (2003). Landsat-5 Thematic Mapper data for pre-planting crop area evaluation in tropical countries. *International Journal of Remote Sensing*, 24, (7): 1521-1534.

Jacquin A. (2010). Dynamique de la végétation des savanes en lien avec l'usage des feux à Madagascar. Analyse par série temporelle d'images de télédétection, 146 p.

Janty G. (2014). Les enjeux de la préservation et du développement d'un paysage culturel. Le cas de de la palmeraie de l'oasis de Figuig (MAROC). Thèse de Doctorat de l'université de Paris Diderot (Paris 7), 332 p.

Jensen J.R. (2000). Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. Upper

Saddle River, N.J.: Prentice Hall; London: Prentice-Hall International, (20, 82, 86, 253)

Jianya G., Haigang S., Kaimin S., Guorui M., & Junyi L. (2008). Object-Level Change Detection Based on Full-Scale Image Segmentation and its Application to Wenchuan Earthquake. *In Science in China Series E: Technological Sciences*, *51*, 110-122.

Jönsson P., & Eklundh L. (2002). Seasonality extraction by function fitting to time series of satellite sensor data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 1824-1832

Jouve P. (2012). Les oasis du Maghreb, des agro-écosystèmes de plus en plus menacés. Comment renforcer leur durabilité ? Courrier de l'Environnement de l'INRA 62: 113–121.

Jouve P., Ferrak A., Loussert R., & Mouradi H. (2013). Du collectif à l'individuel, une évolution irréversible dans les oasis du Sud du Maroc ?, *Actes du Colloque International «Sociétés en transition et développement local en zones difficiles »*. Revue des Régions Arides -Numéro spécial- n°31, pp. 209-216.

Jouve P., Loussert R., & Mouradi H. (2005). Du déclin à la régénération des oasis de la région de Tata (Maroc). *Symposium international pour le développement agricole des systèmes oasiens*. 7-10 mars 2005, Erfoud, Maroc.

Kassah A. (1996). Le secteur dattier en Tunisie. Revue tunisienne de géographie. 18 : 201-235. Kassah A. (2010). Oasis et aménagement en zones arides. Enjeux, des et stratégies. S. Marlet, I. Mekki. *Actes de l'atelier Sirma « Gestion des ressources naturelles et développement durable des systèmes oasiens du Nefzaoua »*. Douz, Tunisia. Cirad, 6 p.

Kaufman Y.J., & Tanré D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *Proceedings of IEEE IGARS*, *92*, 261-270, New York.

Kaufman Y.J., & Tanré D. (1996). Strategy for direct and indirect methods for correcting the aerosol effect on remote sensing: From AVHRR to EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 55, 65-79.

Kennedy R.E., Townsend P.A., Gross J.E., Cohen W.B., Bolstad P., Wang Y.Q., & Adams P. (2009). Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote sensing of environment*, *113*, 1382–1396.

Kim H.W., Kim J-H., Li W., Yang P., & Cao Y. (2017). Exploring the impact of green space health on runoff reduction using NDVI. Urban Forestry & Urban Greening, 28, 81-87

King C., & Thomas D. S. G. (2014). Monitoring environmental change and degradation in the irrigated oases of the Northern Sahara. *Journal of Arid Environments, 103,* 36-45.

Kosh B. (2010). La télédétection et son utilisation dans les évaluations forestières nationales (EFN). Chapitre de répertoire des connaissances sur évaluations des ressources forestières nationales FAO, 18 p.

Labidi A. (1995). Modélisation et gestion des ressources en eau dans les oasis du Djérid. Actes du Séminaires « La salinisation des sols et la gestion des eaux dans les oasis ». Tozeur, 8 et 9/11/1993. Direction des Sols/ORSTOM, Sols de Tunisie no16, 103-135.

Lasram M. (1990). Les systèmes agricoles oasiens dans le Sud de la Tunisie. In : D ollé V. (ed.), Toutain G. (ed.). *Les systèmes agricoles oasiens*. Montpellier : CIHEAM, p. 21 -27 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéen s; n.11).

Lausch A., Pause M., Schmidt A., Salbach C., Gwillym-Margianto S., & Merbach I. (2013). Temporal hyperspectral monitoring of chlorophyll, LAI, and water content of barley during a growing season. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1–17.

Lazhar B. (2009). Rôle de l'oasis dans la création de l'ilot de fraicheur dans les zones chaudes et arides « Cas de l'oasis de chetma -Biskra -Algérie ». Thèse de Doctorat de l'université de Constantine, 156 p.

