

MINISTERE 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.AGRO/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
EN VUE D'OBTENTION DU DIPLOME MASTER

Domaine : SNV

Filière : Sciences Agronomiques

Spécialité : Protection des végétaux

Présenté par :

REBIAI Mohamed

*Étude du potentiel des indices spectraux de
télédétection pour la détection de l'apparition
précoce des maladies des plantes*

Soutenu le : 01 / 07 / 2021

Devant le jury composé de :

KHERRAZ Karim

M.A.A

Univ. de Bouira

Président

LIBDIRI Farid

M.A.A

Univ. de Bouira

Examineur

LAMINE Salim

M.C.A

Univ. de Bouira

Promoteur

Année Universitaire : 2020/2021

Dédicaces

Un super merci pour ma Mère vous être la super femme qui amicotapositivement ma vie pondant des années.

Un grand merci pour mon chère Papa à tes efforts que vous être et tesencouragements dans tous mes étapes de ma vie.

A mon très cher frère : **ABDENAFAA**

A tous ma promo et mes chers collages : **HADJOUT SALEM ,
GACEM CHERIF , BAKIRI SAID.**

A tous ceux qui ont contribué à ma formation.

Remerciements

Je remerciai Dieu le tout puissant pour le souffle de vie qu'il nous a accordé, de nous avoir donné la force et le courage pour dépasser toutes les difficultés afin de réaliser ce travail.

Je tente à exprimer nos remerciements les plus profonds et les plus chaleureux à **Mr LAMINE S**, maître assistant à la faculté SNVST de l'université **AKLI MOHAND OULHADJ** de Bouira pour avoir suivi et dirigé ce travail, pour sa disponibilité et tous les précieux conseils qu'elle nous a prodigué tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remerciai **LIBDIRI F et KHERRAZ K**, maîtres assistants à la faculté SNVST de l'université de Bouira pour avoir accepté de présider le jury.

Encore un grand merci pour les deux spécialités : Protection Des Végétaux et Phytopathologie à noter Souvenir qui on a passé ensembles.

Nous remercions également toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des tableaux

Tableau 1: Quelque bénéfice environnemental attendus des principaux procédés et techniques de l'agriculture de précision. _____ **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des figures :

Figure 1: Interactions rayonnement-cible	4
Figure 2: <i>Interactions</i> réflexion spéculaire et diffuse	5
Figure 3 : le reflectement des ondes sur la chlorophylle	6
Figure 4: l'absorption et la désorption avec l'eau	7
Figure 5: graphe significatif à propos de la végétation et l'eau	7
Figure 6 : valeur de l'indice de végétation NDVI, croissantes du gris au vert foncé	8
Figure 7: Mesure du taux de couverture végétale sur site à sols sableux en Afrique sahélienne : (a) saison sèche, (b) saison humide	9
Figure 8: Evolution moyenne de l'indice de végétation satellitaire (NDVI-AVHRR) sur la période 1981-2011	10
Figure 9: L'image suivante et une illustration des trois étapes du concept de l'agriculture de précision (Cambouris et all., 2014).	25
Figure 10: L'image suivante et une illustration des fonctions de l'agriculture de précision.	26
Figure 11: L'image suivante est une illustration des Composants d'un système de cartographie des rendements..	28
Figure 12: L'image suivante et une illustration du spectre électromagnétique de l'infrarouge thermique.	29
Figure 13: L'image suivante et une illustration des différent type de drone ou systèmes d'hélicoptères à hélices.	36
Figure 14: L'image suivante et une illustration des différent type de drone ou systèmes les plates-formes à voile fixe.	36
Figure 15: : signature spectrale de la végétation de 0,4 à 2,6 um	47
Figure 16: : mesure de réflectances sur une feuille verte, malade et desséchée.	48
Figure 17: Influence des stress sur les variables d'état de la plante.	4
Figure 18: Application de télédétection par aéronefs sans pilotes	4
Figure 19: : Variation des valeurs pour les classes et non malade du MSAVI 2 sur l'ensemble des champs.	4
Figure 20: Classification par maximum de vraisemblance des zones malades (en rouge) selon chaque indice de végétation sur une même parcelle de pomme de terre survolée en Montérégie.	4
Figure 21: Exemple d'une classification du MSAVI 2 pour identifier les zones affectées par une maladie dans une parcelle des pommes de terre en Montérégie.	4

Sommaire :

