

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ – BOUIRA
FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE ET DES SCIENCES DE LA TERRE
DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES



Réf :/UAMOB/F.SNV.ST/DEP.AGR/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOMEMASTER

Domaine : SNV Filière : Sciences Agronomiques
Spécialité : Protection des végétaux

Présenté par :

HABBAS Raouia Ferial & NACEF Rima

Thème

Télésurveillance des maladies fongiques du blé à l'aide des images satellitaires.

Soutenu le : 04 / 07 / 2022

Devant le jury composé de :

<i>Nom et Prénom</i>	<i>Grade</i>		
<i>Mme BOUBEKKA Nabila</i>	<i>MCA</i>	<i>FSNVST/Univ. de Bouira</i>	<i>Président</i>
<i>Mme MEBDOUA Samira</i>	<i>MCB</i>	<i>FSNVST/Univ. de Bouira</i>	<i>Examinateur</i>
<i>Mr LAMINE Salim</i>	<i>MCA</i>	<i>FSNVST/Univ. de Bouira</i>	<i>Promoteur</i>

Année Universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude tout d'abord à dieu de nous avoir donné courage, volonté, santé et force pour réaliser ce travail.

Nous remercions vivement M. LAMINE Salim d'avoir accepté de nous encadrer ainsi que pour tous ses conseils, son suivi et sa disponibilité.

Nos remerciements sont également adressés à Mme. BOUBEKKA qui a généreusement accepté de présider le jury de notre soutenance et à Mme. MEBDOUA d'avoir accepté l'examen de ce travail et sa mise en valeur.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants qui ont veillé à notre formation durant notre parcours universitaire.

Enfin, nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je Dédie ce modeste travail

Spécialement à ma très chère mère, et mon très cher père pour leurs sacrifices, leurs amours, leurs aides et leurs soutiens afin de me voir arriver à ce Que je suis devenu aujourd'hui.

*A ma très chère sœur « Meriem », et ses trois princesses « Nermine »
« Arwa » et « Layan ».*

*A mes frères « Mouhamed » et « Achraf » mes belles sœurs
« Chahinez » et « Imane » sans oublier ses petits garçons « Iyad »
« Mouaouia » et « Salman ».*

*A celle qui m'aider à accomplir ce travail, mon très chère amie
« KEBIR Amal ».*

*A mes amies proches « Fairouz » et « Houda » « Fatima »
« Soumia » « Maissa ».*

*A mon adorable tante « Fouzia » pour leur soutien morale.
A tous ma famille.*

*A toute mes collègues de ma promotion et à tous ceux que j'ai connus
durant mon cycle d'étude.*

A toutes les personnes qui m'aiment et que je n'ai pas pu citer.

Enfin, je remercie toute personne qui m'a aidé de près ou de loin.

NACEF Rima

Dédicace

*Tout d'abord, je tiens à remercier DIEU De m'avoir donné la force et le courage
de mener à bien ce modeste travail.*

A ma chère mère

A mon cher père

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard de me soutenir

Et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs

*A mes petites Jumelles **Sarah et Hadjer***

Je remercie toute ma famille

*Je remercie chaleureusement mes chers amis pour leur présence, leur soutien et
leurs encouragements*

Selma, Tina, Rachda, Zineb, Siham, Nounou ou

A mon cher binôme pour son entente et sa sympathie

A ma promo protection des végétaux

Et a tous les gens qui m'aiment

Habbas Raouia Ferial

LISTE DES TABLEAUX

Liste des tableaux

<u>Tableau (I.1) :</u>	Les autres maladies fongiques du blé	15
<u>Tableau (II.1)</u>	Caractéristiques de Sentinel-2	30
<u>Tableau (II.2) :</u>	Résumé d'indices de végétation définis à partir de données de télédétection	33
<u>Tableau (III.1) :</u>	Indices de végétation calculés.	45
<u>Tableau (III.2) :</u>	Résultats du prélèvement parcellaire (stades 3N–DFE) :	46
<u>Tableau (III.3)</u>	Coefficient de corrélation obtenue pour l'évaluation de la biomasse après régression linéaire avec les indices de végétation	48
<u>Tableau (III.4)</u>	Coefficient de corrélation obtenue pour l'évaluation de la teneur en azote après régression linéaire avec les indices de végétation	49
<u>Tableau (III.5)</u>	Coefficient de corrélation obtenue pour l'évaluation de la teneur en eau après régression linéaire avec les indices de végétation.	50

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Liste des figures

Figure (I.1)	La production nationale céréales	4
Figure (I.2)	Production des céréales à Bouira entre 2016 et 2021	5
Figure (I.3)	Morphologie de l'épi et de la fleur de blé	6
Figure (I.4)	Différents stades de développement du blé	8
Figure (I.5)	L'oïdium	9
Figure (I.6)	La rouille jaune	10
Figure (I.7)	La rouille jaune	11
Figure (I.8)	Les symptômes de la rouille noire	12
Figure (I.9)	Le cycle de développement des rouilles.	13
Figure (I.10)	La tache septorienne	14
Figure (II.1)	Satellite Landsat 1	19
Figure (II.2)	Satellite SPOT 1	20
Figure (II.3)	Principe de base de la Télédétection	22
Figure (II.4)	Processus de télédétection	22
Figure (II.5)	Principe de capture actif	24
Figure (II.6)	Principe de fonctionnement d'un capteur passif	24
Figure (II.7)	Réflectance de l'eau du sol et de la végétation dans différentes longueursd_ onde	25
Figure (II.8)	Illustration du spectre de réflectance typique d'une feuille saine entre 0,4 et 2,4 μm . Les gammes du visible, du NIR et de l'infrarouge à ondes courtes sont renseignées ainsi que les attributs de la feuille qui influencent la réponse spectrale dans ces gammes	28
Figure (II.9)	Répartition spectrale des réflectances dans le rouge et l'infrarouge	31

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Liste des abréviations

Abréviation	Signification
ARVI	Indice de végétation résistant à l'atmosphère (en anglais atmospherically Resistant Vegetation Index)
CCT	Centre canadien de télédétection
DSA	Direction des services Agricole
DSA B	Direction des services Agricole de la wilaya de Bouira.
DSA OEB	Direction des services Agricole de la wilaya d'Oum El Bouaghi.
DVI	Indice Différence Végétation (en anglais Différence Végétation Index)
EVI	Indice de végétation amélioré (en anglais Enhanced Vegetation Index)
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (en anglais the Food and Agriculture Organization)
GEM1	Indice mondial de surveillance de l'environnement (en anglais Global Environmental Monitoring Index)
IB	Indice de Brillance (en anglais Index Brightness)
LAI	Indice de surface foliaire (en anglais Leaf Area Index)
MTCI	MERIS Indice de chlorophylle terrestre (en anglais MERIS Terrestrial chlorophyll index)
MSI	Indice de stress hydrique (en anglais Moisture Stress Index)
MSR	Rapport simple modifié (en anglais Modified Simple Ratio)
MSAVI	Indice de végétation ajusté au sol modifié (en anglais Modified Soil Adjusted Vegetation Index)
MTVI1	Modified Triangular Vegetation Index 1
MTVI2	Modified Triangular Vegetation Index 2
NASA	Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique
NDRE	Différence normalisée NIR/Rededge Différence normalisée Red-Edge (en anglais <u>Normalized Difference NIR/Rededge Normalized Difference Red-Edge</u>)
NIR	Proche infrarouge (en anglais Near Infra –Red)

LISTE DES ABRÉVIATIONS

NDVI	Indice de végétation par différence normalisée (en anglais Normalized Difference vegetation Index)
NDIWI	Indice d'Eau Différentiel Normalisé (en anglais Normalized Difference Water Index)
NGRD	Indice de différence vert-rouge normalisé (en anglais normalized green-red difference index)
NGRDI	Différence normalisée vert/rouge Indice de différence vert-rouge normalisé, Indices de résistance à l'atmosphère visible Vert (VIgreen) (en anglais <u>Normalized Difference Green/Red Normalized green red difference index, Visible Atmospherically Resistant Indices Green (VIgreen)</u>)
OSAVI	Indice de végétation ajusté au sol optimisé (en anglais Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index)
PCR	Réaction en chaîne par polymérase (en anglais Polymerase Chain Reaction)
PPN	La production primaire nette
PIR	Proche Infra-rouge (en anglais Near Infrared)
PVI	Indice de végétation perpendiculaire (en anglais Perpendicular Vegetation Index)
RVI	L'indice de végétation par quotient (en anglais Ratio-Vegetation-Index)
RVSI	Red-edge Vegetation Stress Index
RDVI	Indice de végétation par différence renormalisé (En anglais Renormalized Difference Vegetation Index)
SR	Rapport simple (en anglais Simple Ratio)
SACRI	Indice de résidus de maïs ajusté au sol (en anglais Soil Adjusted Corn Residue Index)
SAVI	Indice de végétation ajusté au sol (en anglais Soil Adjusted Vegetation Index)
SEG	Supplementum Epigraphicum Graecum (Leiden 1923→)
SIG	Système d'information géographique
SRI	Indice de rapport simple (en anglais Simple Ratio Index)
TCARI	Absorption de chlorophylle transformée en réflectance (en anglais Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance,)
TDVI	Température Végétation Indice de sécheresse (en anglais Temperature

LISTE DES ABRÉVIATIONS

	Vegetation Dryness Index)
TVI	Indice de végétation transformé (en anglais transformed vegetation index)
TSAVI	Indice de végétation ajusté au sol transformé (en anglais Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index)
UAMOB	Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira
USA	Les États-Unis d'Amérique
USGS	Service géologique des États-Unis

Table des Matières

Remerciements

Dédicaces

Résumé FR, ENG et AR

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Table des matières

Introduction Générale	1
CHAPITRE I : diagnostic des maladies fongiques du blé	
I.1. Généralités sur le blé	3
I.1.1 Origine et historique	3
I.1.2 Importance du blé.	3
I.1.2.1. Dans le monde	3
I.1.2.2. En Algérie	3
I.1.2.3. A Bouira	4
I.1.3. Elément botanique.	5
I.1.3.1. Position systématique	5
I.1.3.2. Caractères botanique	5
I.1.3.3. Morphologie du blé	5
I.1.4. Physiologie et cycle de vie du blé	6
I.1.4.1. Période végétative	6
I.1.4.2. Période de reproduction	7
I.1.4.3. Période de Maturation	7
I.2. Les maladies fongiques du blé	8
I.2.1. Généralités sur les maladies fongiques du blé.	8
I.2.2. Les principes maladies fongiques du blé	8
I.2.2.1. Oïdium	8
I.2.2.1.1. Agent pathogène	8
I.2.2.1.2. Symptômes	8
I.2.2.1.3. Cycle de développement	9

TABLE DES MATIERES

I.2.2.2. La Rouille	9
I .2.2.2.1. La rouille jaune	9
I .2.2.2.2. Rouille brune	10
I .2.2.2.3. La rouille noire	11
I.2.2.2.4. Cycle de développement des Rouilles	12
I.2.2.3. La Septeriose	13
I.2.2.3.1. Agent pathogène	13
I.2.2.3.2. Symptômes	14
I.2.2.3.3. Cycle de développement de la Septoriose	14
I.2.3. Autres maladies fongiques	14
I.2.4. Méthodes de lutte contre les maladies fongiques	16
I.2.4.1. Lutte biologique	17
I.2.4.2. Lutte chimique	17
I.2.4.3. Lutte culturale	18
I.2.4.4. Lutte génétique	18

CHAPITRE II : Télédétection et télésurveillance des maladies du blé

II.1. La télédétection	19
II.1.1. Définitions	19
II.1.2. Histoire de la télédétection	19
II.1.3. Domaine d'application de la télédétection	20
II.1.4. Les principes de base de la télédétection.	21
II.1.4.1. La cible	21
II.1.4.2. Source d'énergie	21
II.1.4.3. Le vecteur	21
II.1.5 Les étapes du processus de télédétection	22
II.1.6. Détection passive et active	23
II.1.6.1 Capture actif	23
II.1.6.2. Capture passif	24
II.2. Utilisation des images satellitaire dans diagnostic des maladies	24
II.2.1 Pourquoi la télédétection ?	24
II.2.2 Surveillance des cultures	25

TABLE DES MATIERES

II.2.3 Les propriétés optiques du couvert végétal	26
II.2.4. Les images satellitaires	29
II.2.4.1. Les satellites sentinal2	29
II.2.4.2. Les satellites Landsat8	30
II.2.5. Les indices spectraux	30
II.2.5.1. Principe	31
II.2.6. Les principaux indices de végétation pour l'agriculture	32
II.2.6.1. L'indice de végétation par différence normalisée « NDVI » (normalized Difference Vegetation Index)	32
II.2.6.2. Les autres indices	33
 CHAPITRE III : Synthèse et évaluation des méthodes de télédétection pour la surveillance des maladies fongiques du blé	
III.1. Les indices spectraux utilisés dans l'étude de la végétation	35
III.1.1. Les indices simples	35
III.1.2. Les indice de stress hydrique	36
III.1.3. Les indices prenant en compte l'influence des sols	37
III.1.4. Les indices prenant en compte les effets de l'atmosphère	38
III.1.5. Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère	38
III.1.6. Les indices prenant en compte la température de surface	39
III.2. Variables biophysiques	39
III.2.1. Leaf Area Index (LAI)	40
III.2.2. Biomasse	42
III.2.3. Taux de couverture	43
III.3. Relations entre les indices spectraux et la végétation	45
III.3.1. Exemples de relations entre indices et caractéristiques des céréales à paille	46
III.3.1.1. Evaluation de la biomasse	47
III.3.3. Evaluation de la teneur en eau	47
 Conclusion Générale	 51
Références bibliographiques	

INTRODUCTION

La céréaliculture est considérée comme l'une des premières découvertes ayant exercé une influence majeure sur l'avenir des sociétés humaines (**Boutemeur et Oukaci, 2019**). Dont le blé est la principale production céréalière, la plus cultivée et la plus consommée dans le monde (**Aat Kaki, 2008**).

Selon la **FAO**, la production mondiale du blé en 2019 se maintient à 2,72 milliards de tonnes, Cependant que, les prévisions relatives à l'utilisation mondiale de céréales en 2019-2020 ont été diminuées de 24,7 millions de tonnes, en raison des conséquences de la pandémie de COVID-19 (**Haddad et Bencherif, 2020**).

L'intensification de la culture des céréales, dont le blé, est soumise à plusieurs contraintes pédo-climatiques (sol, température, pluviométrie, etc.) et également aux différentes attaques d'ennemis naturels qui peuvent causer des pertes importantes lorsque les variétés sont sensibles et que les conditions environnementales sont favorables à l'expansion des maladies. (**Ezzahiri, 2001**). Les dégâts causés par les maladies et les ravageurs sont nombreux et affectent la quantité et la qualité de la récolte. (**Dubois et Flodrops, 1987**).

Environ 80 % des maladies des cultures, notamment des céréales, sont causées par des champignons microscopiques, qui détruisent chaque année près d'un quart des récoltes mondiales, (**Laffont, 1985**).

Dans le domaine agricole et la surveillance des cultures, les satellites représentent un outil précieux, car la collection d'informations est rapide et fiable sur l'état des cultures.

La télédétection consiste à obtenir des informations sur un objet sans contact physique avec celui-ci en mesurant l'énergie électromagnétique réfléchie ou transmise par cet objet (**De Jong et Van Meer, 2007**).

Les techniques de télédétection sont non-destructives. Les contributions de la télédétection à l'agriculture sont très variées. Historiquement, les photographies aériennes ont été le premier support de télédétection utilisé en agriculture. Elles sont depuis longtemps utilisées pour cartographier les cultures et produire des plans de ferme, qui sont utiles pour évaluer la

INTRODUCTION

superficie et le potentiel de rendement à des fins d'assurance (**Régie des Assurances agricoles du Québec, 1997**).

La signature spectrale des végétaux étant fonction de leur état de santé, la spectrométrie offre le potentiel de détecter la présence de maladies fongiques en champ de céréaliculture.

Les indices de végétation permettent de relier des valeurs de réflectance à des caractéristiques physicochimiques des plantes. Dans le cas de la détection des colorations anormales des plantes, les indices de végétation utilisés servent à estimer la biomasse foliaire, la teneur en chlorophylles.... En distinguant ceux calculés à partir de données multispectrales et hyperspectrales. La plupart des indices de végétation sont obtenus par des combinaisons arithmétiques de bandes spectrales dans le visible et le proche-infrarouge (**Albetis De La Cruz, 2018**).

Le but global de notre travail c'est de montrer l'utilité et l'importance de la télédétection pour la surveillance des cultures et la détection des maladies, pour obtenir des informations sur plusieurs parcelles en peu de temps. C'est la différence de signature spectrale entre la végétation saine et la végétation malade.

Pour réaliser cette étude, nous allons adopter la méthodologie suivante :

- Dans le premier chapitre nous allons donner une généralité sur le blé et une synthèse bibliographique sur les maladies fongiques.
- Le deuxième chapitre porte sur la présentation relative à la télédétection et télésurveillance des maladies du blé.
- Le troisième chapitre est une Synthèse et évaluation des méthodes de télédétection utilisées pour la surveillance des maladies fongiques du blé.
- Notre étude s'achèvera par une conclusion générale

Chapitre I

*Synthèse bibliographique sur les maladies
fongique du blé*

I.1. Généralités sur le blé

I.1.1. Origine et histoire

La domestication du blé, liée à la naissance de l'agriculture, est survenue au proche orient, dans la région du croissant fertile, il y a presque 10 000 ans (**Naville, 2005**).