Lecerf R. (2008). Suivi des changements d'occupation et d'utilisation des sols d'origine anthropique et climatique à l'échelle régionale par télédétection moyenne résolution

(Application à la Bretagne). In, Laboratoire COSTEL (p. 326). Rennes (France): Université de Rennes 2.

Leroux L. (2015). Suivi et Caractérisation des Dynamiques de la Production Agricole en Afrique de l'Ouest par Télédétection à Moyenne Résolution Spatiale, 285 p.

Li Y., Cao Z., Long H., Liu Y., & Li W. (2017). Dynamic analysis of ecological environment combined with land cover and NDVI changes and implications for sustainable urban–rural development: The case of Mu Us Sandy Land, China. *Journal of Cleaner Production*, 142, 697-715. [DOI : 10.1016/j.jclepro.2016.09.011]

Li Z., Zhao R., & Chen J. (2002). A Voronoi-Based Spatial Algebra for Spatial Relations. *In Progress in Natural Science*, *12*, 528-536.

Lloyd D. (1990). A Phenological Classification of Terrestrial Vegetation Cover Using Shortwave Vegetation Index Imagery. *Int J Remote Sens*, 11, 2269-2279.

Lowry J., Ramsey R.D., Thomas K., Schrupp f D., Sajwaj c T., Kirby a J., waller g E., Schrader b S., Falzarano e S., Langs a L., Manis a G., Wallace e C., Schulz d K., Comer d P., Pohs a K., Rieth a W., Velasquez g C., Wolk g B., Kepner c W., Boykin b K., O'Brien g L., Bradford c D., Thompson b B., Prior-Magee J. (2007). Mapping moderatescale land-cover over very large geographic areas within a collaborative framework: A case study of the Southwest Regional Gap Analysis Project (SWReGAP). *Remote Sensing of Environment, 108*, (1):59-73.

Lu D., Mausel P., Bronsizio E., & Moran E. (2004). Change Detection Techniques", *In International Journal of Remote Sensing*, 25, 2365-2407, Publisher: Taylor & Francis.

Lu M., Tang H., Rao Y., Yang P., & Wu W. (2016). Land cover change detection by integrating object-based data blending model of Landsat and MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 184, 374–386.

Madonsela S., Cho M.A., Ramoelo A., & Mutanga O., (2017). Remote sensing of species diversity using Landsat 8 spectral variables. *ISPRS J Photogramm Remote Sen, 133,* 116-127.

Mamou A. (1990). Caractérisation, évaluation et gestion des ressources en eau du Sud tunisien. Thèse de doctorat d'Etat sc. Nat. Univ. Paris-Sud, juin 1990, 426 p.

Mamou A., & Kassah A. (2002). Eau et développement dans le Sud tunisien. CERES, Série géographie, n°23, Tunis, 2002, 286 p.

Martelet. G., Truffert. C., Tourlière. B., Ledru. P., & Perrin. J. (2006). Classifying airborne radiometry data with Agglomerative Hierarchical Clustering: A tool for geological

mapping in context of rainforest (French Guiana). *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf*, **8**, 208-223. [doi: 10.1016/j.jag.2005.09.003].

Martín-Sotoca J.J., Saa-Requejo A., Borondo J., & Tarquis, A.M. (2018). Singularity maps applied to a vegetation index. *Biosystems Engineering*, *168*, 42-53.

Matchanov M., Teodoro A., & Christoph Schroder. (2016). Criterion definition for the identification of physical-geographical boundaries of Khorezm oasis through remotely sensed data. *Environ Monit Assess, 188:35*.

Matikainen L., Hyyppä J., & Kaartinen H. (2004). Automatic Detection of Changes from LASER Scanner and Aerial Image Data for Updating Building Maps. In International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing (IAPRS), and Spatial Information Sciences, ISPRS Symposium, 35, 434-439.

McNeely J.A., Gadgil M., Leve`que C., Padoch C., & Redford K. (1995). Human influences on biodiversity. In: Heywood, V.H., Watson, R.T. (Eds.), *Global Biodiversity Assessment*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 711–821.

Meera Gandhi G., Parthiban S., Thummalu N., & Christy A. (2015). Ndvi : Vegetation change detection using remote sensing and gis – A case study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, *57*, 1199-1210.