<i>Introduction</i>	<u>1</u>
<i>Chapitre 01 : La télédétection :</i>	<u>3</u>
<i>Application de la télédétection en agriculture</i>	<u>3</u>
<i>Pourquoi la télédétection?</i>	<u>3</u>
. Interactions rayonnement-cible	<u>4</u>
<i>Surveillance des cultures et évaluation des dommages :</i>	<u>17</u>
Pourquoi la télédétection?	Erreur ! Signet non défini.
<i>Chapitre 02 : l'agriculture de précision</i>	Erreur ! Signet non défini.
1- <i>Histoire et généralité :</i>	Erreur ! Signet non défini.
2- <i>Définition et concepts de l'agriculture de précision (AP) :</i>	Erreur ! Signet non défini.
3- <i>Les fonctions de l'agriculture de précision :</i>	Erreur ! Signet non défini.
4- <i>Techniques d'agriculture de précision :</i>	Erreur ! Signet non défini.
A. Principe de l'imagerie infrarouge thermique :	Erreur ! Signet non défini.
• Loi de Planck : Le physicien Max Planck en 1900 a montré par l'équation 1 que l'énergie émise (luminance spectrale) par un corps noir dépendait uniquement de sa température (équation 1).	Erreur ! Signet non défini.
<i>l'agriculture de précision</i>	<u>20</u>
5- <i>Histoire et généralité :</i>	<u>20</u>
6- <i>Définition et concepts de l'agriculture de précision (AP) :</i>	<u>24</u>
7- <i>Les fonctions de l'agriculture de précision :</i>	<u>26</u>
8- <i>Techniques d'agriculture de précision :</i>	<u>27</u>
B. Principe de l'imagerie infrarouge thermique :	<u>29</u>
C. Utilisation de l'IRT pour la détection du stress hydrique :	Erreur ! Signet non défini.
D. Télédétection par drones dans l'agriculture :	Erreur ! Signet non défini.
1. <i>Généralité et définition :</i>	Erreur ! Signet non défini.
2. <i>Drones : classification, avantages et limites :</i>	Erreur ! Signet non défini.
➤ <i>Classification des drones Dans la littérature :</i>	Erreur ! Signet non défini.
➤ <i>Avantages et limites des drones :</i>	Erreur ! Signet non défini.
3. <i>L'application des drones agriculture :</i>	Erreur ! Signet non défini.
E. Données agro-météorologiques :	Erreur ! Signet non défini.

9- <i>Bénéfices environnementaux attendus des principaux procédés et techniques de l'agriculture de précision :</i>	_____	Erreur ! Signet non défini.
10- <i>L'influence de l'agriculture de précision sur les pratiques de travail et les conditions de vie sur les terres agricoles :</i>	_____	Erreur ! Signet non défini.
11- <i>Compétences et formation des agriculteurs pour la maîtrise de l'agriculture de précision :</i>	_____	Erreur ! Signet non défini.
12- <i>Pourquoi pas une assistance politiques pour facilite l'agriculture de précision :</i>		Erreur ! Signet non défini.
F. Utilisation de l'IRT pour la détection du stress hydrique :	_____	34
G. Télédétection par drones dans l'agriculture :	_____	34
4. <i>Généralité et définition :</i>	_____	34
5. <i>Drones : classification, avantages et limites :</i>	_____	35
➤ Classification des drones Dans la littérature :	_____	35
➤ Avantages et limites des drones :	_____	37
6. <i>L'application des drones agriculture :</i>	_____	38
H. Données agro-météorologiques :	_____	39
13- <i>Bénéfices environnementaux attendus des principaux procédés et techniques de l'agriculture de précision :</i>	_____	40
14- <i>L'influence de l'agriculture de précision sur les pratiques de travail et les conditions de vie sur les terres agricoles :</i>	_____	43
15- <i>Compétences et formation des agriculteurs pour la maîtrise de l'agriculture de précision :</i>	_____	43
16- <i>Pourquoi pas une assistance politiques pour facilite l'agriculture de précision :</i>	__	44
3. <i>Le comportement spectral de la végétation</i>	_____	46
2.4. <i>Les aéronefs sans pilote Les ASP :</i>	_____	48
<i>Les ASP en agriculture :</i>	_____	51
<i>Extraction des valeurs spectrales :</i>	_____	52
3.7. <i>Analyse technico-économique :</i>	_____	54
4.4. <i>Analyse technico-économique :</i>	_____	57
5.2. <i>Traitements</i>	_____	58
5.2.1. <i>Extraction des valeurs spectrales :</i>	_____	58
5.2.3. <i>Production de cartes de dépistage :</i>	_____	59