Selon **Cook et al., (1991)** ; le centre d'origine géographique du blé semble être l'ouest de l'Iran, l'est de l'Irak, et le sud et l'est de la Turquie. Toutes les espèces de blé spontanées et cultivées appartiennent au genre *Triticum* et sont réparties sur une vaste zone qui s'étale de l'Asie centrale aux régions du bassin méditerranéen (**Verville, 2003**) et (**Anonyme 2020**).

I.1.2. L'importance de blé

D'après **Feillet, (2000)** et **Branlard et al., (2001)**, Le blé est l'une des principales ressources alimentaires de l'humanité. La production de blé est devenue un enjeu important pour nourrir l'humanité.

I.1.2.1. Dans le monde

Les céréales, le blé en particulier occupe une place importante dans la production agricole et constitue la base de nourriture pour 35% de la production mondiale (**Hamel, 2010**).

Le blé arrive juste derrière le riz et le maïs si l'on considère les tonnages produits (**Jacquemin, 2012**). En Méditerranée, la France est le premier producteur de blé. En 1996, elle a produit 36 millions de tonnes. Elle a également enregistré les rendements les plus élevés, avec 7 tonnes/ha ; Des améliorations de rendements ont été obtenues un peu partout en Méditerranée et en Arabie Saoudite. (**Jacquemin, 2012**).

I.1.2.2. En Algérie

En Algérie, le blé (dur et tendre) a occupé près de 2 millions d'hectares et a produit près de 2,400 000(t). Sur le plan économique, les dérivés du blé (semoule et farine) et leurs produits (pâtes, pain) sont la base de l'alimentation de l'Algérien et la principale source en énergie et en protéines végétales.

Les quantités produites en 2019 ont permis de porter les quantités collectées par les coopératives céréalières du Bureau algérien des céréales à 2,714(t) en 2019, contre 2,766(t)

CHAPITRE I

cumulés en 2018. Les quantités de blé dur collectées ont atteint 2000 000(t) et 3 millions de quintaux de blé tendre par an 2019. (DSA OEB, 2021).

La production totale du blé dur dans l'année (2020-2021) est 25685135,2 Qx (48%) et blé tendre est 15421853,5 Qx (28%) et la production totale d'orge 12841602,17 Qx (24%) (Figure I.1) Les céréales sont cultivées dans les 46 wilayas. (DSA OEB, 2021).

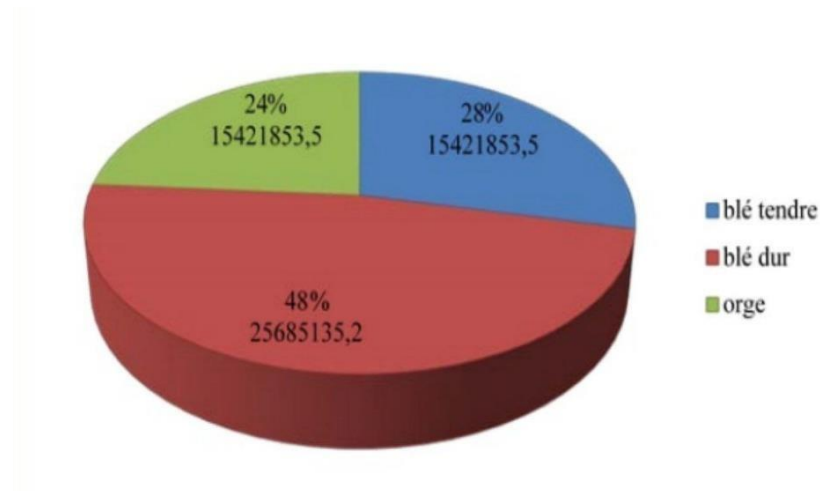


Figure I.1 : La production nationale céréales (DSA OEB 2021)

I.1.2.3. A Bouira

La céréaliculture dans la wilaya de Bouira occupe annuellement une superficie importante d'environ 40 000 ha pour le blé dur, 13 000 ha pour le blé tendre et variant de 23 000 à 26 000 ha pour la culture de l'orge. La production totale des céréales avoisine annuellement 1 500 000 Qx avec un rendement supérieur à 22 Qx /ha ce qui relativement élevé par rapport au rendement moyen national (16.5 Qx / ha) . Pour l'année 2016, et selon la statistique de la DSA de Bouira, La production des céréales était de 1833109 Qx (DSA B 2022)

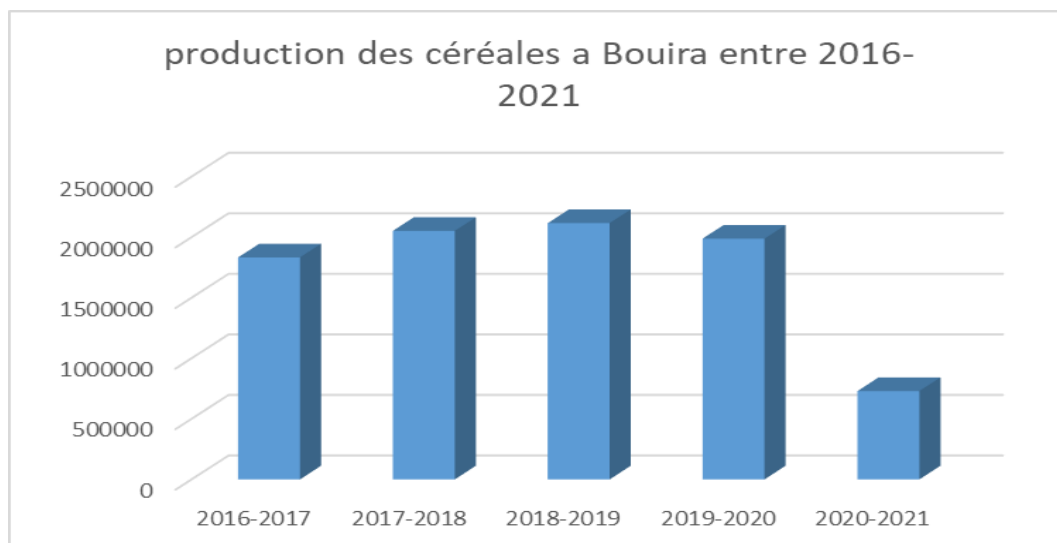


Figure I.2 : Production des céréales à Bouira entre 2016 et 2021 (DSAB 2022)

I.1.3. Éliment botanique

I.1.3.1. Position systématique

Le blé est une monocotylédone de la famille des *Poaceae* appartenant au genre *Triticum*. Cette plante annuelle produit un fruit sec indéhiscant, le caryopse. Le blé tendre *Triticum aestivum* et le blé dur *Triticum durum* sont les deux espèces les plus cultivées dans le monde (Debiton, 2010).

I.1.3.2. Caractères botaniques

Le blé est caractérisé par des critères morphologiques particuliers (chaume – épillet) ; En Algérie, deux espèces sont essentiellement cultivées. Le blé dur *Triticum turgidum* var. *Durum* possédant $4n=28$ chromosomes, dont l'aire d'extension est surtout constituée de zones arides et semi-arides, Le blé tendre *Triticum aestivum* var. *aestivum* possédant $2n = 42$ chromosomes dont l'adaptation agro technique est très large (Fritas, 2012).

I.1.3.3. Morphologie du blé

L'appareil reproducteur des graminées est également spécifique. Il est constitué par des fleurs nombreuses, petites et peu visibles qui ont, au lieu de pétales, des enveloppes membranaires non colorées. Elles sont regroupées en épis situés à l'extrémité des chaumes.

Après la fécondation, l'ovaire de ces fleurs se transforme en une semence ou

"grain" qui a la particularité d'être à la fois un fruit et une graine. Ils se sont soudés l'un à l'autre au cours du développement. On appelle ce grain particulier un caryopse (**Figure 03**) (**Mosiniak et al., 2006**).

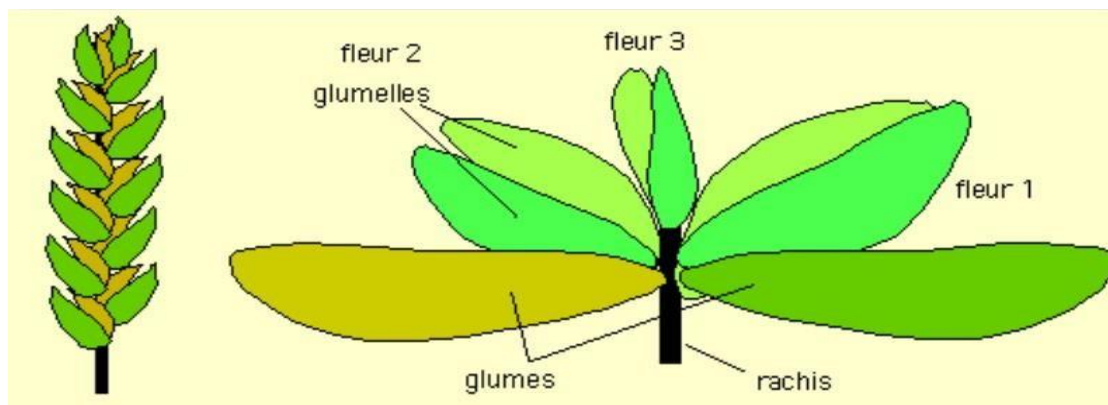


Figure I.3 : Morphologie de l'épi et de la fleur de blé (**Mosiniak et al., 2006**).

I.1.4. Physiologie et cycle de vie du blé

Le cycle de développement du blé comporte trois phases ; la période végétative, la période reproductrice et la période de maturation (**Anonyme, 1981**).

I.1.4.1. Période végétative

Cette période comprend les phases suivantes

- a) **Phase germination** : Elle s'étend du semis au stade A c'est la phase première de la vie d'une plante qui assure la naissance d'une jeune plantule au dépend de la graine. Elle passe par la phase de l'imbibition de la graine, libération des enzymes et dégradation des réserves assimilables par la graine, ensuite la phase de croissance caractérisée par l'allongement de la radicule (**Gyot, 1978 ; Vertucci, 1989**).
- b) **Phase semis-levée** : C'est la phase de germination et de début de la croissance (**Anonyme, 1981**).
- c) **Phase Levée-début du tallage** : Elle est caractérisée par les apparitions successives à l'extrémité de la coléoptile et la première feuille fonctionnelle, puis de la deuxième, troisième feuille etc. imbriquée les unes dans les autres, partant toutes d'une zone proche de la surface du sol (plateau du tallage) et reliées à la semence par le rhizome. Cette phase devient critique en cas d'attaque d'insectes ou de champignons telles que les fusarioses (**Gyot, 1978 ; Vertucci, 1989**).

I.1.4.2. Période de reproduction

Cette période comprend deux phases :

- a) **Phase tallage herbacé – gonflement** : Elle comprend : l'initiation florale, la différenciation de l'ébauche de l'épi, la différenciation des ébauches des glumes, la montaison ou élongation, la méiose ou réduction chromosomique et le gonflement.
- b) **Phase épiaison– floraison** : Cette phase correspond à l'épiaison (apparition des épis à l'extérieur), puis à la fécondation (ouverture des sacs polliniques), à la germination du pollen et à la fécondation de l'ovule. Cependant, la floraison consiste en l'éclatement des anthères qui libèrent le pollen ; les filets qui les portent s'allongent, cette opération entraîne à travers les glumelles entrouvertes, les sacs polliniques desséchés, à l'extérieur flotte alors tout autour de l'épi comme de petites fleurs blanches c'est l'ensemble de ces petites fleurs qui fait dire que « l'épi est fleuri » (Gyot, 1978 ; Vertucci, 1989).

I.1.4.3. Période de Maturation

Elle s'étend de la fécondation au stade de maturité du grain et se subdivise en deux phases :

a- Phase pâteuse : Elle est appelée aussi phase du palier hydrique, où la graine accumule très fortement l'amidon dans son albumen, tout excès d'évaporation (ou tout déficit d'alimentation en eau) a pour effet de ralentir les synthèses et la migration des réserves nécessaires à la formation du grain, ce qui se traduit par la formation de grains ridés de poids inférieur à la normale (phénomène d'échaudage).

b- Phase de dessiccation : elle correspond à la perte progressive de l'humidité du grain (maturité au champ 20 à 15% d'humidité) (Gyot, 1978 ; Vertucci, 1989).

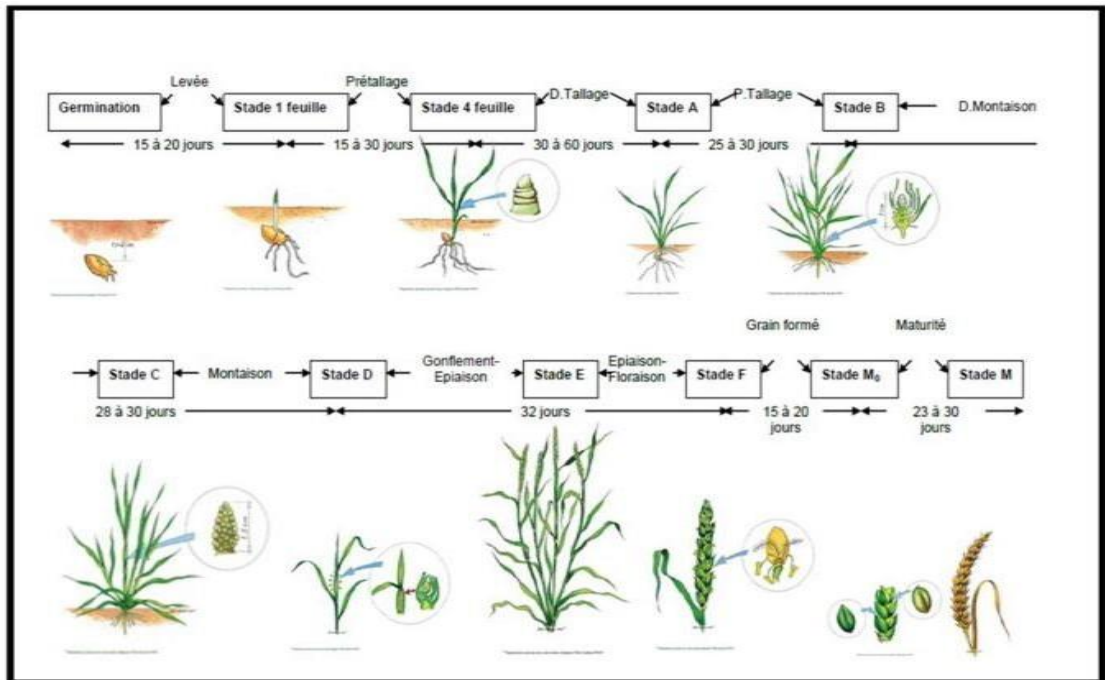


Figure I.4 : différents stades de développement du blé (Fritas, 2012)

I.2. Les maladies fongiques du blé

I.2.1. Généralités sur les maladies du blé

Le concept de maladie se rapporte aux anomalies observées par rapport au phénotype attendu. (Lepoivre, 2003).

Lorsqu'un agent pathogène entre en contact avec une plante dans des conditions d'environnement favorables à l'infection débute, le dialogue moléculaire entre l'hôte et le parasite commence, dont l'issue va définir le type de relation (sensibilité ou résistance) qui s'établira entre les deux protagonistes (Lepoivre, 2003) et (Anonyme, 2015).

I.2.2. Les principales maladies fongiques du blé

I.2.2.1. Oïdium

I.2.2.1.1. Agent pathogène

L'Oïdium causé par l'agent pathogène *Erysiphe graminis f.sp.tritici*, peut attaquer le blé sur toute la durée de la culture, sur les feuilles et sur les épis. Il est principalement présent sur les variétés sensibles (Masson, 2012).

I.2.2.1.2. Symptômes

Ils se manifestent sur les feuilles, tiges et les épis. Les premiers symptômes apparaissent sous forme d'un duvet blanchâtre ou gris pale sur limbes des feuilles basales, puis ils se développent sur les feuilles des étages supérieurs (Aouali et Douici-Khalfi, 2009).



Figure I.5 : L'oïdium (Syngenta, 2015).

I.2.2.1.3. Cycle de développement

L'oïdium infecte la plante hôte par des conidies ; Après avoir été transportées par l'air, les conidies se déposent sur l'organe de la plante hôte, germent et développent un mycélium superficiel. En même temps, un court hyphe fin se développe directement dans les cellules de l'épiderme et forme une haustorie avec laquelle le champignon absorbe les substances nutritives.

A partir du mycélium, les conidiophores se développent et libèrent de nouvelles conidies capables d'induire de nouvelles infections, Par la suite,, la reproduction sexuée du champignon aboutit à la production des cléistothèces contenant des ascospores à l'intérieur des asques l'induction de l'infection primaire au cours de la saison de végétation suivante est due au développement du mycélium en conservation ou à la germination des ascospores libérées à partir des asques qui sont déchargés à partir des cléistothèces (Nasraoui, 2006).

I.2.2.2. La rouille

Trois espèces de rouilles s'attaquent au blé : la rouille brune, la rouille noire et la rouille jaune. Ces trois rouilles s'attaquent aussi bien au blé tendre qu'au blé dur.