Millward A.A., Piwowar J.M., & Howarth P.J. (2006). Time series analysis of medium resolution, multisensor satellite data for identifying landscape change. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 72, 653-663.

Ministère de l'Agriculture/DGGR. (1975). Etude d'un schéma directeur pour l'exploitation des ressources en eau et en sol du Sud tunisien. Pl. n°1. Ministère de l'Agriculture-DGGR, Ja&nv. 1975.

MEDD (Ministère de l'Environnement et du Développement durable tunisien). (2015). Direction générale de l'environnement et de la qualité de la vie. 2015. Stratégie de développement durable des Oasis en Tunisie, 184 p.

Michey R. M., Dun O. J., & Clark V. A., (2004). *Applied statistics: Analysis of variance and regression (3rd ed.)*, 448 p., New Jersey, USA: Wiley-Interscience.

Moumni L. et Horriche F. (1998). Actualisation du bilan des nappes aquifères du Djerid. Note interne. CRDA Tozeur. p 40.

Munier P. (1973). Le palmier dattier, Paris : G-P Maisonneuve et Larose, 221 p.

Naceur A.H., & Ferchichi A. (2013). Inventaire des différents cultivars de palmier dattier (Phoenix dactylifera L.) dans les oasis traditionnelles du gouvernorat de Gabès (Tunisie). Revue des Régions Arides - Numéro Spécial - n° 35 (3/2014) - Actes du 4ème Meeting

International Aridoculture et Cultures Oasiennes : Gestion des Ressources et Applications Biotechnologiques en Aridoculture et Culture Sahariennes : Perspectives pour un développement durable des zones arides 17_19/12/2013.

Niemeyer I., Marpu R., & Nussbaum S. (2008). Chapter 2.5: Change Detection Using Object Features", In T. Blaschke, S. Lang and G. J. Hay (Eds.), "ObjectBased Image Analysis : Spatial Concepts for Knowledge-Driven Remote Sensing Applications. In Series Editors: W. Cartwright, G. Gartner, L. Meng and M. P. Peterson, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, PP. 185-201, Publisher: SpringerVerlag Berlin.

Nussbaum S., & Niemeyer I. (2007). Automated Extraction of Change Information from MultiSpectral Satellite Imagery. *In ESARDA Bulletin (The European Safeguards Research and Development Association), 36,* 19-25.

OSS (**Observatoire du Sahara et du Sahel**). (2003). Système Aquifère du Sahara Septentrional: gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse, 1ere édition, Janvier 2003.

OSS (**Observatoire du Sahara et du Sahel**). (2014). Valorisation et recyclage des sousproduits des oasis : acquis et perspectives \ OSS. OSS, Tunis, 85 p.

Pei F., Wu C., Liu X., Li X., Yang K., Zhou Y., Wang K., Xu L., & Xia G. (2018). Monitoring the vegetation activity in China using vegetation health indices. *Agricultural and Forest Meteorology*, 248, 215-227.

Peng D., Zhang X., Zhang B., Liu L., Liu X., Huete A.R., Hiang W., Wang S., Luo S., Zhang X., & Zhang S. (2017). *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 132, 185– 198

Polidori L. (1973). Introduction à la télédétection spatiale. Cours d'école supérieur des géomètres et topographes, 60 p.

Purevdoj T., Tateishi R., Ishiyama T., & Honda Y. (1998). Relationships between percentage vegetation cover and vegetation indices. *Int J Remote Sens*, *19*, 3519-3535.

Rapinel S. (2012). Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : De l'observation à la modélisation prospective. Thèse de géographie, Université Rennes 2, 384 p.

Rapinel S., Clément B., Magnanon S., Sellin V., & Hubert-Moy L. (2014). Identification and mapping of natural vegetation on a coastal site using a Worldview-2 satellite image. *Journal of Environmental Management, 144, 236–246.*

Reed B.C., Brown J.F., Van der Zee D., Loveland T.R., Merchant J.W., & Ohlen D.O. (1994). Measuring Phenological Variability from Satellite Imagery. *J VEG SCI*, *5*, 703-714

Reed B.C., White M.A., & Brown J.F. (2003). Remote sensing phenology. In Shwartz M.D. (Ed.), *Phenology: An Integrative Science* (pp. 365-381). Dordrecht: Kluwer Publishing

Reed B.C. (2006). Trend analysis of time-series phenology of north America derived from satellite data. *GIScience and Remote Sensing (Special issue on Multi-Temporal Imagery Analysis)*, 43, 24-38.