Introduction

Apparue il y a 10 000 ans, l'agriculture consiste à se servir d'un milieu comme support à une production alimentaire (Déry, 2007). Au cours de l'histoire, cette révolution a été marquée par la mécanisation des outils puis la motorisation des engins. Ces étapes ont permis de faciliter le travail des agriculteurs et d'augmenter la productivité des cultures. Aujourd'hui, plus de 45 % de la population active mondiale travaille dans le domaine de l'agriculture (Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, 2006)

Le développement des nouvelles technologies dans le domaine agricole est une volonté affirmée ; L'utilisation de la géomatique en agriculture a permis l'émergence de l'agriculture de précision, c'est-à-dire la mise en place d'une gestion des parcelles par le biais d'outils d'analyse spatiale (systèmes d'informations géographiques, télédétection satellitaire). L'utilisation de la géomatique et 2 des technologies récentes, en constante évolution, dans le domaine agricole vise à réduire les impacts économiques et écologiques négatifs de la gestion des parcelles en réduisant les contaminations liées à une utilisation excessive des intrants (Grimaudo, 2009). La télédétection permet de mettre en relation les composantes biophysiques de la culture étudiée avec les propriétés optiques (visible proche infrarouge) et thermiques des images obtenues (Berni et al., 2009). Les caractéristiques biophysiques, telles que la température de surface ou la concentration de chlorophylle, sont mesurables à partir des valeurs des pixels de l'image acquise ce qui permet d'identifier et de localiser des stress problématiques dans les cultures (Daumard, 2010). Les limites de l'acquisition des images satellites résident dans la fréquence de passage d'un satellite au-dessus d'un point donné. De plus, la résolution spatiale, qui vient s'ajouter à la résolution temporelle, sont souvent trop faibles vis à vis des besoins dans le domaine agricole. La résolution spatiale des capteurs satellitaires est notamment trop limitée pour l'analyse de la variabilité intra-parcellaire (Xiang et Tian, 2011). Enfin, la difficulté des agriculteurs à utiliser eux-mêmes cette technologie sans l'aide de spécialistes en télédétection est une limitation à l'utilisation d'images satellites

Afin d'améliorer la fréquence d'acquisition et la résolution spatiale de l'imagerie, les ASP sont de plus en plus utilisés, notamment en agriculture de précision mais également dans tous les domaines d'applications environnementales (Laliberté et al., 2009; Zarco-Tejada et al., 2014 ; Shahbazi et al., 2014). La capacité des ASP à voler fréquemment permet notamment d'effectuer le suivi des cultures tout au long de leur saison de croissance. Les recherches liées à l'étude de la végétation à l'aide d'ASP ont montré les potentialités

d'application de ces outils dans les études portant sur la biomasse, les changements temporels de la végétation ou le développement de stratégies de gestion agricole (Shahbazi et al., 2014 ; Huang et al., 2013 ; Bendig et al., 2013). Les ASP assurent des missions de terrain de manière sécuritaire, flexible et à faible coût (Rango et al., 2006). En agriculture, de nombreuses études récentes montrent que l'utilisation des ASP couplée à l'emploi de capteurs à haute résolution spectrale peut répondre aux attentes agricoles sur la majorité des types de cultures (Bachmann et al., 2013 ; Pena et al., 2013; Hunt et al., 2010; Zarco-Tejada et al., 2014). Les différents types d'ASP permettent de répondre à un grand nombre d'attentes en terme de capacités de vol : fréquences, altitude, distance de vol, charge utile, etc. Les efforts pour développer les ASP sont principalement concentrés sur la conception des plateformes qui vont recevoir les capteurs. Cependant, les parties d'acquisition et de traitement de l'imagerie sont sous-exploitées (Shahbazi et al., 2014). Les produits finis disponibles sont le plus souvent peu adaptés aux attentes des professionnels spécialisés en agriculture. Un produit fini facilement transférable aux agronomes et agriculteurs est essentiel pour assurer son applicabilité.