En ce qui concernant leur importance relative, la rouille brune est la plus répandue dans sa distribution, tandis que la rouille noire est la plus dévastatrice lorsqu'elle se développe.

La rouille jaune est limitée au climat tempéré froid et aux zones d'altitude (Ezzahiri, 2001).

I.2.2.2.1. La rouille jaune

- **Agent pathogène :** La Rouille jaune est causée par l'agent pathogène *Puccinia striiformis f.sp.*

Tritici. Sur blé (Amrani, 2013).

- **Symptômes :** Les pustules sont sous forme globuleuse de couleur jaune ou orange, disposées en stries le long des nervures des feuilles d'où le nom de l'espèce. Elles peuvent aussi se développer sur la face inférieure des feuilles et aussi sur les épis et les grains (Aouali et DouiciKhalfi, 2009)



Figure I.6 : La rouille jaune (Safer et Rahmani, 2015).

I.2.2.2.2. Rouille brune

- **Agent pathogène :** la rouille brune c'est une maladie qui apparaît généralement pendant et après l'épiaison (avril-mai), causée par l'agent pathogène : *Puccinia recondita f.sp. Tritici* sur le blé (Amrani, 2013).
- **Symptômes :** selon Jlibene, 2011 On la reconnaît par l'apparition de pustules de

couleur café, disposées de façon aléatoire sur la feuille et qui libèrent des spores sous formes de poudre brune salissante.



Figure I.7 : Symptômes de la rouille brune (Safer et Rahmani, 2015).

I .2.2.2.3. La rouille noire

- **Agent pathogène :** Elle est causée par *Puccinia graminis* qui attaque l'épi et vinette (*Berberis vulgaris*) comme hôte secondaire et le blé et d'autres céréales comme hôte principal (Nasraoui, 2006).
- **Symptômes :** C'est la rouille qui apparaît le plus tardivement, généralement au stade grain laiteux-pâteux. Elle se développe sur les feuilles, les tiges et même sur les épis formant des pustules allongées de couleur rouge brique à brune foncée (Benathmane, 2005).



Figure I. 8 : Les symptômes de la rouille noire (Zahri et al., 2014).

I.2.2.2.4. Cycle de développement des Rouilles

Le développement des épidémies des Rouilles est tributaire de la nature et de la qualité de l'inoculum primaire, de la sensibilité de la variété cultivée, et du stade de développement du blé au moment de l'infection primaire et des conditions climatiques (Aouali et Douici-Khalfi, 2013).

Des températures comprises entre 10 et 15°C et un taux d'humidité relative proche de 100% sont les conditions optimales pour la germination des spores, la pénétration des tubes germinatifs dans la plante hôte et la production de nouvelles spores qui sont ensuite disséminées par le vent. Le vent permet de disperser les spores sur de courtes et longues distances. La Rouille jaune présente une très forte capacité de sporulation.

Les cycles des Rouilles sont complexes et impliquent souvent un hôte principal et un hôte alternatif. Seule la Rouille jaune n'a pas d'hôte alternatif. Le champignon passe l'hiver sous forme d'urédospores sur les repousses de céréales ou les cultures à semis automnal précoce ou de mycélium en dormance. Sous cette dernière forme, moins exposée aux conditions hivernales hostiles, le champignon peut survivre à des températures très basses (jusqu'à -10°C). Au printemps, lorsque le climat devient frais et humide, le champignon reprend son développement pour initier les contaminations secondaires via la production de nouvelles urédospores. Ces urédospores présentent la caractéristique d'être

regroupées en amas appelés « unités de dissémination ». Il existe deux sources d'inoculum primaire : endogène et exogène.

L'inoculum endogène provient d'une source de conservation locale (hôte alternatif ou repousses de blé). Les infections qui en résultent apparaissent précocement au stade tallage, et constituent ensuite des foyers d'infection caractérisés par la présence de pustules sur les feuilles basales, l'inoculum exogène, provient d'autres parcelles infestées et dont les spores sont transportées par le vent à travers de longues distances (**figure I.9**).

Les pustules de cet inoculum apparaissent sur les feuilles supérieures. Dans ce cas la maladie ne peut être menaçante que lorsque les périodes humides sont fréquentes en mars-avril.

Le cycle complet de la maladie, de l'infection à la production de nouvelles spores, peut être achevé en sept jours dans des conditions idéales et se répéter de nombreuses fois au cours une saison (**Aouali et Douici-Khalfi, 2013**).

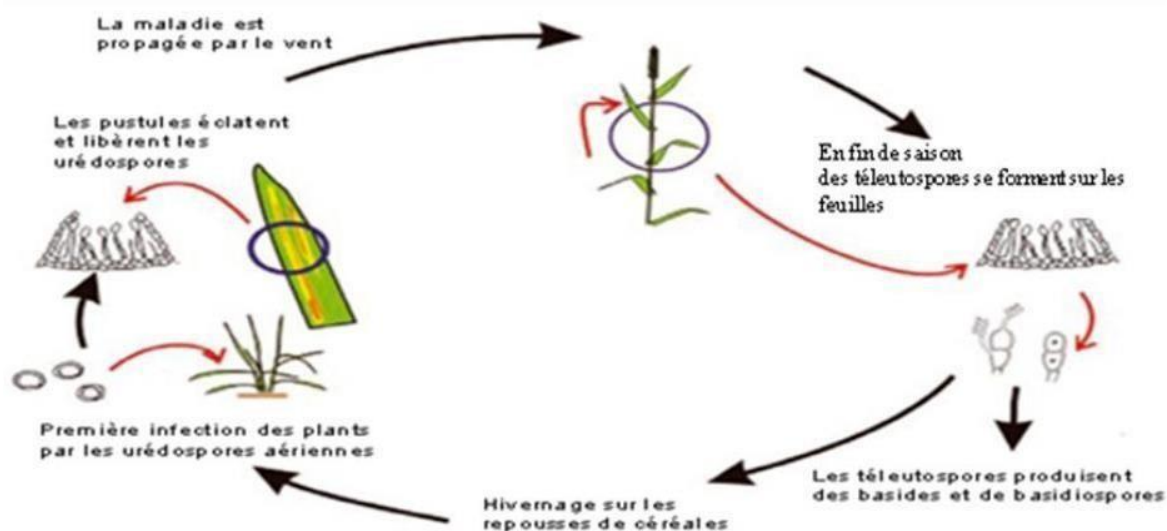


Figure I.9 : Le cycle de développement des rouilles.

I.2.2.3. La Septoriose

I.2.2.3.1. Agent pathogène

La tache Septorienne est l'une des principales maladies cryptogamiques du blé à travers le monde (**Shipton et al. 1971 ; Eyal et al. 1987**). La maladie est causée par l'attaque d'un champignon qui peut être présent sous deux formes au champ : la forme

sexuée *Mycosphaerella graminicola*) et la forme asexuée (*Septoria tritici*) (Farih, 1992).

I.2.2.3.2. Symptômes

L'infection initiale se manifeste par l'apparition de taches ou lésions chlorotiques oblongues ou allongées de forme irrégulière. A mesure que ces taches s'étendent, elles deviennent d'une couleur jaune paille claire et légèrement nécrotique, mouchetées de nombreux petits points noirs (pynchides) (Prescott, 1987).

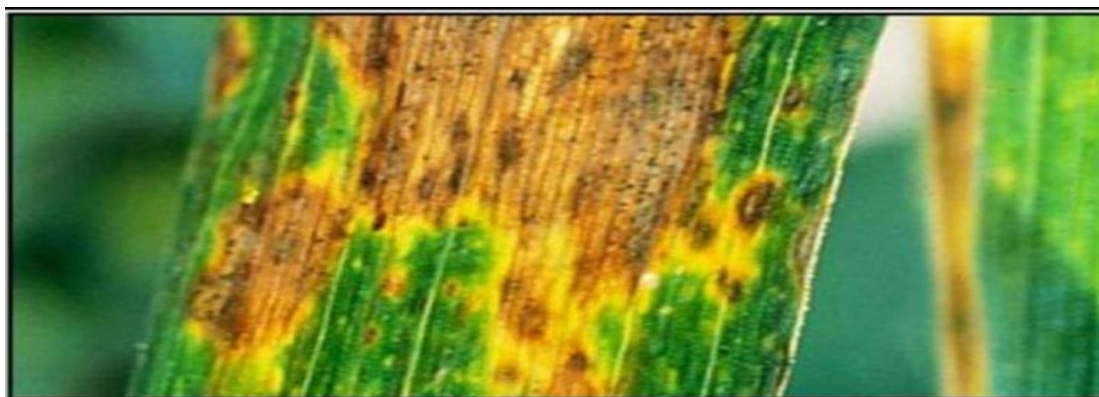


Figure I.10 : La tache septorienne (Safer et Rahmani, 2015).

I.2.2.3.3. Cycle de développement de la Septoriose

L'infection par cette maladie peut survenir dès le stade début tallage grâce à deux principales sources d'inoculum : les ascospores circulant dans l'air libérées à partir des fructifications sexuées présentes dans les résidus de culture, et les pycnidiospores issues de fructifications asexuées qui se retrouvent dans les tissus infectés ou les plantes hôtes.

L'infection est optimale entre 18 et 25°C et nécessite au niveau de la surface foliaire une période d'humidité d'environ 6 heures. La dispersion de la maladie est favorisée par les éclaboussures de pluie qui projettent les spores vers les étages supérieurs.

La gravité de la maladie est d'autant plus grande lorsque le transport coïncide au moment de l'émergence de la feuille drapeau permettant le développement d'une deuxième génération du pathogène engendrant le recouvrement de la totalité de la surface de la feuille par des lésions (Ben Mohamed et al., 2010).

I.2.3. Autres maladies fongiques

Il existe d'autres maladies cryptogamiques qui affectent les céréales, citant : le Piétin-échaudage, le Charbon nu, les Caries communes, Pourritures racinaires, La fusariose

CHAPITRE I

et Helminthosporiose. (Tableau I.1)

Tableau (I.1) : Les autres maladies fongiques du blé

Maladies	Agents pathogènes	Symptômes
Caries communes	<i>Tilletia caries</i>	N'apparaissent qu'au moment du remplissage des grains. Seul le contenu de grain est transformé en une masse poudreuse noirâtre alors que les glumes et les glumelles sont épargnées. Parmi les signes indiquant la présence des épis cariés dans un champ au moment du remplissage des grains, on peut citer la couleur vert foncé des glumes et des glumelles et les épillets qui s'écartent du Rachis (Ezzahiri, 2001)
Charbon nu	<i>Ustilago segetum</i> var. <i>tritici</i>	Visibles entre la floraison et la maturité. Au début, les épis infectés sont noircis, et apparaissent un peu plutôt que les épis sains, les enveloppes de la graine, ainsi que leur contenu est détruit et remplacés par une masse noirâtre, constituée de spores du champignon (Ezzahiri, 2001).
Piétin-échaudage	<i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i>	Les racines et le pied des tiges deviennent noire et fragiles, la détérioration précoce des racines supprime l'apport d'eau et interrompt celui des éléments nutritifs des sols, ce qui entraîne des épis blancs ou vides (Laffont, 1985).

CHAPITRE I

Pourritures racinaires	<i>Fusarium culmorum</i>	Le champignon crée des colorations brun foncé rougeâtres humides sur les plantes âgées, évoluant prestement en pourriture suivit d'accroissement d'un chancre brun sur la tige suivit de la chute des feuilles (Bettou et Righi, 2018).
Fusariose	<i>Fusarium spp</i>	Brunissement de la partie supérieure des racines et entre nœuds et blanchiment prématuré d'une partie ou de totalité de l'épi. Une coloration allant de rose à organe saumon peut apparaitre sur les épis infectés (Bouakaz et Oussaid, 2013)
Helminthosporiose	<i>Pyrenophora tritici-repentis</i>	Au niveau des feuilles on trouve des taches ocellées en forme d'œil plutôt ovoïde, souvent entourées d'un halo chlorotique jaune. Point noir au centre (c'est le point d'infection) (Abdi, 2015).
Tache auréolée	<i>Pyrenophoratrificirepentis</i>	Le champignon provoque sur le feuillage du blé des taches nécrotiques ovales bordées d'une auréole jaunâtre (Douimi et al., 1996)

I.2.4. Méthodes de lutte contre les maladies fongiques

La lutte contre les maladies cryptogamiques du blé vise à réduire et retarder le développement des maladies, afin d'éviter qu'elles n'atteignent pas les feuilles supérieures

qui contribuent à plus de 50 % au remplissage du grain (**Lacroix, 2002**).

Les méthodes de lutte peuvent être chimiques, culturales, génétiques, biologique, mais il est préférable d'intégrer ces différentes méthodes dans un seul programme, ce qui reviendra moins cher pour l'agriculteur (**Eyal, 1981**).

I.2.4.1. Lutte biologique

La lutte biologique peut être définie comme étant l'introduction d'un ennemi naturel à un ravageur/pathogène donné afin de réduire les dommages et les dégâts causés par ce dernier. Les ennemis naturels ainsi que les ravageurs/pathogènes sont de plusieurs natures : plantes, insectes, nématodes, champignons, bactéries, virus, etc.

Un bio pesticide est composé d'un organisme vivant (Plante, nématode, bactérie, champignon ou virus...) ou d'un produit dérivé de cet organisme, qui est utilisé pour contrôler ou supprimer un ravageur/pathogène. Plusieurs bios-pesticides ont pour principes actifs des microorganismes antagonistes. Les microorganismes peuvent exercer une activité antagoniste selon différents mécanismes incluant, notamment la compétition, les interactions directes cellule à cellule, l'antibiose, la dégradation des signaux de quorum sensing (QS), et les actions sur la résistance de l'hôte (**Bojanowski, 2011**). Parmi les champignons antagonistes les plus utilisés dans la lutte biologique contre les maladies cryptogamiques, nous citons les genres : *Trichoderma*, *pythium*, *Aspergillus*...etc.

I.2.4.2. Lutte chimique

Avec l'apparition des pesticides de synthèse, il y près de 50 ans, certains ont imaginé que les ennemies des cultures seraient battues en brèche et éliminés. De toute évidence, cela ne s'est pas produit. Cependant, l'augmentation de la quantité et de la qualité des denrées agricoles produites n'est certainement pas étrangère à l'utilisation des pesticides, et les agricultures ayant accès aux pesticides de synthèse sont rarement victimes d'infections dévastatrices (**Yezli, 2010**).

Les principales matières actives utilisées seules ou en association

- **Epoiconazole**, matière active qui appartient au groupe chimique des triazoles.
- **Spiroxamine**, inhibiteur de la biosynthèse de stérols ayant un effet fongicide et une activité systémique (**Sante Canada, 2015**).
- **Tébuconazole**, composé chimique appartenant à la famille des triazoles. Il est

utilisé pour ses propriétés antifongiques comme substance active de produits phytosanitaires et biocides (**Migné-Fouillen, 2011**).

- **Triadimenol**, fongicide systémique avec l'action protectrice, curative et éradiquant. Absorbé par les racines et les feuilles, avec la translocation prête dans de jeunes tissus croissants, mais moins de translocation prête dans des tissus plus anciens et boisés.
- **Propiconazole**, mis au point en 1979 par Janssen Pharmaceutica, de la famille des triazoles.
- **Cyproconazole**, appartient à la famille des thiazoles (**Migné-Fouillen, 2011**).

➤.I.2.4.3- Lutte culturale

Pour réduire la sévérité des maladies, les chercheurs recommandent l'application des pratiques culturales et les rotations avec des cultures nettoyantes (**Shipton et al. 1971 ; King et al., 1983**) ont noté que depuis longtemps, il a été recommandé de brûler les résidus de culture. Actuellement ce n'est plus le cas, car il arrive que des températures atteintes par cette action ne soient pas assez efficaces pour éliminer tous les débris et ainsi laisser de ce fait suffisamment de restes infectés pour maintenir l'inoculum à une autre culture de blé (**Eyal, 1981**).

I.2.4.4. Lutte génétique

La sélection pour la résistance génétique aux maladies fongiques du blé reste la méthode de lutte rapportée comme la plus efficace et la moins coûteuse (**Rapilly, 1991**). En effet l'utilisation de cultivars résistants permet de réduire la conservation du pathogène dans les chaumes et dans les graines (**Krupinsky, 1999**).

Chapitre II

*Téledétection et télésurveillance des
maladies du blé*

II.1. La télédétection

II.1.1. Définition

Selon **Bariou (1978)**, la télédétection se définit comme l'ensemble des techniques de mesure d'informations à distance par rayonnements électromagnétiques émis, réfléchis ou diffractés par les objets observés.

La télédétection est l'ensemble de connaissances et de techniques utilisées pour évaluer les propriétés physiques et biologiques des objets par des mesures prises à distance, sans contact physique avec eux (**Girard et Girard, 1989**).