Ren H., Zhou G., & Zhang F. (2018). Using negative soil adjustment factor in soiladjusted vegetation index (SAVI) for aboveground living biomass estimation in arid grasslands. *Remote Sensing of Environment*, 209, 439-445.

R-Home-contributors. (2017). contributors. Récupéré sur https://www.r-project.org/

R-Home-WhatisR. (2017). what is R. Récupéré sur https://www.r-project.org/about.html

Rhouma A. (1994). Le palmier dattier en Tunisie. Le patrimoine génétique, Arabesques, Editions et Créations. Tunis. Tunisie. 253 p.

Richards J.A. (2012). Remote sensing digital image analysis: An introduction. Springer, 5th édition.

Riou. (1988). Bioclimatologie des oasis. Séminaire sur les systèmes agricoles oasiens. Tozeur, Tunisie, 19-21 nov.

Robin M. (1995). La télédétection. Paris, Nathan, 318 p.

Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D., & Harlan J. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. NASA/GSFC, Type III, Final report. Greenbelt, MD, Etats-Unis, 371 p.

Rouse J.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, *in Third ERTS Symp*, pp. 309–317, NASA SP-351 I.

Sadegh J., Seaquist. J., Eklundh L., & Ardö J. (2014). Automated mapping of vegetation trends with polynominals using NDVI imagery over the Sahel. *Remote sens*. *Environ*, 141, 79-89. [doi: 10.1016/j.rse.2013.10.019].

Saidi A. (2001). Tectonique active de l'Atlas Sud Tunisien: approche structurale et morphotectonique. Thèse Doct. Univ Toulouse III - Paul Sabatier, France, 228 p.

Saidi N. (1984). Dynamique de la végétation du maquis dans les chaines de Dj Zerouela et de Dj Bou-Zegra (Atlas tellien). Mémoire ingénieur, ENSA, El Harrach, Algérie, 131 p.

Sébillotte M. (1990). Système de culture : un concept opératoire pour les agronomes. In Combe L, Picard D, eds. Les systèmes de culture. Paris: INRA, pp. 165–196. Disponible sur <u>http://prodinra.inra.fr/record/94106</u>.

Selmi S. & Boulinier T. (2003). Breeding bird communities in southern Tunisian oases: the importance of traditional agricultural practices for bird diversity in a semi-natural system. *Biological Conservation*, 110 (2003) 285–294.

Sghaier M. (1994). Les agrosystèmes de production oasiens en Tunisie. Fonctionnement, rôle et adaptation aux changements écologiques et socio-économiques. *In* Tonneau J.-P.

Sghaier M. (1996). Les systèmes oasiens sahariens et péri-sahariens, cas de la Tunisie FAO, 90 p.

Sghaier M. (2010). Gouvernance des ressources en eau dans les oasis tunisiennes IUCN, 69 p.

Sghaier M. (2014). Perspectives de développement de l'approche filière pour la structuration des activités des communautés locales au niveau des oasis de la région MENA. Projet MENA-DELP Partage des connaissances et de coordination sur les écosystèmes désertiques et les moyens de subsistance.

Shao Y., Lunetta R., Wheeler B., Liames J.S., & Campbell J.B. (2016). An evaluation of time-series smoothing algorithms for land-cover classifications using MODIS-NDVI multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 174, 258–265.

Singh A. (1989). Digital Change Detection Techniques Using Remotely-Sensed Data, International Journal of Remote Sensing, 10, 989-1003.

Skouri M. (1990). Eléments de synthèse et conclusions/ Division des Sciences Ecologiques, UNESCO/Options Méditerranéennes, Sér .A/n°11,1990-Les systèmes agricoles oasiens, 5 p.

Sobrino J.A., Raissouni N., & Li A.L. (2001). A comparative study of land surface emissivity retrieval from NOAA data, *Remote Sens. Environ.* 75, 256–266.

Solberg S., Eklundh L., Gjertsen A.K., Johansson T., Joyce S., Lange H., Naesset E., Olsson H., Pang Y., Solberg A. (2007). Testing remote sensing techniques for monitoring large scale insect defoliation, In Proceedings of the ForestSat'07 International Conference: spatial operational tools for forestry, Montpellier (France), 5 p.