Les stress hydriques et la vigueur de la végétation sont également deux phénomènes très étudiés. La connaissance de la croissance végétale est nécessaire pour une gestion optimale de la culture (Atzberger, 2013). Cette connaissance est utilisée pour établir des périodes de conditions favorables ou non à l'établissement d'un stress hydrique (Rembold et al., 2013). Dans la plupart des études, les méthodes consistent à utiliser les valeurs de précipitations annuelles afin de prévoir les périodes potentielles de sécheresses en établissant des relations avec l'imagerie (Atzberger, 2013). Le suivi du développement phénologique est très complexe, Zhang et al. (2003) identifient les dates de transitions phénologiques à l'aide d'un modèle logistique. Les calendriers précis des stades de développement permettent de modéliser et estimer les rendements avec précision (Wang et al., 2014 ; Sakamoto et al., 2005). Un développement phénologique anormal d'une culture peut-être également corrélé avec la présence d'une plante invasive (Bethany, 2014). Enfin, la cartographie des parcelles agricoles et des changements d'occupation du sol sont également des actions réalisables à l'aide de la télédétection. Par exemple, Vannier (2011) a montré la dynamique de l'occupation du sol d'un territoire agricole à l'aide d'images satellitaires MODIS de 2001 à 2008. À partir de ces analyses, des scénarios à partir de modèles sont développés afin d'appliquer une gestion agricole, économique et environnementale à long terme du parcellaire (Galford et al., 2008).

Il est donc possible d'estimer la masse végétale au sol, de décrire l'état phénologique de la culture, ou même de prévoir les rendements sur une parcelle à l'aide de la télédétection (Wang et al., 2012 ; Mishra et al., 2013 ; Xu et al., 2011). Cela permet de mettre en place une gestion soutenue des interventions sur les parcelles tout au long de sa saison de croissance. Pour cela, il est important d'obtenir des images rapidement, à intervalles rapprochés et à une résolution spatiale en cohérence avec l'analyse.

Chapitre I :

Téledetection

Chapitre 01 : La télédétection :

D'après **BAGDADI et al. , 2018** la télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent de caractériser des objets à distance à partir des rayonnements qu'ils émettent et/ou qu'ils réfléchissent.

Application de la télédétection en agriculture

Selon Bruno tisseyre : La télédétection est une technique en pleine phase d'adoption en agriculture, que ce soit en Algérie ou dans les autres pays du monde. Si l'on s'intéresse uniquement aux services d'aide au pilotage des cultures ; en 2013, 700 000 ha de céréales et d'oléagineux étaient observés par satellite en France. On estime ce chiffre à environ 4 millions d'hectares dans le monde (en incluant les services d'aide au pilotage dédiés à des cultures comme le soja, le coton, le maïs, etc.). De manière concomitante, se développent des services avec d'autres plateformes de télédétection comme les drones. La télédétection se développe également sur des cultures à plus forte valeur ajoutée comme la viticulture et l'arboriculture dans tous les bassins de production du monde.

Pourquoi la télédétection?

La télédétection offre une méthode sûre et efficace de cueillette d'information dans le but de cartographier le type et de calculer la superficie des cultures. En plus d'offrir une vue synoptique, la télédétection peut fournir des informations sur la structure et la santé de la végétation.

La réflectance spectrale d'un champ varie selon le stade phénologique (stade de croissance), le type de plantes et leur état de santé. Les micro-ondes sont sensibles à l'alignement, la structure et la quantité d'eau présente dans les plantes et dans le sol, et peuvent fournir de l'information complémentaire aux données optiques.

L'intégration de ces deux types de données augmente l'information disponible pour distinguer la signature spectrale de chaque classe et permet donc une classification plus juste. Les résultats de l'interprétation des données de télédétection peuvent être intégrés dans un système d'information géographique (SIG) et dans un système de gestion des cultures, et peuvent aussi être combinés à des données auxiliaires pour fournir de l'information sur les droits de propriété, les pratiques de gestion, etc. l'exigences des données pour l'identification et la cartographie des récoltes bénéficie de l'utilisation des images multi temporelles qui facilitent la classification en tenant compte des changements dans la réflectance des plantes durant leur croissance. Les données multi temporelles ont besoin de capteurs calibrés et d'images prises fréquemment durant la saison de croissance. Par

exemple, les cultures de canola sont habituellement plus faciles à identifier lors de la floraison à cause du changement de la réflectance spectrale.

Les données multi-capteurs sont aussi utiles, car elles augmentent la précision de la classification en fournissant plus d'information qu'un seul capteur ne peut le faire, les images couleurs infrarouges montrent le contenu en chlorophylle des plantes et la structure du couvert végétal, tandis que les images radars fournissent des informations sur la structure des plantes et sur le taux d'humidité.