II.1.2. Histoire de la télédétection

- 1783 : Première ascension en ballon par les frères Montgolfier
- 1839 : Invention de la photographie (Daguerre)
- 1858 : Premières photos aériennes par Nadar
- 1957 : Entrée de la télédétection dans l'ère moderne avec le lancement de Spoutnik
- 1972 : lancement de Landsat (USA)



Figure II.1 : Satellite Landsat 1

- 1986 : lancement de Spot 1 (France +Belgique et Suède) **Darabid D et bouchkara M.K., (2013).**

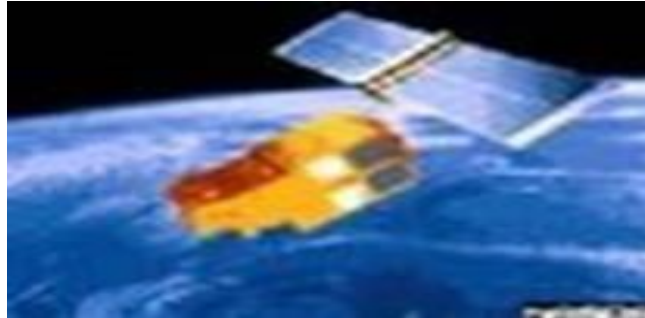


Figure II.2 : Satellite SPOT 1

II-1-3- Les domaines d'application de la télédétection :

Le premier grand secteur d'application de la télédétection a été l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer une surveillance globale et très régulièrement répétitive de l'ensemble de la planète entière.

a) **Cartographie** : les images satellitaires qui ont un très faible rapport "taille de l'image. Distance satellite - Terre" ont de très bonnes caractéristiques géométriques, ce qui justifie leur utilisation pour l'établissement de documents cartographiques à moyenne et petite échelle. Elles sont parfois directement utilisées comme document cartographique de base.

b) **Thématique** : Les images spatiales sont exploitées pour la reconnaissance et la caractérisation des éléments du paysage, ainsi que pour l'établissement de documents thématiques, sous forme statistique ou cartographique pour la sylviculture, l'urbanisme, l'agriculture (par exemple, carte d'occupation des sols : carte de la répartition spatiale des éléments du paysage), la pêche (par exemple, cartes de la température de la surface terrestre), la géologie, l'hydrologie, la surveillance des catastrophes naturelles, etc.

c) **Climatologie et changements globaux** : Les satellites dits météorologiques, par opposition aux satellites dits à haute résolution, sont la

première source d'information pour les études globales comme le suivi de la couverture nuageuse, la caractérisation des différents constituants de l'atmosphère, la cartographie des températures marines, les transferts biosphère-atmosphère, etc. Ils sont caractérisés par un grand champ de vision, une faible résolution spatiale de l'ordre du kilomètre et plus, et une fréquence temporelle relativement élevée. Ils sont caractérisés par un grand champ de vision, une faible résolution spatiale de l'ordre du km et plus, et une fréquence temporelle relativement élevée (**Gastellu-Etchegorry, 2008**).

II.1.4. Les principes de base de la télédétection :

Le principe de base de la télédétection est similaire à celui de la vision de l'homme. La télédétection est le fruit de l'interaction entre trois éléments fondamentaux (une source d'énergie, une cible et un vecteur).

II.1.4.1. La cible : Est portion de la surface terrestre observée par le satellite. Sa taille peut varier de quelques dizaines à plusieurs milliers de kilomètre carré.

II.1.4.2. Source d'énergie : Est l'élément qui éclaire la cible en émettant une onde électromagnétique (flux de photons).

Dans l'immense majorité des cas que nous aborderons ici, la source d'énergie est le soleil. Néanmoins, la technologie RADAR nécessite qu'un émetteur soit embaqué sur le satellite, dans ce cas le satellite lui-même est source d'énergie.

II.1.4.3. Le vecteur : ou plate-forme de télédétection mesure l'énergie solaire (rayonnement électromagnétique) réfléchi par la cible. Le vecteur peut être un satellite ou un avion, dominat la cible de quelques centaines de mètres à 3600 kilomètres.

Les capteurs embaqués sur le satellite mesurent le rayonnement électromagnétique réfléchi puis un émetteur renvoie l'image sur terre vers des stations de réception. (**Boukli, 2012**)

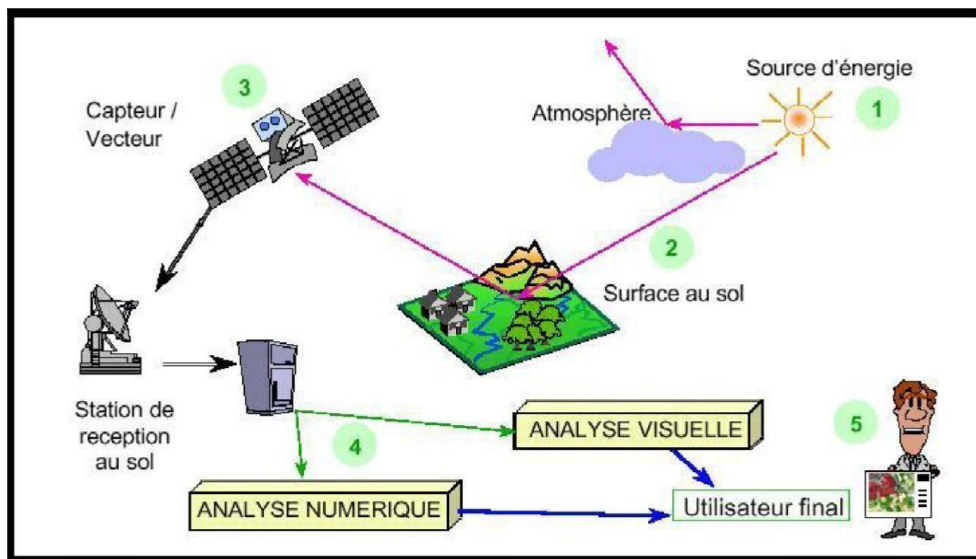


Figure II.3 : Principe de base de la Télédétection (Boukli, 2012)

II.1.5. Les étapes du processus de télédétection :

Dans la majorité des cas, la télédétection comporte une interaction entre une source énergétique incidente et des cibles. Le principe de la télédétection à l'aide de systèmes d'imagerie implique sept étapes, que nous allons expliquer en détail ci-dessous. Notez cependant que la télédétection peut également impliquer une énergie transmise et employer des capteurs non-imageurs.

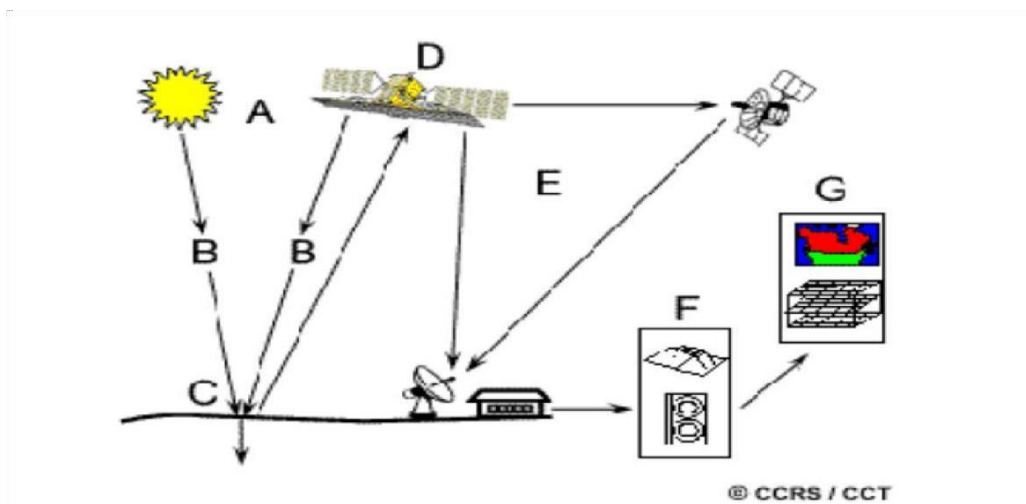


Figure II.4 : processus de télédétection (d'après CCT, 2016)

- 1. Source d'énergie ou d'illumination (A)** - À l'origine de tout système de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.
- 2. Rayonnement et atmosphère (B)** - Pendant son parcours de la source d'énergie à la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une deuxième interaction se produit pendant le trajet entre la cible et le capteur.
- 3. Interaction avec la cible (C)** - Une fois que l'énergie touche la cible, elle interagit avec sa surface. La nature de cette interaction est fonction des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.
- 4. Enregistrement de l'énergie par le capteur (D)** - L'énergie diffusée ou émise par la cible, doit être captée à distance (par un capteur qui n'est pas en contact avec la cible) pour être enfin enregistrée.
- 5. Transmission, réception et traitement (E)** - L'énergie enregistrée par le capteur est transmise, souvent par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).
- 6. Interprétation et analyse (F)** - Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.
- 7. Application (G)** - La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous en faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier. (CCT, 2016)

II.1.6. Détection passive et active

II.1.6.1. Capteur actif : capteur auquel est incorporé ou associé un émetteur qui irradie la scène dans la bande spectrale du récepteur. Le radar et le lidar (à rétrodiffusion) sont des exemples de capteurs actifs. L'équivalent en anglais est : actif sensor

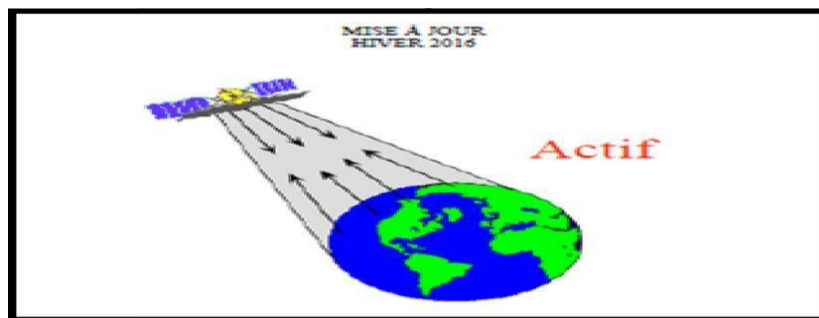


Figure II.5 : principe de capture actif (CCT).

II.1.6.2. Capteur passif : capteur qui reçoit une énergie émise sans que lui-même irradie la scène. Un appareil photographique sans flash est un capteur passif. L'équivalent en anglais est : passive sensor (Lawandi., 2006)

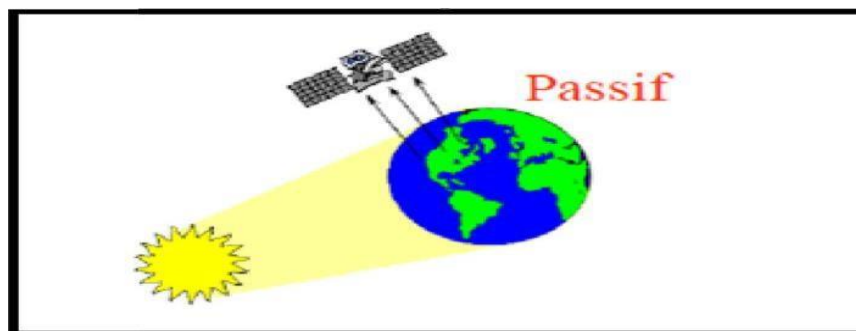


Figure II.6 : Principe de fonctionnement d'un capteur passif (CCT).

II.2. Utilisation des images satellitaires dans le diagnostic des maladies du blé

II.2.1. Pourquoi la télédétection ?

Pourquoi la télédétection ? La télédétection constitue une méthode fiable et efficace de collecte d'informations dans le but de cartographier le type et la superficie des cultures. En plus de fournir une vision synoptique, la télédétection peut fournir des informations sur la structure et la santé de la végétation. La réflectance spectrale d'un champ varie en fonction du stade phénologique (stade de croissance), du type de plantes et de leur état de santé. Les micro-ondes sont sensibles à l'alignement, à

la structure et à la quantité d'eau présente dans les plantes et le sol, et permettent de donner des informations complémentaires aux données optiques.

L'intégration de ces deux types de données augmente les informations disponibles pour distinguer la signature spectrale de chaque classe et ainsi permettre une classification plus exacte. Les résultats de cette interprétation des données de télédétection peuvent être intégrés dans un système d'information géographique (SIG) et un système de gestion des cultures, et peuvent aussi être combinés avec des données auxiliaires pour fournir des informations sur les droits de propriété, les pratiques de gestion, etc. (Campbell, 1987).

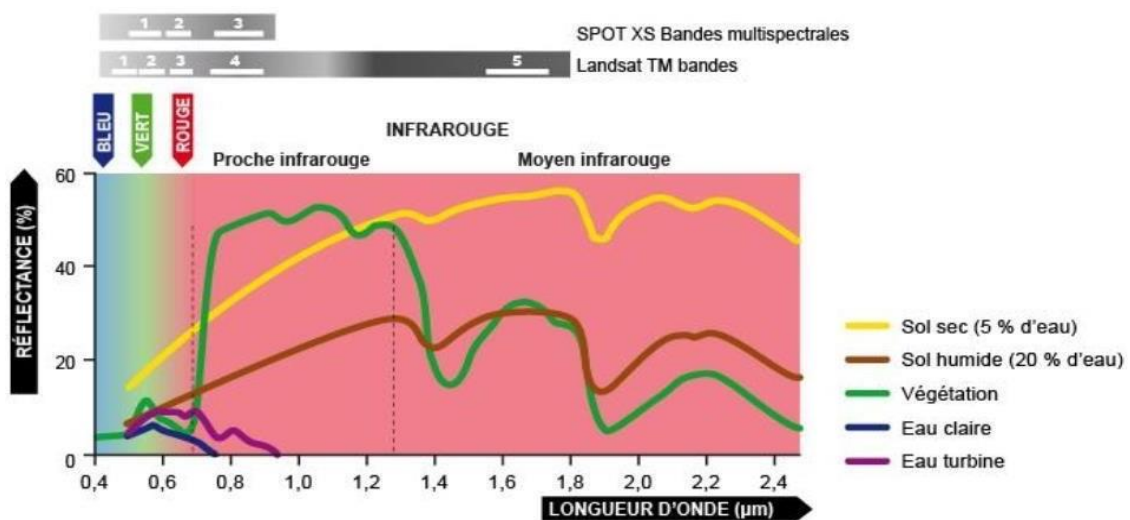


Figure II.7 : Réflectance de l'eau du sol et de la végétation dans différentes longueurs d'onde

II.2.2. Surveillance des cultures

Le domaine agricole est un des consommateurs de données de télédétection principalement en raison de la grande surface couverte par ses activités. Les vastes zones agricoles sont gérées et exploitées par quelques personnes uniquement et les propriétés des cultures évoluent constamment dans le temps, ce qui fait de la télédétection une source d'information privilégiée dans cet environnement (Moran et al., 1994).

Actuellement, les études s'orientent davantage vers la caractérisation du contenu d'une parcelle (état du couvert) que de ses limites (contours de la parcelle). L'utilisation de la réflectance comme un indicateur de la concentration d'azote dans la production végétale n'en est qu'à ses débuts (**Schröder et al., 2000**).

Elle permet de détecter des stress chez des plantes bien avant les autres techniques (Carter et al. 1996). Les images de réflectance dans le domaine du proche infrarouge peuvent détecter les variations spatiales au sein des champs agricoles, telles que les types de sol, les stress liés aux nutriments et les différences de rendement (**Chaerle et Straten, 2000**).

Les rapports de bande dérivés des mesures de réflectance, communément appelés indices, sont souvent utilisés pour discriminer certaines propriétés des plantes (**Lichtenthaler et al., 1998**). Les indices de végétation ont pris de l'ampleur dans les 1980, alors que la majorité des chercheurs dans le secteur s'affairaient à développer des outils d'aide à l'interprétation (**Bariou et al., 1985**).

De multiples indices basés sur la réflectance des feuilles sont toujours utilisés pour évaluer la surface totale des feuilles par unité de surface, estimation particulièrement utile pour la prévision des récoltes.

La combinaison de différentes sources d'information telles que les données météorologiques et les images satellites permet d'obtenir des indices plus complexes. Les indices de sécheresse, dérivés des indices de végétation, sont aussi une utilisation agronomique de la télédétection. La combinaison de données météorologiques, de données sur l'utilisation des terres et d'images de télédétection permettent de calculer un indice qui peut ensuite être intégré dans des modèles de planification agro-météorologique (**Vogt et al., 2000**).

II.2.3. Les propriétés optiques du couvert végétale

Selon la structure de la matière et sa composition ses propriétés optiques évoluent dans le temps. Le couvert végétal c'est un ensemble de composantes allant du sol jusqu'au fruit en passant par les pigments et la teneur en eau de chaque organe. Examinons la composante principale qui est la feuille.

CHAPITRE II

La lumière, lorsqu'elle atteint les feuilles de blé peut être absorbée, transmise ou réfléchi par la feuille. La proportion de la lumière réfléchi par les feuilles est appelée réflectance et est la variable qui a été mesurée dans cette étude.

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

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

Ces trois éléments varient au cours du temps et entraînent par conséquent des changements dans la structure et les caractéristiques des couverts végétaux.

La **figure II.8** présente la réflectance typique d'une feuille saine en fonction de la longueur d'onde. La réflectance de la feuille est influencée dans le visible par la concentration en pigments. La chlorophylle est le pigment le plus important est responsable des absorptions dans le bleu (450 nm) et le rouge (660 nm) (**Inoue., 2016**). D'autres pigments comme les xanthophylles ont une influence sur la signature spectrale de la feuille dans le visible

Le Red Edge correspond au saut de réflectance de la feuille à une longueur d'onde d'environ 740 nm. Le NIR (Near Infra-Red) correspond à la plage de longueur d'onde comprise entre 700 et 1300 nm. La réflectance dans cette gamme est relativement élevée et constante et est essentiellement influencée par la structure des cellules de la feuille. Le rayonnement est réfléchi par des gaz contenus dans un parenchyme lacuneux.