Song W., & Zhang Y. (2015). Expansion of agricultural oasis in the Heihe River Basin of China: Patterns, reasons and policy implications. *Phys. Chem. Earth.* 89-90, 46-55. [doi:10.1016/j.pce.2015.08.006]

Song W., Mu X., Ruan G., Gao Z., Li L., & Yan G. (2017). Estimating fractional vegetation cover and the vegetation index of bare soil and highly dense vegetation with a physically based method. *Int. J. Appli. Earth obs. Geoinf, 58,* 168-176.

187

Sraïri MT. (2011). Le développement de l'élevage au Maroc : succès relatifs et dépendance alimentaire. Courrier de l'Environnement de l'INRA 60: 91–101.

Sraïri MT., Azahra M'ghar F., Benidir M., & Bengoumi M. (2017). Analyse typologique de la diversité et des performances de l'élevage oasien. *Cah. Agric*. 26: 15005.

Sui H., Zhou Q., Gong J., & Ma G. (2008).Processing of MultiTemporal Data and Change Detection", In Z. Li, J. Chen and E. Baltsavias (Eds.) "Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences". *ISPRS Congress Book*, 227-247, Publisher: Taylor & Francis Group, London.

Sukopp H. (2004). Human-caused impact on preserved vegetation. *Landscape and Urban planning*, 68 : 347-355.

Tarki. M., Dassi L., & Jedoui Y. (2012). Groundwater composition and recharge origin in the shallow aquifer of the Djerid oases. Southern Tunisia: implications of return flow. *Hydrological Sciences Journal*, *57* (*4*), 790–804.

Testa S., Soudani K., Boschetti L., & Borgogno Mondino E. (2018). MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phonological metrics in French deciduous forests. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation, 64*, 132-134.

Thiollay J.M. (1998). The role of traditional agroforests in the conservation of rain forest bird diversity in Sumatra. *Conservation Biology*, 9, 335–353.

Thomas I.L., Ching N.P., Benning V.M., & D'Aguanno J.A. (1987). A review of multichannel indices of class separability. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 3, 331–350.

Toutain G., Dollé V., & Ferry M. (1988). Situation des systèmes oasiens en régions chaudes. Options méditerranéennes. Série A. Séminaires Méditerranées, ISSN 0253-1542, n°11, pp 7-8.

Toutain G. (1990). (ed.). Les systèmes agricoles oasiens. Montpellier : CIHEAM, 1990, p. 21 -27 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéen s; n.11

Tucker C.J (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. Remote Sensing of Environment, vol. 8, no. 2, pages 127–150, 1979.

Tucker C.J., & Sellers P.J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *Int J Remote Sens, 7,* 1395-1417.

Tucker C.J., Newcomb W.W., Los S.O., & Prince S.D. (1991). Mean and inter-annual variation of growing season normalized difference vegetation index for the Sahel 1981–1989. *Int J Remote Sens, 12*, 1133–1135.

TUKEY, J. W. (1977). « Exploratory Data Analysis » - EDA, Reading, MA, (Addison-Wesley). Cet ouvrage serait en réécriture.

UNESCO (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture). (1972). Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional, 9 p.

Verbesselt J., Hyndman R., Newnham G., & Culvenor D. (2009). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sens Environ*, *114*, 106-115.

Viña A., Gitelson A.A., Nguy-Robertson A.L & Peng Y. (2011). Comparison of different vegetation indices for the remote assessment of green leaf area index of crops. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3468–3478,.

Vintrou E. (2012). Cartographie et caractérisation des systèmes agricoles au Mali par télédétection à moyenne résolution spatial, 205 p.

Viovy. N., Arino O., & Belward A., (1992). The Best Index Slope Extraction (BISE): A method for reducing noise in NDVI time-series. *Int. J. Remote Sens.*, *13* (8), 1585-1590.

Walthall G.L., Norman J.M., Welles J.M., Campbell G., & Blad B.L. (1985). Simple equation to approximate the bi-directional reflectance from vegetative canopies and bare soil surfaces. *APPL OPTICS*, *24*, 383-387.

Wang W.J., Zhao Z.M & Zhu H.Q (2009). Object-Oriented Multi-feature Fusion Change Detection Method for High Resolution Remote Sensing Image. In 17th International Conference on GeoInformatics, IEEE, DOI: 10.1109/GEOINFORMATICS.2009.5293463

Ward J. H. (1963). "Hierarchical grouping to optimize an objective function," J. Am. Stat. Assoc. 58, 236-244.