Dans les régions nuageuses et brumeuses, le radar est un excellent outil pour l'observation et la différenciation des cultures, car il est un capteur actif qui émet des rayonnements de longues longueurs d'onde plus grandes qui pénètrent facilement la vapeur d'eau atmosphérique. (centre de télédétection)

. Interactions rayonnement-cible

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber (A) l'énergie, la transmettre (T) ou réfléchir (R) l'énergie incidente. L'énergie incidente totale interagira avec la surface selon l'une ou l'autre de ces trois modes d'interaction ou selon leur combinaison. La proportion de chaque interaction dépendra de la longueur d'onde de l'énergie, ainsi que de la nature et des conditions de la surface.

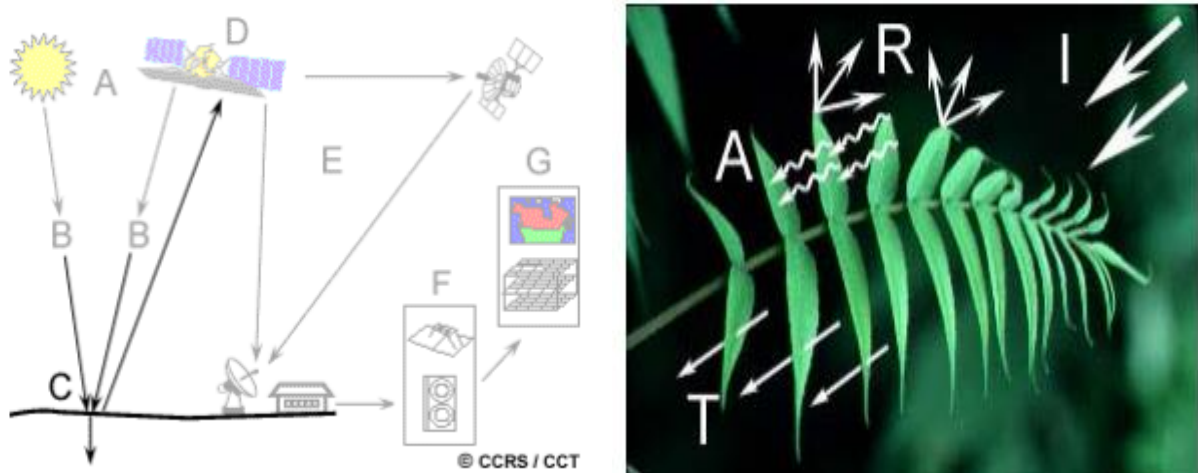


Figure 1: Interactions rayonnement-cible

L'absorption (A) se produit lorsque l'énergie du rayonnement est absorbée par la cible, la transmission (B) lorsque l'énergie du rayonnement passe à travers la cible et la réflexion (C) lorsque la cible redirige l'énergie du rayonnement. En télédétection, nous mesurons le

rayonnement réfléchi par une cible. La réflexion spéculaire et la réflexion diffuse représentent deux modes limites de réflexion de l'énergie.