Plus ce parenchyme est développé, plus la réflectance est importante. L'infrarouge à ondes courtes est compris entre 1300 et 3000 nm. Il est influencé par les teneurs en eau (**Koch et al., 1990; Zhao et al. 2016**), lignine, protéine et

CHAPITRE II

cellulose. Plus précisément, la réflectance diminue fortement aux longueurs d'onde 1450 nm et 1900 nm qui correspondent au pic d'absorption de la molécule d'eau.

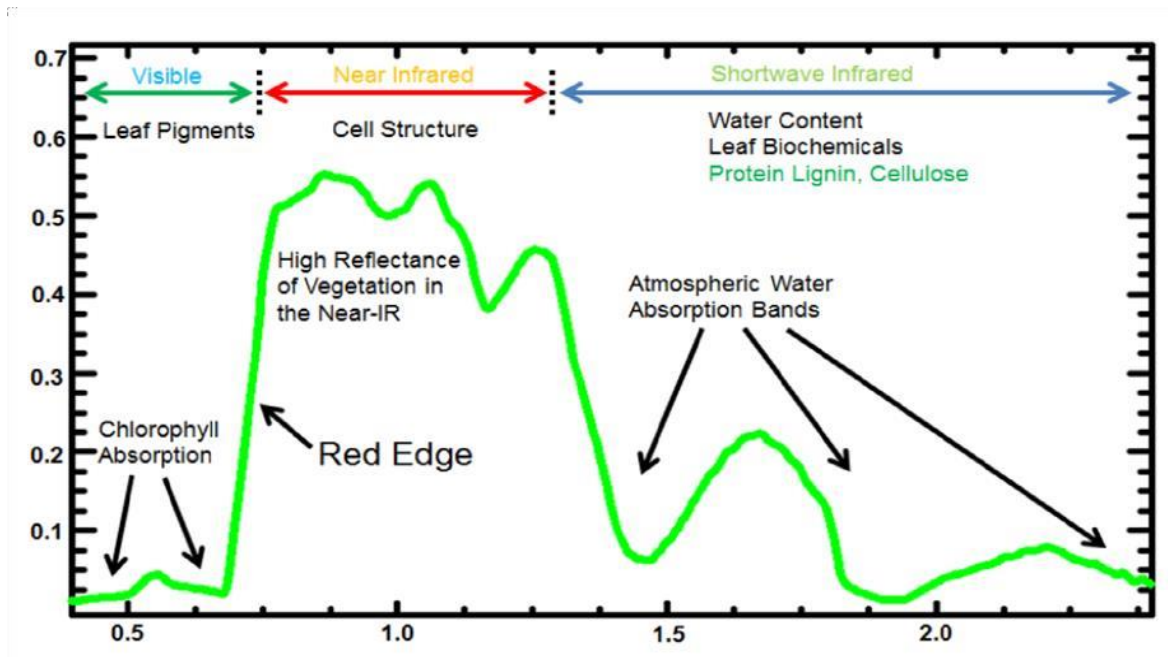


Figure II.8 : Illustration du spectre de réflectance typique d'une feuille saine entre 0,4 et 2,4 μm . Les gammes du visible, du NIR et de l'infrarouge à ondes courtes sont renseignées ainsi que les attributs de la feuille qui influencent la réponse spectrale dans ces gammes (Source : <http://www.markelowitz.com/Hyperspectral.html>, consulté le 10 août 2016).

Les maladies influent la signature spectrale de la végétation par leur présence et les changements physiologiques qu'elles causent dans la feuille. Les maladies fongiques du blé étudiées dans ce travail sont caractérisées par des symptômes. L'apparition des maladies modifie la couleur de la feuille. A ces endroits, la feuille émet ces couleurs dans le visible plutôt que le vert caractéristique des feuilles de blé saines.

En outre, la présence de maladies cause la chlorose et/ou la nécrose des feuilles, ce qui influence leur teneur en pigments et leur structure cellulaire (Wahabzada et al., 2015) qui, à son tour, influence la réflectance de la feuille dans le visible et le NIR. La réflectance d'une feuille malsaine dans le NIR est généralement inférieure à celle d'une feuille saine. La nécrose des feuilles est également accompagnée d'une dessiccation des

feuilles. La diminution de la quantité d'eau entraîne une modification de la signature spectrale dans l'infrarouge à ondes courtes.

II.2.4. Les images satellitaires :

Une image satellitaire est une représentation graphique, en vue de dessus, d'une zone assez vaste de la Terre. La particularité de cette image est qu'elle est prise par un satellite placé en orbite autour de la planète.

L'imagerie satellite permet aujourd'hui de bénéficier de données très intéressantes dans de nombreux domaines notamment en agriculture. Ces images sont collectées grâce à des capteurs placés sur les satellites et permettent de calculer un indice de végétation. Cet indice sera ainsi disponible sous forme de carte avec des dégradés de couleurs suivant le taux de couverture de la végétation dans la parcelle.

II.2.4.1. Les satellites Sentinel 2

Démocratisée par le lancement des satellites de la mission Sentinel, l'imagerie satellitaire et la télédétection connaissent un véritable essor en agriculture et les applications se multiplient.

Sentinel-2A (S-2A) est un imageur spectral, lancé et mis en orbite en Juin 2015 dans le cadre du programme « Copernicus » par l'ESA avec succès, suivi de Sentinel-2B (S-2B) en Mars 2017, permettant un suivi régulier avec une répétitivité temporelle de 5 jours des deux satellites réunis et tous les 10 jours avec un seul satellite. Ils offrent 13 bandes spectrales entre le visible et l'infrarouge avec une résolution spatiale entre 10 m (pour le visible et proche infrarouge), 20 m (pour Red Edge et moyen infrarouge) et 60 m (pour la détection des nuages).

Tableau II.1 : Caractéristiques de Sentinel-2

Satellite	Sentinel-2A et Sentinel-2B
Altitude	786 km
Instruments	MSI, imageur multi spectral
Résolution temporelle	5 jours (Sentinel-2A et Sentinel-2B)
Résolution spatiale	10-60 m
Nombre de bandes	13 (visible au moyen Infrarouge)
Fauchée	290 km

II.2.4.2. Les satellites Landsat 8

Le programme comporte une famille de 8 satellites (Landsat) destinés à fournir des observations de la terre dans le domaine du visible, l'infrarouge et infrarouge thermique.

Le satellite Landsat-8 a été lancé par la NASA en février 2013 et diffusé par l'USGS. C'est un radiomètre spectral, qui couvre la terre tous les 16 jours, offrant 11 bandes spectrales entre le visible et la thermique avec une résolution spatiale de 30 m (Visible, Proche infrarouge, moyen infrarouge), 100 m (thermique) et 15 m (panchromatique) (Bousbiha, 2019.)

II.2.5. Les indices spectraux :

Chaque bande d'une image fournit un élément d'information particulier. Dans la bande verte, la végétation a une réflectance plus faible et apparaît sombre. Dans la bande du proche infrarouge, la végétation est réfléchiée et donne des indications sur la structure des différentes espèces végétales.

En connaissant les caractéristiques de chaque bande, il est également possible de les combiner en plusieurs indices pour obtenir plus d'informations. De plus, en utilisant des indices normalisés, il est possible de transférer les connaissances de ces indices à de nouvelles images, et éventuellement à d'autres capteurs. (Elhalim, 2015).

II.2.5.1. Principe :

Le calcul des indices repose essentiellement sur les différences de réflectance observées dans les différentes bandes spectrales, ainsi que sur la variabilité des réflectances au sein d'une même bande spectrale, qui reflètent des surfaces de nature différente. Ainsi, les différences de propriétés optiques de la végétation dans le rouge et le proche infrarouge sont principalement utilisées. Les réflectances dans le proche infrarouge augmentent avec la présence de végétation (forte réflexion par le parenchyme lacunaire), tandis que celles dans le rouge diminuent (pic d'absorption de la chlorophylle) (**Abdelbaki, 2012**).

Si l'on observe le diagramme de dispersion ou scattérogramme des bandes spectrales rouge et proche infrarouge, on constate généralement une répartition des valeurs de réflectance en forme de chapeau (**Figure II.9**). La base du chapeau répartie le long de la bissectrice représente la droite des sols, dépourvue de végétation. Les variations de réflectance le long de la droite des sols traduisent le caractère sec ou humide des sols. Plus on est proche de l'origine (faibles valeurs de réflectances dans le rouge et le proche infrarouge), plus les sols sont humides et a contrario, plus on s'éloigne de l'origine, plus les sols sont secs.

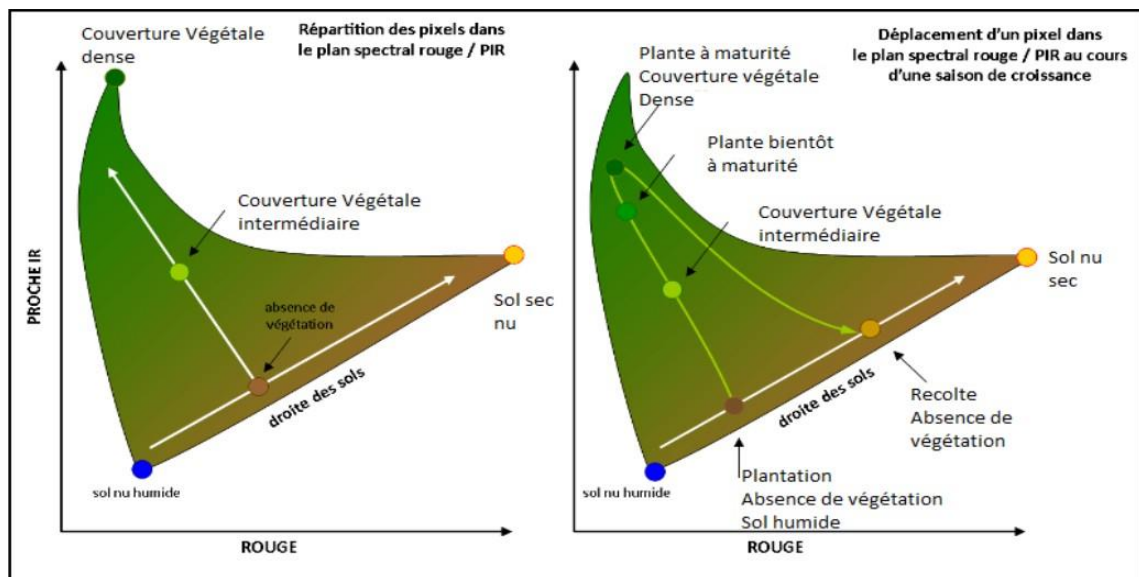


Figure II.9 : Répartition spectrale des réflectances dans le rouge et l'infrarouge.

II.2.6. Les principaux indices de végétations pour l'agriculture :

Un grand nombre d'indices de végétation ont été construits et utilisés depuis environ 50 ans (**Bannari et al., 1995**). Ils se présentent soit sous la forme d'expressions très basiques (différence simple ou rapport simple), soit sous la forme de formules beaucoup plus complexes. Ils sont généralement classés en familles d'indices selon qu'ils prennent en compte ou non des facteurs extérieurs au couvert végétal, tels que l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale des sols, la teneur en eau des plantes (indices de sécheresse), etc...

II-2-6-1-L'indice de végétation par différence normalisée « NDVI » (normalized Difference Vegetation Index)

Parmi tous les indices de végétation proposés depuis les origines de la télédétection spatiale l'indice de végétation normalisé (**Rouse et al., 1974**) est devenu l'outil standard de description du comportement spectral de la couverture végétale. Cet indice, le plus souvent appelé NDVI selon son abréviation anglaise, est calculé à partir de deux bandes spectrales, le rouge **R** et l'infrarouge ρR , selon la formule suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$$

Où

ρ_{PIR} , réflectance dans la bande infrarouge, et ρ_R : réflectance dans la bande rouge.

Il varie entre 0 pour surface désertique et 1 pour les forêts denses. Son utilité pour décrire le couvert végétal se base sur le fait que d'une part ce dernier absorbe préférentiellement (mais pas uniquement) l'énergie lumineuse dans les longueurs d'onde du rouge pour la photosynthèse, et réfléchit par contre fortement cette énergie dans le proche infrarouge, en fonction de la structure intercellulaire du matériel végétal photosynthétisant (**Gausman, 1985**).

CHAPITRE II

II-2-6-2-Les autres indices

Le tableau ci-dessous résume quelques-uns des indices de végétation les plus couramment utilisés ;

Tableau II.2 : Résumé d'indices de végétation définis à partir de données de télédétection

Les indices simples	
$DVI = \rho_{PIR} - \rho_R$ $RVI = \frac{\rho_{PIR}}{\rho_R}$ $NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R}$	<p>Bacour et al., (2006)</p> <p>Kreiger et al., (1969) ; Jorden (1969)</p> <p>Rouse et al (1974) ; Tucker (1979)</p>
Les indices de stress hydriques	
$MSI = \frac{\rho_{MIR}}{\rho_{PIR}}$ $NDWI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_{MIR}}{\rho_{PIR} + \rho_{MIR}}$	<p>Hunt et Rock (1989)</p> <p>Gao (1996)</p>
Les indices prenant en compte l'influence des sols	
$PVI = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} (\rho_{PIR} - a\rho_R - b)$ $SAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} (1 + L)$ $TSAVI = \frac{a(\rho_{PIR} - a\rho_R - b)}{\rho_R + \rho_{PIR} - ab + 0.08(1 + a^2)}$ $MASAVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R + L} (1 + L)$	<p>Richardson et weigand (1977)</p> <p>Huete (1988)</p> <p>Baret et al., (1989)</p> <p>Qi et al., (1994)</p>
Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et d'atmosphères	

CHAPITRE II

$\text{ARVI} = \frac{\rho\text{PIR} - \rho b}{\rho\text{PIR} + \rho b}$ $\text{GEMI} = y(1 - 0.25y) - \frac{\rho_{\text{rouge}} - 0.25}{1 - \rho_{\text{rouge}}}$	<p>Kaufman et Tanré (1992)</p> <p>Pinty et Verstraete (1992)</p>
<p>Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère</p>	
$\text{EVI} = G \frac{\rho\text{PIR} - \rho R}{\rho\text{PIR} + C_1\rho R - C_2\rho B + L}$	<p>Huete et al., (1999)</p>
<p>Les indices prenant en compte les températures de surface</p>	
$\text{TDVI} = \frac{T_s - T_{s(\min)}}{a + b\text{NDVI} - T_{s(\min)}}$	<p>Sandholt et al., (2002)</p>

Chapitre III

*Synthèse et évaluation des méthodes
de télédétection pour la surveillance
des maladies fongiques du blé*

III.1. Les indices spectraux utilisés dans l'étude de la végétation

De très nombreux indices de végétation ont été construits et utilisés depuis maintenant une quarantaine d'années. Ils prennent la forme soit d'expressions très basiques (simple différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes. On a l'habitude de les classer en familles d'indices selon qu'ils prennent ou non en compte les facteurs externes aux couverts végétaux, tels que l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale des sols, la teneur en eau des végétaux (indices de sécheresse). Nous présentons dans ce qui suit les Cinq familles d'indices utilisés.

III.1.1. Les indices simples

Les indices de végétation les plus simples sont basés sur des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales, généralement le rouge et le proche infrarouge, mais également les bandes du proche et du moyen infrarouge. Il existe cinq indices simples

- **IB** Indice de Brillance (en anglais Index Brightness)

Il permet de faire clairement la distinction entre les surfaces végétalisées et les sols nus. Sa formule est la suivante :

$$IB = \frac{R + PIR}{R - PIR}$$

- **DVI** Indice différentiel de végétation (en anglais Difference Vegetation Index) (**Bacour et al, 2006**)

Cet Indices est le plus élémentaire et le plus ancien, renseigne sur une couverture suffisante ou non du sol par la végétation. Permet une bonne discrimination des éléments du paysage qui est égal à la simple différence des bandes du proche infrarouge et du rouge sa formule est la suivante :

$$DVI = \rho_{PIR} - \rho_R$$

Où

ρ_R : Réflectance dans la bande rouge

ρ_{PIR} : Réflectance dans la bande proche infrarouge

- **RVI** L'indice de végétation par quotient (en anglais Ratio-Vegetation-Index) (**Krieger et al., 1969 ; Jordan 1969**)

S'exprime également de façon très simple. Il est égal au rapport entre les bandes du PIR et du rouge son expression est :

- $RVI = \rho_{PIR} / \rho_R$

Remarque

L'inconvénient de ces indices est qu'ils sont très sensibles aux variations atmosphériques, ainsi qu'à la contribution spectrale des sols. En outre, lorsque la végétation est très dense, la réflectance dans la bande rouge devient très faible, ce qui entraîne une saturation des valeurs de l'indice RVI.

- **NDVI** (en anglais Normalized Difference Vegetation Index) (**Rouse et al., 1974**)

L'indice de végétation par différence normalisé permet de mesurer l'intensité de vert des forêts d'une zone donnée, et indique la masse de végétation présente dans celle-ci, résultant de l'analyse de données satellitaires.