Waldhardt R. & Otte A. (2003). Indicators of plant species and community diversity in grasslands. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 98 : 339-351.

Wessels K.J., van den Berg H.M., van der Merwe J.P.A., Smith H.J., van Zyl A., & Twyman L. (2001). Mapping and monitoring the conservation status of the natural resources of Mpumalanga province by means of remote sensing and GIS technology. In. Pretoria (South Africa): ARC-Institute for Soil, Climate and Water.

White M.A., Thornton P.E., & Running S.W. (1997). A Continental Phenology Model for Monitoring Vegetation Responses to Interannual Climatic Variability. *Global Biogeochem Cycles*, *11*, 217-234.

Wu. W., Xiong. H., & Shekhar. S. (2013). *Clustering and Information Retrieval*. Springer Science & Business Media, University of Texas at Dallas, USA. 330 p.

Xie Y., Sha Z., & Yu M. (2008). Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*, *1*, 9–23.

Zammit O. (2008). Détection de zones brûlées après un feu de forêt à partir d'une seule image satellitaire SPOT 5 par techniques SVM. In (p. 147). Nice (France): Université de Nice-Sophia Antipolis.

Zewdie, W., Csaplovics, E., & Inostroza, L. (2017). Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. *Appl Geogr.* 79, 167-178.

Zhang X., Friedl M.A., & Schaaf C.B. (2009). Sensitivity of vegetation phenology detection to the temporal resolution of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, *30*(8):20612074.

Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., Reed B.C., & Huete A.R. (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote sensing of environment*, 84, 471-475.

Zhang Y., Zhu Z., Liu Z., Zeng Z., Ciais P., Huang M., Liu Y., & Piao S. (2016). Seasonal and interannual changes in vegetation activity of tropical forests in Southeast Asia. *Agric. For. Meterol, 224*, 1-10.

		Résolution	Bandes	Niveaux de	Mode du
Date de prise	Capteur	spatiale (m)	spectrales* (µm)	produit	capteur
2015-04-12 T09:04:56Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-04-17 T09:04:36Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-04-22 T09:04:18Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-04-27 T09:03:52Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-05-02 T09:03:26Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-05-07 T09:02:59Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-05-12 T09:02:31Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-05-17 T09:02:04Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-05-22 T09:01:32Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-05-27 T09:01:08Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-06-06 T09:00:19Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-06-11 T08:59:55Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-06-16 T08:59:29Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-06-21 T08:59:03Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-06-26 T08:58:37Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-07-01 T08:58:09Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-07-06 T08:57:42Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-07-11 T08:57:15Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-07-16 T08:56:47Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-07-21 T08:56:19Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-07-26 T08:55:51Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-07-31 T08:55:22Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-08-05 T08:54:54Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-08-10 T08:54:28Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-08-15 T08:54:03Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-08-20 T08:53:37Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-08-25 T08:53:11Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-08-30 T08:52:45Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-09-04 T08:52:18Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-09-09 T08:51:51Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS
2015-09-14 T08:51:24Z	SPOT5 HRG2	10	V, R, PIR, MIR	Level2A	XS

Annexe 1 : Liste des images SPOT5 (Take5)

*V= Vert, R= Rouge, PIR= Proche InfraRouge et MIR= Moyen InfraRouge

12 avril 2015	17 avril 2015	27 avril 2015	
		No the second se	
2 mai 2015	7 mai 2015	12 mai 2015	
No the second se		- A PAR	
22 mai 2015	6 juin 2015	16 juin 2015	
		in the second se	

Annexe 2 : Les images SPOT5 (Take5) utilisées dans ce travail

Réalisation : C. Ben Khalfallah, Juin 2018 ; source : <u>spot-take5.org</u>



Annexe 2 : Les images SPOT5 (Take5) utilisées dans ce travail (suite)

Réalisation : C. Ben Khalfallah, Juin 2018 ; source : spot-take5.org

5 aout 2015	10 aout 2015	15 aout 2015	
20 aout 2015	25 aout 2015	30 aout 2015	
9 septembre 2015	14 septembre 2015		

Annexe 2 : Les images SPOT5 (Take5) utilisées dans ce travail (suite et fin)

Réalisation : C. Ben Khalfallah, Juin 2018 ; source : <u>spot-take5.org</u>



Annexe 3 : Les séries temporelles de boîtes à moustaches illustrant les variations

Annexe 3 : Les séries temporelles de boîtes à moustaches illustrant les variations saisonnières de NDVI des 38 périmètres irrigués (suite)

Variation temporelle de NDVI pour le ppi de Dhraa Sud

Variation temporelle de NDVI pour le ppi de El Faraj


Annexe 3 : Les séries temporelles de boîtes à moustaches illustrant les variations saisonnières de NDVI des 38 périmètres irrigués (suite)

Variation temporelle de NDVI pour le ppi de Ghedira

Variation temporelle de NDVI pour le ppi de Habib



Annexe 3 : Les séries temporelles de boîtes à moustaches illustrant les variations saisonnières de NDVI des 38 périmètres irrigués (suite et fin)

Variation temporelle de NDVI pour le ppi de Oued el Kebir Variation temporelle de NDVI pour le ppi de Oued el koucha (Dega



Annexe 4 : Fiche de terrain élaboré pour la caractérisation du milieu et des états de

surfaces

Enquête de terrain Code site :

Heure :	
Observateurs :	
<u>Localisation</u>	
Code site :	Nom Lieu :
CGPS : • Latitude : • Longitude : • Altitude :	Origine : carte 🗆 / GPS 🗆 Datum :
Situation Centrale [] Périphérique []	
Périmètre Nom : Age :	
Superficie : Type de culture : 1 étage []	2 étages [] 3 étages []

Annexe 4 : Fiche de terrain élaboré pour la caractérisation du milieu et des états de surfaces (suite et fin)

<u>Irrigation</u>	
Type :	
Fréquence :	
Profondeur :	
Salinité de l'eau :	
Etat de surface du sol	
très humide \square / humide \square /peu humide \square /sec \square	
-Sables éoliens (%)présence [], absence[]	
-Sol nu (%)Couleur : Clair /Jaune/ Brun /Foncé / Non det.	
-Pellicule de battance (%)présence [], absence [].	
-Litière (%)présence [], absence []	
-Croûte (%)présence [], absence []	
Nature de la croute	
-Efflorescence saline (%)présence [], absence[]	
N° Photographies (au sol, vers le haut, générale, cultures, irrigation)	
Renouvellement des pieds de palmiers : tous les 30ans, 40ans, 50ans?	
Période de taille des feuilles (une fois par an, plusieurs fois, quand exactement) :	
Période de production des feuilles (une seule période dans l'année, plusieurs, tous le	
temps ?)	
Combien de feuilles produites par an par pied ?	
Combien de temps met une feuille qui vient de pousser pour se retrouver sous (en bas de) la	
couronne, sèche et devoir être coupée ?	
Une feuille qui vient de pousser garde toujours la même couleur, ou change de couleur (vert	
clair -> vert foncé) ?	
Quand le palmier consomme le plus d'eau, quand a-t-il besoin du plus d'eau ?	
Commentaires	

Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-NDVI sur la période 2000-2015





Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-NDVI sur la période 2000-2015 (suite)





Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-NDVI sur la période 2000-2015 (suite)





Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-NDVI sur la période 2000-2015 (suite)





Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-NDVI sur la période 2000-2015 (suite)





Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-NDVI sur la période 2000-2015 (suite)





Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-NDVI sur la période 2000-2015 (suite)





Annexe 5 : Cartes des anomalies régionales calculées à partir des données MOD13Q1-NDVI sur la période 2000-2015 (suite et fin)



In southern Tunisia, not all irrigated oasis-type perimeters have undergone the same development, we observed an evolution of the covered surfaces which more than doubled in the last half-century, while for other regions they have remained practically stable and in some cases, a decrease in these areas. These changes have affected environmental and economic systems. In this context, the evaluation of the state of oases and the development of a typology of oases systems is a key-issue for sustainable agriculture. To know the state of vegetation in these oases, monitoring systems for oasis ecosystems must be informed by data on cultivated areas. These data can be obtained in part by satellite observation systems with high and moderate spatial resolution and high temporal repetitiveness, offer a synoptic vision that makes them a particularly appropriate information source for the estimation of such data. The research work presented here focuses on the exploration of methods developed from two types of time series of Earth observation images: those produced by the SPOT5 experiment (Take5) and the MOD13Q1 product of the MODIS sensor, at 10m and 250m spatial resolution respectively. These methods and data were tested in the Djerid region with the final aim of setting up an oasis monitoring system based on the analysis of time signatures from Earth observation images made available very regularly over time.