Sa formule est la suivante :

$$NDVI = (\rho_{PIR} - \rho_R) / (\rho_{PIR} + \rho_R)$$

III.1.2. Les indices de stress hydrique

Comme le MSI ou le NDWI sont des indices de stress hydrique. Il permet de déceler lorsque les végétaux sont en état de stress hydrique et sont par conséquent très utiles pour le suivi de la végétation en zone sèche. Il utilise la bande spectrale du moyen infrarouge à la place de la bande rouge. Cet indice varie en fonction de la teneur en eau des feuilles

- **NDWI** (Normalized Difference Water Index) (**Gao, 1996**)

$$NDWI = (\rho_{PIR} - \rho_{MIR}) / (\rho_{PIR} + \rho_{MIR})$$

Où

ρ_{MIR} : Réflectance dans la bande infrarouge moyenne.

ρ_{PIR} : Réflectance dans la bande proche infrarouge.

- **MSI (Moisture Stress Index) (Hunt and Rock, 1989)**

$$MSI = \rho_{MIR} / \rho_{PIR}$$

III.1.3. Les indices prenant en compte l'influence des sols

Ces indices ont été proposés pour et réduire l'influence des sols sous-jacents aux couverts végétaux sur le signal mesuré au niveau du capteur satellitaire. Les indices les plus développés sont :

- **PVI (Perpendicular Vegetation Index) (Richardson and Weigand 1977)**

L'indice perpendiculaire de végétation Il permet de produire des isolignes de végétation parallèles à la droite des sols, ce qui n'est pas très représentatif de la réalité.

Où

$$PVI = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} (\rho_{PIR} - \alpha \rho_R - b)$$

α : Pente de la droite des sols dans l'espace (R, PIR)

b : ordonnée à l'origine de la droite des sols

- **SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) (Huete 1988)**

Indice de végétation ajusté pour le sol qui introduit un paramètre d'ajustement, noté L, qui caractérise le sol et son taux de recouvrement par la végétation. Le paramètre L prend la valeur de 0,25 pour une forte densité et de 1 pour une très faible densité de végétation. Pour des densités intermédiaires, il est égal à 0,5.

$$SAVI = (\rho_{PIR} - \rho_R) / (\rho_{PIR} + \rho_R + L) (1+L)$$

Où L est une constante égale à 0,5

III.1.4. Les indices prenant en compte les effets de l'atmosphère

- **ARVI** (Atmospherically Resistant Vegetation Index) (**Kaufman and Tanré 1992**)

Un indice qui permet de réduire les effets atmosphériques en utilisant la bande bleue.

$$ARVI = \rho_{PIR} - \rho_{rb} / \rho_{PIR} + \rho_{rb}$$

Où

prb : une combinaison des réflectances dans les bandes spectrales bleu et rouge.

$$\rho_{rb} = \rho_{rouge} - \gamma(\rho_{bleu} - \rho_{rouge})$$

γ : est un facteur d'autocorrection atmosphérique qui dépend du type d'aérosols présents. Il est calculé à partir des réflectances intrinsèques de l'atmosphère dans les bandes bleue et rouge.

- **GEMI** (Global Environmental Monitoring Index) (**Pinty et Verstraete 1992**)

Un indice qui a une relation non linéaire pour minimiser l'influence de l'atmosphère sur la mesure de l'indice de végétation.

$$GEMI = y(1 - 0,25y) - (\rho_{rouge} - 0,25) / (1 - \rho_{rouge})$$

Avec

$$y = 2(\rho_{PIR2} - \rho_{R2}) + 1,5\rho_{PIR} + 0,5\rho_{PIR} / (\rho_{PIR} - \rho_R + 0,5)$$

III.1.5. Les indices prenant en compte les effets conjugués des sols et de l'atmosphère

En combinant les indices présentés ci-dessus, notamment le SAVI et l'ARVI, ils permettent de corriger les effets conjugués des sols et de l'atmosphère, Comme

- **EVI** (Enhanced Vegetation Index). (**Huete et al., 1999**)

$$EVI = G[\rho_{PIR} - \rho_R]/(\rho_{PIR} + C1\rho_R - C2\rho_R + L)$$

Où

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 est basé sur l'indice SARVI. Le EVI est sensible à la variation de la structure de la canopée, son type, son architecture et aussi la densité foliaire. Les valeurs de EVI varient entre -1 et 1; pour la végétation saine, les valeurs varient généralement entre 0,2 et 0,8 correspondant à une végétation faible et élevée, respectivement.

III.1.6. Les indices prenant en compte la température de surface

La température de surface des sols est reliée à l'indice de végétation par une relation linéaire décroissante.

La végétation régule la température de surface en absorbant l'énergie rayonnante et en la réémettant sous forme de chaleur latente via le processus d'évapotranspiration.

- **TDVI** (Temperature Vegetation Dryness Index) (**Sandholt et al., 2002**)

Son expression est la suivante :

$$TDVI = (T_S - T_{S(min)})/(a + b NDVI - T_{S(Min)})$$

Où

TS : température de surface.

TS (min): température de surface minimum.

b:respectivement ordonnée à l'origine et pente de la droite reliant la température de surface au NDVI maximum.

III.2. Variables biophysiques

Par télédétection dans le domaine spectral solaire, on peut accéder à certaines caractéristiques du couvert végétal. Ce sont les caractéristiques qui influent le plus sur la signature spectrale et/ou directionnelle de la végétation.

III.2.1. Leaf Area Index (LAI)

Le LAI est défini par la surface totale d'éléments de végétation verts (ne considérant qu'un seul côté des feuilles) par unité de surface au sol horizontal (**Privette et al., 1996**).

Chen et Black en 1992 l'ont défini comme la surface cumulée, sur toute la hauteur du couvert, des faces supérieures des feuilles par unité de surface du sol. C'est donc une fonction directe de l'espacement des plantes dans la parcelle et l'une des principales déterminant le champ de rayonnement au sein du couvert (**Chen, 1996**).

Le LAI est sans doute l'élément observable par télédétection le plus important du couvert. En effet, comme les feuilles sont considérées comme les principales interfaces avec l'atmosphère pour les transferts de masse et d'énergie (**Rosenberg et al., 1983**). LE LAI décrit à la fois (**Sellers et al., 1986**) :

- une quantification directe de la végétation verte et indirecte de la biomasse sur la surface observée ;
- la potentialité de la photosynthèse disponible pour la production primaire ;
- une caractérisation de l'évapotranspiration (H₂O) et des flux de carbone entre la biosphère et l'atmosphère ;
- une mise en évidence des zones gravement affectées (zones stressées, attaquées par des agents pathogènes, etc.).

L'indice de surface foliaire est en outre largement utilisé en écophysiologie pour modéliser le fonctionnement des couverts, puisque ce sont essentiellement les feuilles qui conditionnent l'évapotranspiration et les flux de carbone entre la biosphère et l'atmosphère (**Rosenberg et al., 1983**).

Le LAI peut être mesuré directement au sol avec le LAI-2000 ou avec un planimètre lorsque les plants sont petits. En outre, il peut être estimé à l'aide d'algorithmes appliqués sur des images aéroportées ou satellitales à condition d'avoir des mesures au sol du LAI pour l'étalonnage et la validation des données (**Delécolle et Guérif, 1988**). Il existe une variété de méthodes pour l'estimation du LAI à partir du sol ou par télédétection et

CHAPITRE III

cette situation peut entraîner une certaine confusion et une mesure d'incertitude quant à la sélection des méthodes, du concept expérimental et de l'instrumentation (**Bacour, 2001**).

Le LAI peut être estimé à partir des mesures de réflectances des capteurs optiques satellitaires. Les premiers travaux dans ce domaine ont été réalisés dans le cadre du projet ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project) (**Sellers et al., 1994**).

L'algorithme de calcul reposait alors sur des relations empiriques avec l'indice de végétation NDVI, établies pour chaque classe d'une carte d'occupation des sols. Depuis, des méthodes plus sophistiquées ont été élaborées, utilisant des modèles de transfert radiatif qui implémentent des tables de correspondance ou des réseaux de neurones (**Bacour, 2001**).

Les modèles empiriques consistent à corrélérer, par des relations simples, les indices de végétation au LAI. Ils ont l'avantage d'être rapides et faciles à mettre en œuvre (**Kimes et Kirchner 1982**).

Ils sont cependant très sensibles à un certain nombre de facteurs perturbateurs tels que la contribution du sol, les effets atmosphériques et la géométrie de visée. Pour améliorer la robustesse du LAI estimé en prenant en compte explicitement l'influence de ces différents facteurs perturbateurs, on préfère souvent utiliser les modèles physiques (**Gastellu-Etchegorry et al., 1996**).

Ces modèles décrivent le transfert radiatif au sein du couvert et permettent ainsi de relier le signal radiométrique fourni par les capteurs aux caractéristiques du couvert. La détermination du LAI nécessite d'inverser ces modèles à partir des données de télédétection. Le processus d'inversion consiste en une minimisation de l'écart entre les réflectances simulées et mesurées afin de déterminer les valeurs optimales (**Camillo, 1991**).

Une bonne performance de l'algorithme d'inversion requiert d'une part un modèle précis qui prend bien en compte la structure du couvert et d'autre part une connaissance *a priori* de la distribution des variables du modèle qui permettra de mieux contraindre l'inversion (**Maas et al., 1989**).

III.2.2. Biomasse

La biomasse comprend toute matière organique aérienne ou souterraine, qu'elle soit vivante ou morte. Le terme biomasse correspond à une définition commune de la biomasse au-dessus du sol et de la biomasse souterraine. La biomasse au-dessus du sol comprend toute la biomasse vivante au-dessus du sol, y compris les tiges, les souches, les branches, l'écorce, les graines et le feuillage. Par contre, la biomasse souterraine correspond à toute la biomasse de racines vivantes ; les radicelles de moins de 2 mm de diamètre sont exclues, car il est souvent difficile de les distinguer empiriquement de la matière organique du sol.

La biomasse sèche diffère de la verte du fait qu'elle est anhydre. La biomasse est une propriété de base qui est associée à de nombreux processus puisqu'elle décrit la quantification de la respiration des plantes sur la surface observée (**Fallon, 2003**). Elle est impliquée dans un nombre de processus écologiques aussi bien en relation avec l'atmosphère qu'avec le milieu terrestre (cycle du carbone, cycle de l'eau).

Des études scientifiques ont cherché, par le passé, à établir des méthodes précises, économiques et rapides, pour estimer la biomasse. Si les coupes de biomasse constituent une méthode simple à mettre en œuvre (par exemple **Sims et al., 1978 ; Sala et al., 1988**), cette technique est limitée par sa lenteur, son coût, le caractère destructif des mesures, et surtout par le nombre de mesures nécessaires pour produire une estimation fiable. Plusieurs travaux ont démontré l'existence de forts rapports entre l'information spectrale et la biomasse ou la production primaire nette (PPN) (**Goward et al., 1985; Box et al., 1989; Running, 1990; Prince, 1991; Hobbs, 1995; Paruelo et al., 1997; Paruelo et al., 2000(a)**).

Ainsi, Plusieurs chercheurs ont récemment publié des résultats proposant que les réflectances dans le visible, le proche infrarouge et le moyen infrarouge peuvent être reliées aux conditions de croissance. Ils ont montré que les régions spectrales du rouge et de l'infrarouge sont fortement corrélées à la biomasse (**Franklin, 1986 ; Roy et Ravan, 1996 ; Jakubauskas et Price, 1997**). Et beaucoup d'autres ont identifié le moyen infrarouge comme étant la région spectrale la plus sensible au changement de la biomasse (**Danson et Curran, 1993**).

L'estimation de la biomasse peut se faire en termes de matière sèche ou d'indice foliaire. Elle demeure un problème épineux, puisqu'il y'a un grand nombre de méthodes d'estimations indirects (au sol et par télédétection optique) et qui donnent des résultats divergents (**Fischer et al., 1995**). Un rapport statistique significatif a été découvert entre les indices de végétation et la biomasse verte, mais d'autres études ont aussi annoncé peu ou pas de lien entre eux (**Anderson et al., 1993**). Les relations entre les cumuls d'indice de végétation et la biomasse ou la productivité sont empiriques.

Il a été montré que la biomasse pouvait être estimée à partir des indices de végétation. La meilleure relation est obtenue en utilisant l'intégrale de la courbe d'évolution de l'indice de végétation au cours du cycle cultural. L'intensité de l'activité photosynthétique de la couverture végétale et la durée de cette activité au cours de cycle cultural (**Rudorff et Bastita, 1990**) sont alors prises en compte.

Ainsi pour estimer la biomasse, il faut décrire la conversion de l'énergie photosynthétiquement active en biomasse. La revue bibliographique faite par (**Fisher et al., 1995**) décrit les diverses techniques utilisées pour dériver la biomasse ou la productivité des données de télédétection. Différents types de modèle de végétation ont été utilisés en complémentarité avec la télédétection. Les modèles empiriques, reliant la production de biomasse et un indice de végétation sont difficiles à utiliser en dehors de leur domaine d'application (site et type de végétation donnés) ; en plus, les relations empiriques et les paramétrisations restent, de façon générale, insuffisantes pour décrire les mécanismes biophysiques (**Tucker et al., 1986**).

III.2.3. Taux de couverture

Le taux de couverture est une variable biophysique qui caractérise généralement la « quantité de matière » du couvert végétal. Cette variable représente donc la probabilité pour que le rayonnement solaire atteigne le sol sans avoir été intercepté par les feuilles. Elle est utilisée pour distinguer le sol de la végétation pour certains processus tels que l'évapotranspiration.

Les avancées scientifiques concernant la télédétection du contenu en azote des feuilles

découlent directement des recherches effectuées sur l'estimation de leur teneur en chlorophylle (**Haboudane et al., 2002**).

La fraction de couverture dépend de certaines caractéristiques du couvert comme l'indice de surface foliaire, et en général de sa structure (**Gitelson et al., 2001**). Le taux de couverture est une bonne mesure de la quantité de végétation présente. Sa dynamique peut être, par exemple, utilisée pour décrire la phénologie. Il est associé à de nombreux processus et il peut être utilisé comme indicateur pour moduler un certain nombre d'opérations culturales (**Baret, 1999**).

L'estimation de la couverture végétale est exigée pour modéliser la productivité végétale (**Gower et al., 1999**) et la gestion des ressources agricoles. En effet, le taux de couverture représente la majeure partie participant aux cycles du carbone (par son activité photosynthétique) et de l'eau (évapotranspiration) ; il constitue un élément de contrôle des transferts d'énergie entre la surface et l'atmosphère en conditionnant l'interception du rayonnement solaire et les émissions thermiques, les échanges gazeux entre la basse atmosphère et la surface, et en régulant l'humidité et la répartition de l'énergie reçue (**Garratt, 1993**).

Le prélèvement temporel exigé pour ces applications rend nécessaire l'utilisation des données spatiales brutes. La méthodologie la plus répandue est la corrélation entre les propriétés de la végétation avec les indices de végétation. La fraction végétale peut être estimée aussi par la technique « démixage spectral » qui permet de séparer la fraction de la couverture végétale du sol et aussi la végétation verte de la sénescence (**Adams et al., 1989**).

La technique est basée sur un modèle de réflectance spectrale qui considère que la réflectance totale de la scène est égale la somme des réflectances des différents composants de la scène. Les spectres des composants peuvent être pris des bibliothèques des propriétés spectrales connues, des mesures in situ ou être dérivés potentiellement de l'image elle-même. Une fois appliqué aux données, le résultat est une série d'images de fraction (une pour chaque teneur de couverture) qui ont le même format que l'image originale.

III.3. Relations entre les indices spectraux et la végétation

Les indices de végétation sont des combinaisons d'informations radiométriques (sommées, différences, ratios, etc.) issues de différentes longueurs d'ondes. Plusieurs études ont porté sur les relations entre ces indices de végétation et les différentes variables biophysiques du couvert végétal (biomasse, concentration en chlorophylle, LAI, etc.) (Voir revue dans **Kerr and Ostrovsky, 2003 ; Ustin, 2004**). Plus d'une douzaine d'indices de végétation existent et ont été corrélés avec différentes caractéristiques du couvert végétal.

Selon l'étude de Aitouda en 2012 qu'est citer plusieurs autres indices et peuvent être classés en trois groupes qui sont succinctement présentés dans cette étude. Parmi ces indices RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index) (**Rougean and Breon, 1995**) , Le MSR (Modified Simple Ratio) (**Chen, 1996**), Le Green NDVI (**Gitelson et Merzlyak, 1996**), NDI (Normalized Difference Index) (**McNairm et Protz, 1993**), SACRI (Soil Adjusted Corn Residue Index)(**Biard et al., 1995**), Le MTVI1 {Modified Triangular Vegetation Index 1) (**Haboudane et al., 2004**), MTVI2 {Modified Triangular Vegetation Index 2) (**Haboudane et al., 2004**), SACRI (Soil Adjusted Corn Residue Index,)(**Biard et al., 1995**), Le TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance,) (**Haboudane et al., 2002**)

Tableau III .1 : Indices de végétation calculés.