Two change detection approaches based on NDVI time series have been followed. The first is based on temporal variations in vegetation activity over a short period from April to September 2015 through the SPOT5 time series (Take5): the comparison between oases was made at the scale of the irrigated perimeter (an oasis can be composed of several irrigated perimeters) using agglomerative hierarchical clustering (AHC) method.

The second uses a temporal decomposition technique to extract the trend from a multi-year time series at the scale of a geographical point (a 250mx250m pixel) across the MOD13Q1 time series (2000-2016).

Results obtained from the processing and analysis of optical time series have shown that it is possible to identify the main types of irrigated perimeters present in the Djerid region, and to retrospectively trace their recent development history. They also highlight the fact that SPOT5 (Take5) images, which prefigure those currently available with images produced by Sentinel2 satellites, significantly improve the spatio-temporal characterization of oases functioning through their 10m spatial resolution and 5-day temporal repetitiveness.

The results of this thesis highlight new possibilities for the combination of remote sensing, field data and statistical analysis, delivering nonstop information in time and space on the characterization of oases systems. Indeed, with a single sensor such as Sentinel2, coupled with the historical data of MOD13Q1, it is now possible to accurately characterize oases on a continuous basis.

Dans le sud tunisien, tous les périmètres irrigués de type oasis n'ont pas connu le même développement au cours de 50 dernières années. On observe ainsi depuis plusieurs décennies, une évolution des surfaces couvertes qui dans certaines régions ont plus que doublé, alors que pour d'autres elles sont restées pratiquement stables et dans certains cas, ont même connu une régression. Face aux enjeux que ces changements impliquent tant sur le plan environnemental qu'économique et social, l'élaboration d'une typologie des oasis ainsi que l'estimation de leur état sont d'une importance stratégique aux niveaux national, régional et international. Pour connaître l'état de la végétation dans ces oasis, des systèmes de surveillance de ces écosystèmes oasiens devraient être mis au point et renseignés régulièrement par des données prises sur ces surfaces cultivées. Ces données peuvent être obtenues en partie par les systèmes d'observations satellitaires à haute et à moyenne résolution spatiale, et forte répétitivité temporelle, qui par leur vision synoptique, constituent une source d'informations particulièrement adéquate. Le travail de recherche présenté ici porte sur l'exploration de méthodes développées à partir de deux types de séries temporelles d'images d'observation de la Terre : celles produites par l'expérience SPOT5 (Take5) et le produit MOD13Q1 du capteur MODIS, respectivement à 10m et 250 m de résolution spatiale, et avec des répétitivités de 5 et 26 jours. Ces méthodes et données ont été testées sur la région du Djérid dans le but final de mettre en place un système de surveillance des oasis basé sur l'analyse des signatures temporelles à partir d'images d'observations de la Terre prises très régulièrement dans le temps.

Deux démarches différentes d'analyse ont été menées pour chaque type de données, basées sur le traitement de séries temporelles d'un indice de végétation, le NDVI. La première repose sur les variations temporelles de l'activité végétale sur une courte période d'avril à septembre 2015 à travers la série d'images SPOT5 (Take5) : la comparaison entre oasis s'est faite à l'échelle du périmètre irrigué (une oasis peut être composée de plusieurs périmètres irrigués) en utilisant la méthode statistique de classification ascendante hiérarchique. La seconde utilise une technique de décomposition temporelle d'un signal pour extraire la tendance d'une série d'images pluriannuelles à l'échelle d'un point géographique (un pixel de 250mx250m) à travers la série temporelle MOD13Q1 de 2000 à 2016.

Les résultats obtenus à partir du traitement et de l'analyse de ces séries temporelles optiques ont permis de montrer qu'il est possible d'identifier les principaux types de périmètres irrigués présents dans la région de Djérid, et retrouver rétrospectivement l'histoire récente de leur développement. Ils mettent aussi en évidence le fait que les images SPOT5 (Take5), qui préfigurent celles actuellement disponibles avec les images produites par les satellites Sentinel2, améliorent considérablement la caractérisation spatio-temporelle du fonctionnement des oasis grâce à la finesse de leur résolution spatiale et de leur répétitivité temporelle.

Les résultats de cette thèse permettent de dégager de nouvelles pistes de couplage entre télédétection, données de terrain et analyses statistiques en apportant une information continue dans le temps et dans l'espace pour le suivi et la surveillance des écosystèmes oasiens. En effet avec deux capteurs tel que Sentinel2, couplé aux données historiques de MOD13Q1, il est permis désormais de caractériser précisément les oasis d'une façon presque continue.