	Les indices calculés	Auteurs
1ère catégorie	$NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$ $RDVI = (PIR - R) / (PIR + R) 1/2$ $MSR = (PIR / R - 1) / (PIR / R + 1) m$ $Green NDVI = (PIR - V) / (PIR + V)$	Rouse et al., 1974 Rougean et Breon, 1995 Chen, 1996 Gitelson et al., 1996
2ème catégorie	$SAVI = (1 + L) (PIR - R) / (PIR + R + L)$ $MSAVI = PIR + 0.5 - [(PIR + 0.5)^2 - 2(PIR - R)]^{1/2}$ $EVI = 2.5 (PIR - R) / (L + PIR + C_1 R - C_2 B)$	Huete, 1988 Qi et al., 1994 Huete et al., 1999

CHAPITRE III

	$OSAVI = (1 + 0.16) (PIR - R) / (PIR + R + 0.16)$	Rondeaux et al., 1996
3 ^{ème} catégorie	$MTVII = 1.2 [1.2 (PIR - V) - 2.5 (R - V)]$	Haboudane et al., 2003
	$MTVI2 = 1.5 [1.2 (PIR - V) - 2.5 (R - V)] / [(2PIR + 1) 2 - (6PIR - 5(R) 1 / 2) - 0.5] 1 / 2$	Haboudane et al., 2003

III.3.1. Exemples de relations entre indices et caractéristiques des céréales à paille

Suite à des suivis de parcelles en blé tendre d'hiver et en blé dur pour la campagne 2015/2016 sur le département de la Charente-Maritime, 17 indices de végétation ont été testé pour l'évaluation quantitative de la biomasse en frais, de la biomasse en sec et de la teneur en azote (De Pierrepont, 2016).

Tableau III.2 : Résultats des prélèvements parcellaire (stades 3N – DFE) :

Cultures	Stats	teneur azotée (%)	Biomasse sèche (t/ha)	biomasse fraîche (t/ha)	Teneur en eau (%)
Blé dur 32 échantillons	Min	10,19	4,3 9	14,69	0,6 7
	médiane	16,27	8,3 7	33,41	0,7 2
	moyenne	16,42	8,9 0	33,28	0,7 3
	Max	24,22	15,53	60,33	0,7 9
	Coef variation	22,7%	30,1%	30,4%	3,8 %

CHAPITRE III

Blé tender 7 échantillons	Min	9,10	7,2 4	26,51	0,6 5
	médiane	16,65	9,8 3	35,04	0,7 3
	moyenne	15,75	9,6 4	35,62	0,7 3
	Max	17,94	11,22	41,52	0,7 8
	Coef variation	18,4%	13,5%	14,5%	5,4 %

III.3.1.1. Evaluation de la biomasse

Les indices **MTCI**, **RVSI** et **NDRE** ont été identifiés comme significatifs de la production en matière fraîche pour le blé dur et pour le blé tendre

Ces indices sont moins significatifs pour la matière sèche.

Des modèles polynomiaux de degré 2 ont été proposés pour l'évaluation de la matière fraîche

- avec **RVSI** et **MTCI** pour le blé dur ;
- avec **RVSI**, **MTCI** et **NDRE** pour le blé tendre **(De Pierrepont, 2016)**.

III.3.1.2. Evaluation de la teneur en azote

La majorité des indices semblent bien décrire les teneurs en azote, mieux que les biomasses, ce qui s'expliquerait par le fait que la réflectance des plantes est principalement influencée par ses pigments, surtout les pigments chlorophylliens **(De Pierrepont, 2016)**.

Pour l'évaluation de la teneur en azote, De Pierrepont, 2016 propose

- Un modèle de régression linéaire directement établi avec les quatre valeurs de réflectance pour le cas du blé dur ;
- Un modèle polynomial de degré 2 avec les indices **RVI_{ir}** et **SRI** pour le blé tendre.

CHAPITRE III

Tableau III.3 : Coefficient de corrélation obtenue pour l'évaluation de la biomasse après régression linéaire avec les indices de végétation. (De Pierrepont, 2016).

Indices	Blé dur		Blé tendre	
	Masse fraîche	Masse sèche	Masse fraîche	Masse sèche
DVI	0,13	0,02	0,55	0,57
IB	0,16	0,04	0,33	0,68
MTCI	0,62	0,48	0,88	0,13
MSAVI	0,09	0,01	0,65	0,47
NDRE	0,49	0,28	0,82	0,09
NDVI	0,04	0	0,58	0,01
NGRDI	0	0,07	0,55	0,01
SRI	0,01	0,01	0,43	0
OSAVI	0,08	0	0,74	0,26
PCR	0,07	0	0,51	0,01
RV_{Ipir}	0,01	0,08	0,48	0
RV_{Ivert}	0,02	0,11	0,53	0
RVSI	0,6	0,42	0,86	0,12
RDVI	0,09	0,01	0,71	0,35
SAVI	0,1	0,01	0,67	0,46
TCARI	0,03	0,14	0,36	0
TVI	0,12	0,02	0,54	0,6

CHAPITRE III

Tableaux III.4 : Coefficient de corrélation obtenue pour l'évaluation de la teneur en azote après régression linéaire avec les indices de végétation(De Pierrepont, 2016).

N (%)	Blé dur	Blé tendre
DVI	0,52	0,09
IB	0,43	0
MTCI	0,06	0,78
MSAVI	0,55	0,2
NDRE	0,33	0,83
NDVI	0,48	0,87
NGRDI	0,49	0,7
SRI	0,61	0,83
OSAVI	0,53	0,48
PCR	0,53	0,88
RVIpir	0,57	0,75
RVIvert	0,5	0,63
RVSI	0,13	0,81
RDVI	0,54	0,35
SAVI	0,54	0,23
TCARI	0,51	0,63
TVI	0,51	0,07

CHAPITRE III

III.3.3. Evaluation de la teneur en eau

Tableaux III.5 : Coefficient de corrélation obtenue pour l'évaluation de la teneur en eau après régressionlinéaire avec les indices de végétation.

N (%)	Blé dur	Blé tendre
DVI	0,6	0,04
IB	0,49	0,03
MTCI	0,14	0,55
MSAVI	0,63	0,06
NDRE	0,46	0,59
NDVI	0,56	0,68
NGRDI	0,5	0,63
SRI	0,59	0,65
OSAVI	0,61	0,26
PCR	0,6	0,66
RVIPir	0,52	0,67
RVIVert	0,48	0,59
RVSI	0,22	0,57
RDVI	0,62	0,16
SAVI	0,6	0,08
TCARI	0,45	0,53

CONCLUSION

Au cours de notre travail, nous avons comme objectif de faire une synthèse bibliographique sur l'application de la télédétection utilisées pour la surveillance des maladies fongiques du blé.

La culture du blé occupe une place importante parmi les céréales. Cette culture est exposée aux infections naturelles pouvant conduire rapidement à la dégradation de la qualité et de la quantité des rendements. Les maladies cryptogamiques du blé telles que l'oïdium, les rouilles et la septoriose restent des principales causes de pertes de rendement en Algérie. Une attention particulière doit être prêtée pour lutter contre ces maladies avec les différentes méthodes qui existent.

La télédétection apporte une nouvelle méthode pertinente de prévention des pertes tout en limitant les charges et le temps de travail. La distinction de zones malades dans le champ de céréales relève du domaine de l'agriculture de précision. C'est un mode de gestion agricole dont l'objectif est d'optimiser le rendement et les investissements en tenant compte des variabilités qui existent au sein de la parcelle.

Références Bibliographique

- Abdelbaki A., 2012.** Utilisation des SIG et télédétection dans l'étude de la dynamique du couvert végétale dans le sous bassin versant d'oued Bouguedfine (Wilaya de Chlef). Thèse de magister. Univ Hasiba Ben Bouali, Chlef. 3-9 et 23-24p.
- Abdi Y., 2015.** Distribution spatiale des maladies fongiques du blé dur (*Triticum durum* Desf) et effet de la fusariose sur le rendement en zones semi arides de Sétif. Mémoire Magister : Génétique et amélioration des plantes. Sétif : Université Ferhat ABBAS Sétif1, 112p.
- Adams J.B., Smith M.O., Gillespie A.R., 1989.** Simple model for complex natural surfaces : a strategy for the hyperspectral era of remote sensing. Proceedings of the International. Geoscience and Remote Sensing Symposium. '89, IEEE, New York. 16- 21p.
- Ait kaki S., 2008.** Evaluation de la qualité d'un germoplasme de blé dur (*Triticum durum* Desf): appréciation de l'aptitude technologique et biochimique. Mémoire de Magistère : amélioration des plantes. Annaba : Badji Mokhtar Annaba, 123p.
- Aitouda H. 2012** Estimation des variables biophysiques des cultures et étude de l'effet du changement d'échelle sur leur variabilité spatiale. Mémoire université du Québec à Chicoutimi 51-71 p.
- Albetis De La Cruz J. L., 2018.** Potentiel des images multispectrales acquises par drone dans la détection des zones infectées par la flavescente dorée de la vigne. Mémoire de doctorat. NSciences de la Terre. Université Paul Sabatier - Toulouse III. 213 p.
- Amrani B., 2013.** Maladie : Méthode et échelle de notation des maladies et accidents divers. Bulletin des grandes cultures. ITGC. 02. 5p.
- Anderson G.L., Hanson J.D. and Haas, R.H., 1993.** Evaluating Landsat Thematic Mapper derived vegetation indices for estimating above-ground biomass on semiarid rangelands. Remote Sensing of Environment. 45, 165-175p.
- Anonyme., 1981.** Larousse agricole, publié sous la direction de Jean Michel Clément. 1207 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Anonyme., 2015.** Les maladies du blé. *Syngenta*, [en ligne], <https://www.syngenta.fr/cultures/cereales/article-fongicide/maladies-du-ble>, (consulté le 7/4/2022).
- Anonyme., 2020.** L'origine des blés modernes révélée. *Inrae*, [en ligne], <https://www.inrae.fr/actualites/lorigine-bles-modernes-revelee>, (consulté le 3/04/2022).
- Aouali S., Douici-Khalfi A., 2009.** Recueil des principales maladies fongiques des céréales en Algérie : symptômes, développement, et moyens de lutte ; ITGC, EL Harrach, Alger. 56p.
- Aouali S., et Douici-Khalfi A., 2013.** Recueil des principales maladies fongiques des céréales en Algérie : symptômes, développement et moyens de lutte. ITGC. 8-36p.
- Bacour C., 2001.** Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectance : analyses de sensibilité comparatives et configurations optimales. Thèse de doctorat de l'université Paris 7, Spécialité : Méthodes physiques en Télédétection.
- Bacour C., Breon F. M., Maignan F., 2006.** Normalization of the directional effects in NOAA - AVHRR reflectance measurements for an improved monitoring of vegetation cycles. *Remote Sensing of Environment*.102, n°3-4, 402-413 p.
- Bannari A., Morin D., Huete A.R And Bonn F., 1995.** A review of vegetation indices, *Remote Sensing Reviews*, n°13, 95-120p.
- Baret F., 1999.** Potentiel de la télédétection pour l'agriculture de précision. Conférence débat organisée par l'INRA, le Cemagref et l'ITCF au Salon International du Machinisme Agricole, Avignon, France. 8-11p.
- Baret F., Guyot G., & Major D., 1989.** TSAVI : A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation. In 12th Canadian Symposium on Remote Sensing Geoscience and Remote Sensing Symposium , 1355-1358p.
- Bariou R., 1978.** Manuel d'utilisation de télédétection. 2ème partie : les applications de la photo-interprétation dans le domaine des sciences de la terre. 29p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Bariou R., Lecamus D. et Henaff F.L., 1985.** Indices de végétation, Rennes : Centre régional de Télédétection, Université de Rennes 2 : Presses universitaires de Rennes 2.
- Ben mohamed L. M., Rouaissi A., Sebei S. Hamza et M. Harrabi., 2010.** Effet du génotype, de la date de semis, de la fertilisation azotée et potassique et des fongicides sur le développement de *Septoria tritici*. 8p.
- Benathmane S., 2005.** Les maladies des céréales à travers les wilayates de l'Est Algérien : identification et importance. Thèse ing, univ. batna 42p.
- Bettou M., Righi M., 2018.** Contribution à la lutte chimique et biologique contre l'agent causal de la tache septorienne du blé « *Zymoseptoria tritici* » *in vitro*. Mémoire Master : Microbiologie. Constantine : Université des Frères Mentouri Constantine 1, 66p.
- Biard F., Bannari A. and Bonn F., 1995.** SACRI (Soil Adjusted Corn Residue Index) : un indice utilisant le proche et le moyen infrarouge pour la détection des résidus de maïs, 17' Canadian Symposium on Remote Sensing, Sask.
- Bojanowski A., 2011.** Molecules antifongiques et activité Antagoniste de deux souches de *Pseudomonas* envers *Helminthosporium solani*, agent responsable de la tache argentée de la pomme de terre. Thèse pour l'obtention du grade de maître et sciences (M.Sc.). L'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en biologie végétale. 70p.
- Bouakaz K et Oussaid Y., 2013.** Reconnaissance et identification des principales maladies cryptogamiques du blé et de l'orge. Institut national de la protection des végétaux. ISBN: 978-9961-9523-1-3. 18p.
- Boukli H.C., 2012.** Système d'information géographique, cours et travaux pratiques, université Aboubaker Belkaid-telmcen-, Faculté technologie, Département d'Hydraulique, Polycopie intitulé 2012.
- Bousbiha S., 2019.** Synergie optique/radar pour l'estimation des états de surface continentale, thèse de doctorat. INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE DE TUNISIE 60-61p.
- Boutemour S., Oukaci L., 2019.** Contribution à l'étude de la flore fongique associée aux

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

grains de blé : influence de la méthode d'isolement et l'origine de l'échantillon. Mémoire Master : Protection des végétaux. Bouira : Université Akli Mohand Oulhadj, 91p.

Box E.O. Holben B.N. and Kalb V., 1989. Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux. *Vegetatio*, 80: 71-89p.

Branlard G., Dardevet M, Saccomano R, Lagoutte F, and Gourdon J., 2001. Genetic diversity of wheat storage proteins and bread wheat quality. *Euphytica*, 119(1):59–67p.

Camillo P.J., 1991. Using one and two layer model for evaporation estimation with remotely sensed data. In *Land Surface Evaporation, measurements and Parameterization*, Springer-Verlag (New-York), 183-197p.

Campbell, J.B. 1987. *Introduction to Remote Sensing*. The Guilford Press, New York.

CCT., 2016- Notions fondamentales de télédétection in Centre canadien de télédétection 5-7p.

Chaerle L. and Straten D.V.D., 2000. -Imaging techniques and the early detection of plant stress. *Trends in plant science* 5 (11) : 495-501p.

Chen J. M. and Black A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment*, 15 :421-429p.

Chen J., 1996. Evaluation of vegetation indices and modified simple ratio for boreal applications. *Can. J. Remote Sens.*, 22, 229-242p.

Cook J., Johnson V.A, Allan R. E., 1991. Le blé. In : Greef.M.W. (Eds). *Méthodes traditionnelles de sélection des plantes : un aperçu historique destiné à servir de référence pour l'évaluation du rôle de la biotechnologie moderne*. Organisation de coopération et de développement économiques, Belgique, 27-38p.

Danson F.M. and Curran, P.J., 1993. Factors affecting the remotely sensed response of coniferous forest plantations. *Remote Sensing of Environment*, 43, 55-65p.

Darabid D et bouchkara M.K., 2013. Extraction des différents indices de végétation à partir des images satellitaires ; licence en informatique, université Abou Bekr

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

belkaide Tlemcen 4p.

De Jong S. M. & Van der Meer, F.D., 2007. Remote sensing image analysis: including the spatial domain. Springer Science & Business Media.5.

De Pierrepont a., 2016. Faisabilité de modèles biophysiques pour l'estimation de la biomasse et de la teneur azotée du blé à partir d'images de télédétection. Chambre d'agriculture de la Charente-Maritime, ESA Purpan. Septembre 2016.

Debiton Clement., 2010. Identification des critères du grain de blé (*Triticum aestivum L.*) favorables à la production de bioéthanol par l'étude d'un ensemble de cultivars et par l'analyse protéomique de lignées isogéniques waxy. Thèse pour l'obtention du grade de docteur d'université en physiologie et génétique moléculaires. Université d'Auvergne, 276p.

Delécolle R., et Guérif, M., 1988. Introducing spectral data into a plant process model for improving its prediction ability. 4th International Colloquium on Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing. Aussois, France. 125- 127p.

Douimi R., Saadaoui EM., Jlibene M., 1996. Effets de la tache bronzée du blé sur le rendement et certaines de ses composantes : Proceedings deuxième symposium régional sur les maladies des céréales et des légumineuses alimentaires. Rabat, Maroc. 390p

Dubois G et Flodrops F., 1987. La protection de semence. AGRINAHAN, 96p

El Halim M., 2015. Apport de la télédétection pour l'évaluation de la variation des surfaces d'eau et du couvert végétal dans la plaine du Haouz depuis 1984 jusqu'à 2014, mémoire de fin d'études. Univ, Cadi Ayyad Marrakech, Maroc. 15p

Eyal Z., 1981. Integrated control of Septoria diseases of wheat. Plant Disease. 65 :763-768p

Eyal Z., Scharen A.L., Prescott J.M., Van Ginkel M., 1987. The *Septoria* diseases of wheat: concepts and methods of disease management. Mexico, D.F : CIMMYT.

Ezzahiri B., 2001. Les maladies du blé. Programme national de transfert de technologie en agriculture (PNTTA) N0 77 IAVH II.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Fallon É., 2003.** Évolution du rendement, de la proportion des calibres et du taux d'humidité des pois (*Pisum sativum* L.) destinées à la transformation. Mémoire de maîtrise en sciences de l'agriculture et de l'alimentation, Université Laval, Québec. 31-33p.
- Farih A., 1992.** Components of partial resistance, mode of inheritance of resistance to *Septoria tritici* blotch, and status of *septoria* diseases in Morocco. PhD Thèse, Oklahoma State Univ, Stillwater, USA. 89 p.
- Feillet P., 2000.** Le grain de blé. Composition, utilisation. Edition INRA, Paris, 308p.
- Fischer A., Moulin S., Guyot G., Guérif, M., Delécolle, R., X.F. Gu, Dedieu, G., and F., Baret., 1995.** Regional Yield Estimation from the Coupling of Crop Production Models and Satellite Data, Agronomie.
- Franklin J., 1986.** Thematic Mapper analysis of coniferous forest structure and composition, International Journal of Remote Sensing, vol. 7(10) : 1287-1301p.
- Fritas S., 2012.** Etude bioécologique du complexe des insectes liés aux cultures céréalières dans la région de Batna (Algérie). Thèse de Magister en Ecologie et biologie des populations. Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, 115p.
- Gao B. C., 1996.** A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment. n°58, 257-266 p.
- Garratt J.R., 1993,** Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments- a review. Journal of Climate, 6 :419-449p.
- Gastellu-Etchegorry J.-P., Demarez V., Pinel V., et Zagolski F., 1996.** Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-d vegetation canopies, Remote Sensing of Environment, 58(2) : 131-156p.
- Gausman H. W., 1985.** Plant leaf optical properties in visible and nearinfrared light, Graduate Studies, Texas Tech University (No. 29). Lubbock, Texas : Texas Tech Press, 78-88p.
- Girard MC & Girard CM., 1989.** Application de la télédétection à l'étude de la biosphère. 186p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Gitelson A. A. and Merzlyak, M. N., 1996.** Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing. *J. Plant Physiol.*, 148, 493- 500p.
- Gitelson A. A., Merzlyak M. N., Chivkunova O. B. 2001.** Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology* 74 : 38-45p
- Goward S.N., Tucker S.J. and Dye, D.G., 1985.** North American vegetation patterns observed with the NOAA-7 advanced very high resolution radiometer. *Vegetation, Grégoire C, Dondainas* 64 : 3-14p.
- Gower S. T., Kucharik, C. J. and Norman, J. M., 1999.** Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, 70, 29- 51p.
- Gyot L., 1978.** *Biologie Végétale*. Collection que sais-je, Ed. Press Universitaire de France. 127p.
- Haboudane D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., and Dextraze, L., 2002.** Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *International Journal of Remote Sensing*, 81,416- 426p.
- Haboudane D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., Strachan, I.B., 2004.** Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture, *RemoteSensing of Environment* 90: 337-352p.
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J., and Strachan, I.B. 2003.** Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies': Modeling and validation in the context of precision agriculture. *International Journal of Remote Sensing*, 90, 337- 352p.
- Haddad H., Bencherif, H., 2020.** La fusariose de l'épi chez les céréales provoquées par *Fusariumgraminearum* et *Microdochium nivale*. Mémoire Master : Microbiologie appliquée. Bordj Bou Arreridj : Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, 50p
- Hamel L., 2010.** Appréciation de la variabilité génétique des blés durs et des blés apparentés par les marqueurs biochimiques. Thèse de Magister en génomique et

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

techniques avancées des végétaux. Université Constantine 1. 83 p.

- Hobbs T.J., 1995.** The use of NOAA-AVHRR NDVI data to assess herbage production in the arid rangelands of Central Australia. *International Journal of Remote Sensing*, 16 : 1289-1302p.
- Huete A. R., 1988.** A soil vegetation adjusted index (SAVI). *International Journal of Remote Sensing*, 25, 295-309p.
- Huete A.R., Justice C.O., Van Leeuwen W., 1999.** MODIS Vegetation Index (MOD 13), EOS MODIS Algorithm-Theoretical Basis Document, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland 20771.
- Hunt E. R., Rock B. N., 1989.** Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*. n°30, 43-54 p.
- Inoue Y., 2016.** Simple and robust methods for remote sensing of canopy chlorophyll content : a comparative analysis of hyperspectral data for different types of vegetation. *Plant, Cell Environ.* 39(12), 2609–2623p.
- Jacquemin L., 2012.** Production d'hémicelluloses de pailles et de sons de blé à une échelle pilote Étude des performances techniques et évaluation environnementale d'un agro procédé. Thèse de doctorat en Sciences des Agroressources. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse). 345p.
- Jakubauskas, M.K. and Price, K.P., 1997.** Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone lodgepole pine forest. *Photogram. Eng. Rem. Sens.* 63, 1375-1381p.
- Jlibene M., 2011.** Options génétiques d'adaptation du blé tendre au changement climatique. Variétés à résistance multiple : sécheresse, cécidomyie, septoriose, rouilles brune et jaune, INRA, maroc, 62p
- Jordan C. F., 1969.** Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, 50, 663-666p.
- Kaufman Y.-J. And Tanré, D.-C., 1992.** Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 2, 261-270p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Kerr, J.T., Ostrovsky, M., 2003.** From space to species: ecological applications for remote sensing. *Trends in Ecology & Evolution* 18, 299-305p.
- Kimes D. S. and J. A. Kirchner., 1982.** Radiative transfer model for heterogeneous 3-D scenes. *Applied Optics* 21(22) : 4119-4129p.
- King J.E., Cook R. et Melville S.C., 1983.** A review of Septoriadisease of wheat and barley. *Ann. Appl. Bio.* 103, 345-373p.
- Koch B., Ammer U., Schneider T. & Wittmeier H., 1990.** Spectroradiometer measurements in the laboratory and in the field to analyse the influence of different damage symptoms on the reflection spectra of forest trees. *Int. J. Remote Sens.* 11(7), 1145–1163p.
- Krieger F., Malila W., Nalepka R., Richerdson W., 1969.** Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In : *Proc. Of the 6th Int. Symp. On Remote Sensing of Environment*, 97-131 p.
- Krupinsky J.M., 1999.** Influence of cultural practices on Septoria / Stagonosporadiseases. *Proceeding of the 5th international Septoria Workshop. Septoria and Stagonosporadiseases of cereals: a compilation of global research.* 20-24 September. CIMMYT, Mexico. 105-110p.
- Lacroix., 2002.** Maladies des céréales et de la luzerne : diagnostique, dépistage et prévention. 24p.
- Laffont J., 1985.** les maladies des céréales et du maïs. *AGRI-NAHAN.* 4-51p
- Lawandi K, 2006.-** Etude de la dynamique des aires pastorales dans le département de Gouré : apport de la télédétection et du SIG 4-8p.
- Lepoivre p., 2003.** Phytopathologie : bases moléculaire et biologiques des pathosystèmes et fondement des stratégies de lutte. Edition : les presses agronomiques de GEMBLOUX :291-292p.
- Lichtenthaler H. K., Wenzel O., Buschmann C. and Gitelson A., 1998.** Plant stress detection by reflectance and fluorescence. *Annals of the New-York Academy of sciences* 851 : 271- 285p.
- Maas, S.J., Jackson, R.D., Idso, S.B., Pinter, Jr, P.J., Reginato, R.J., 1989.** Incorporation of remotely sensed indicators of water stress in a crop growth

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

simulation model. Proc. Of the 19th Conference on Agriculture and forest Meteorology, 7th-10th March 1989, Charleston, S. Carolina, Published by American Meteorological Society, Boston, Mass.,228-231p.

Masson E., 2012. Diagnostic des accidents du blé tendre. ARVALIS-Institut du végétal.36-40p.

McNairn, H. and Protz, R., 1993. Mapping Corn Residue Cover on Agricultural Fields in Oxford County, Ontario, Using Thematic Mapper. Canadian Journal of Remote Sensing, vol. 19, no 2, 152-159p.

Migné-Fouillen V., 2011. Méthodologie utilisée pour la détermination de normes de qualité environnementale (NQE) ; rapport INERIS DRC-11-118981 08866A ; 34p.

Moran M. S., Clarke T.R., Inoue Y. and Vidal A., 1994. -Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. Remote sensing of environment 49 (3): 246-263p.

Mosiniak Michèle., Prat Roger et Claude Roland Jean., 2006. Deblé ou pain. Université Pierre et Marie Curie.
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/blepain/1ble/11plant/plante.htm>.

Nasraoui B., 2006. Les Champignons Parasites Des Plantes Cultivées, Biologie, Systématique, Pathologie, Maladies. Chapitre 4 : Maladies. Centre de Publication Universitaire, Tunis. 363-427p.

Naville M., 2005. La biodiversité des espèces cultivées : Analyse dans le cas du blé, Paris : Université Paris XI, Paris, 20p.of the Silk Road, Canadian journal of plant pathologie. 388pp.

Paruelo J.M., Epstein H. E., Lauenroth, W. K. and Burke, I. C., 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the U.S. Ecology, 78, 953-958p.

Paruelo J.M., Oesterheld, M., Di Bella, C,M., Arzadum, M., Lafontaine, J., Cahuepé, M, et Rebella, CM., 2000 (a). Estimation of primary production of sub-humid rangelands from remote sensing data. Applied Vegetation Science 3, 189-195.

Pinty B. and M.M. Verstraete., 1992. GEMI : a non linear index to monitor Global vegetation from satellites. Vegetatio, 111 : 15-20p.

Prescott J.M., Burnett P A, Saari E E., Ransom J., Bowman J., De millianow., Singh

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- R P., Bekele G., 1987.** Maladies et ravageurs du blé. Guide identification au champ. CIMMYT, Mexico. 135p.
- Prince S.D., 1991.** A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1313-1330p.
- Privette J.L., W.J. Emery, and D.S. Schimel, 1996.** Inversion of a vegetation reflectance model with NOAA- AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 58 :187-200p.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A.R., Kerr Y.H., Sorooshia S., 1994.** A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48: 119-126p.
- Rapilly F., 1991.** L'épidémiologie en pathologie végétale des mycoses aériennes. Eds. INRA, Paris. 337 p.
- Régie des Assurances agricoles du Québec., 1997.** Le mesurage des champs par ordinateurs. Nouvelle méthode, Gouvernement du Québec.
- Richardson A.J., Wiegand C.L., 1977.** -Distinguishing vegetation from soil background information, *photogrammetric engineering and remote sensing*, 1541-1552 p.
- Rondeaux, G., Steven, M. and Baret, F., 1996.** Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 55, 95- 107p.
- Rosenberg N.J., B.L. Blad, and S.B. Verma., 1983.** Microclimate: The biological environment. Wiley-Interscience, New York, 255-257p.
- Rougean J. -L. et Breon F. M., 1995.** Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sens. Environ.*, 51, 375- 384p.
- Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. and Harlan J. C., 1974.** Monitoring the vernal advancements and rétrogradation of natural vegetation. In : NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA. 1-137p.
- Roy P.S. and Ravan, S.A., 1996.** Biomass estimation using satellite remote-sensing data -an investigation on possible approaches for natural forest. *Journal of Biosciences* 21,535- 561p.
- Rudorff B.F.T. and Batista G.T., 1990.** Yield Estimation of Sugarcane Based on Agrometeorological-Spectral Models. *Remote Sensing of Environment*, 33, 183-192p.
- Running S.W., 1990.** Estimating Terrestrial Primary Productivity by Combining Remote

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Sensing and Ecosystem Simulation. Book : Remote Sensing of Biosphere Functioning. Chapter: 4. Editors: R. H. Hobbs and H. A. Mooney, 65-86p.
- Safer T., Rahmani Y., 2015.** Efficacité de quelques fongicides sur les maladies fongiques du blé dur transmises par les semences. Mémoire de Master : Production végétale et Environnement. Msila : Université Mohamed Boudiaf, 75p.
- Sala O. E., Parton, W. J., Joyce, L. A. and Lauenroth, W. K., 1988.** Primary Production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, 69 : 40-45p.
- Sandholt I., Rasmussen K. and Andersen J., 2002.** A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. In: *Remote Sensing of Environment*, 79 (2-3), 213-224p.
- Sante Canada, 2015.** Projet de décision d'homologation PRD2015-14, Spiroxamine. www.sc-hc.gc.ca.
- Schröder J.J., Neeteson J.J., Oenema O. and Struik P.C., 2000.** Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production, Reviewing the state of the art. *Field Crops Research* 66 : 151-164p.
- Sellers P.J., S. O. Los, C. J. Tucker, C. O. Justice, D. A. Dazlich, G. J. Collatz et D. A. Randall., 1994.** A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies. Part 2 : The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI. *International journal of Remote Sensing.*, 15, 3519-354p
- Sellers P.J., Y. Mintz, Y.C. Sud, et A. Dalcher., 1986.** A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 43, 505- 531p.
- Shipton W., Boyd W., Roseille A. et SharenB., 1971.** The common Septoria diseases of wheat. *Bot. Rev.* 27, 331-334p.
- Sims P., Singh, J. S. and Lauenroth, W.K., 1978,** The structure and function of western North American grassland. *Journal of Ecology*, 66, 251-85p.
- Syngenta., Oïdium blé. (2015).** In : SYNGENTA France. Disponible sur : <https://www.syngenta.fr/traitements/oidium-sur-ble-ou-orge> (11/01/2022).
- Tucker C. J. 1979.** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment* 8, 127–150p.
- Tucker, C.J., Fung, I.Y., Keeling, CD. And R.H., Gammon, 1986.** Relationships between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index. *Nature*, 319 :195- 199.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- Ustin S., 2004.** Remote Sensing for Natural Resource Management and Environmental Monitoring. Manual of Remote Sensing, Volume 4. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons.
- Vertucci C.W., 1989.** The kinetic of seeds imbibition controlling factors and relevance to seedling vigor. In : —Seed Moisture, CSSA special publication, 14: 93 -115p.
- Verville J.L., 2003.** Le blé, le seigle et le triticale. 18p
- Vogt J. V., Niemeyer S., Somma F., Beaudin I. and Viau A.A., 2000.** Drought monitoring from space. Drought and drought mitigation in Europe. J. V. V. a. F. S. editors, Kluwer Academic Publishers. 14 : 167-183p.
- Wahabzada M., Mahlein A., Bauckhage C. & Steiner U., 2015.** Metro Maps of Plant Disease Dynamics — Automated Mining of Differences Using Hyperspectral Images. PLoS One 10(1), 1–21p
- Yezli W., 2010.** Étude morphologique, Pouvoir pathogène et activité protéolytique chez *Fusarium oxysporum* f. sp. *Albedinis*. These de Magister en Microbiologie Appliquée Option : Phytatrie et Phytopharmacie. UNIVERSITÉ D'ORAN. 53p.
- Zahri S., Farih A., Douira A., 2014.** Statut des principales maladies cryptogamiques foliaires du blé au Maroc en 2013. Journal of Applied Biosciences[en ligne], 77:6543 – 6549 <https://www.ajol.info/index.php/jab/article/view/105785> (30/01/2022)
- Zhao S. et al., 2016.** Estimating and Validating Wheat Leaf Water Content with Three MODIS Spectral Indexes?: A Case Study in Ningxia Plain, China. J. Agric. Sci. Technol. 18, 387–398p.

Résumé

Le blé est l'une des principales cultures et le produit agricole le plus important dans le monde. Il est susceptible d'être attaqué par des maladies cryptogamiques qui peuvent diminuer le rendement de ce dernier.

Notre travail consisté à l'étude de la télédétection en agriculture qui permet de spatialiser celles-ci en mettant en évidence la correspondance entre les caractéristiques biophysiques des propriétés optiques des plantes des images agricoles,

L'objectif général de cette étude est de développer cet outil qui nous permet de détecter et surveiller le blé par des satellites et appliquer des indices de végétation basés sur l'imagerie visible proche infrarouge.

Mots clés : Blé, maladies cryptogamiques, télédétection, satellites, indices de végétation

Abstract

Wheat is one of the main crops and the most important agricultural product in the world. It is likely to be attacked by fungal, diseases which can reduce the performance of the latter.

Our work consists of the study of remote sensing in agriculture which makes it possible to spatialize these by highlighting the correspondence between the biophysical characteristics of the optical properties of plants in agricultural images,

The general objective of this study is to develop this tool which allows us to detect and monitor wheat by satellites and apply vegetation indices based on visible near infrared.

Keywords: Wheat, fungal, diseases, remote sensing, satellites, vegetation indices.

ملخص

القمح هو أحد المحاصيل الرئيسية وأهم منتج زراعي في العالم. وقد يتعرض للإصابة بالأمراض الفطرية التي يمكن أن تقلل من مردود هذا الأخير.

يتكون عملنا من دراسة الاستشعار عن بعد في الزراعة مما يجعل من الممكن تخصيصها من خلال إبراز التطابق بين الخصائص الفيزيائية الحيوية للخصائص البصرية للنباتات في الصور الزراعية.

الهدف العام من هذه الدراسة هو تطوير هذه الأداة التي تسمح لنا باكتشاف ومراقبة القمح بواسطة الأقمار الصناعية وتطبيق مؤشرات الغطاء النباتي بناءً على الصور المرئية القريبة من الأشعة تحت الحمراء.

الكلمات المفتاحية: القمح، الفطريات، الاستشعار عن بعد، الأقمار الصناعية، مؤشرات الغطاء النباتي.