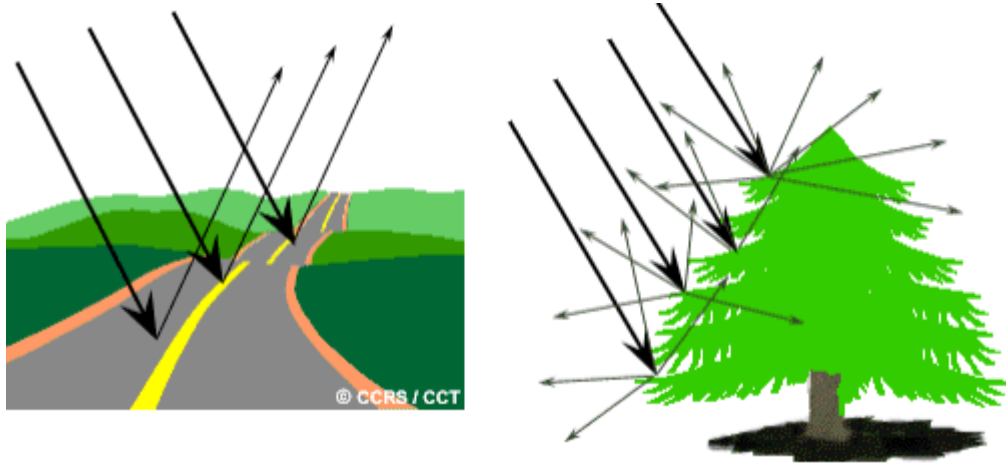


Figure 2: Interactions réflexion spéculaire et diffuse

Une surface lisse produit une réflexion spéculaire, c'est-à-dire que toute l'énergie est redirigée dans une même direction (comme c'est le cas d'un miroir). La réflexion diffuse se produit quand la surface est rugueuse, ce qui redirige l'énergie uniformément dans toutes les directions. La plupart des objets de la surface terrestre se situent entre ces deux extrêmes. La façon dont une cible réfléchit le rayonnement dépend de l'amplitude de la rugosité de la surface par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident. Si la longueur d'onde du rayonnement est beaucoup plus petite que la rugosité de la surface ou que la grosseur des particules qui composent la surface, la réflexion diffuse domine. Par exemple, un sable fin paraît uniforme aux rayonnements à grandes longueurs d'onde, mais rugueux aux longueurs d'onde visibles.

Examinons quelques exemples de cibles de la surface de la Terre et voyons comment l'énergie aux longueurs d'onde visible et infrarouge interagit avec celles-ci.

Les feuilles : la chlorophylle, une molécule que nous retrouvons à l'intérieur des feuilles, absorbe fortement le rayonnement aux longueurs d'onde du rouge et du bleu, mais réfléchit le vert. Les feuilles, qui contiennent un maximum de chlorophylle en été, sont donc plus vertes pendant cette saison. En automne, les feuilles qui contiennent alors moins de chlorophylle,

absorbent moins de rouge, et paraissent donc rouges ou jaunes (le jaune est une combinaison des longueurs d'onde du vert et du rouge). La structure interne des feuilles en santé agit comme un excellent réflecteur diffus pour les longueurs d'onde de l'infrarouge. Si nos yeux pouvaient percevoir l'infrarouge, les feuilles paraîtraient très éclatantes sous ces longueurs d'onde. Les scientifiques utilisent d'ailleurs l'infrarouge pour déterminer l'état de santé de la végétation.

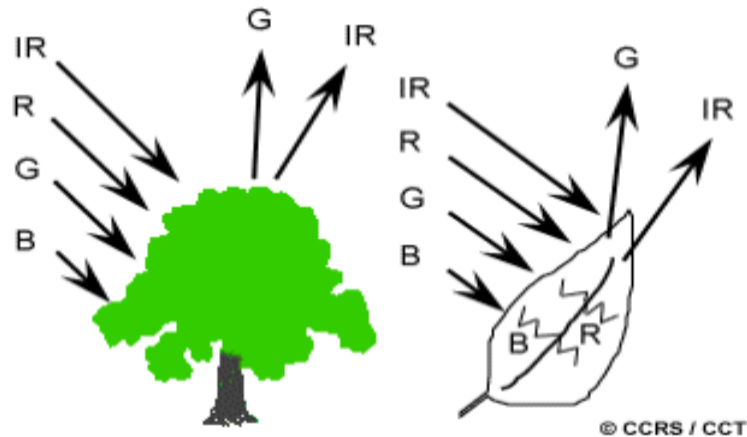


Figure 3 : le reflectement des ondes sur la chlorophylle

- **L'eau :**

L'eau absorbe davantage les grandes longueurs d'onde du rayonnement visible et du proche infrarouge. Ainsi, l'eau paraît généralement bleue ou bleu-vert car elle réfléchit davantage les petites longueurs d'onde, elle paraît encore plus foncée si elle est observée sous les longueurs d'onde du rouge ou du proche infrarouge. Lorsque les couches supérieures de l'eau contiennent des sédiments en suspension, la transmission diminue, la réflexion augmente et l'eau paraît plus brillante. La couleur de l'eau se déplacera légèrement vers les plus grandes longueurs d'onde. Nous confondons parfois l'eau qui contient des sédiments en suspension avec l'eau peu profonde et claire, car ces deux phénomènes paraissent très semblables. La chlorophylle dans les algues absorbe plus de bleu et réfléchit plus de vert. L'eau paraît donc plus verte quand elle contient des algues. L'état de la surface de l'eau (rugueuse, lisse, vagues, débris flottants, etc.) peut aussi susciter des problèmes dans l'interprétation à cause de la réflexion spéculaire et des autres influences sur la couleur et la brillance.

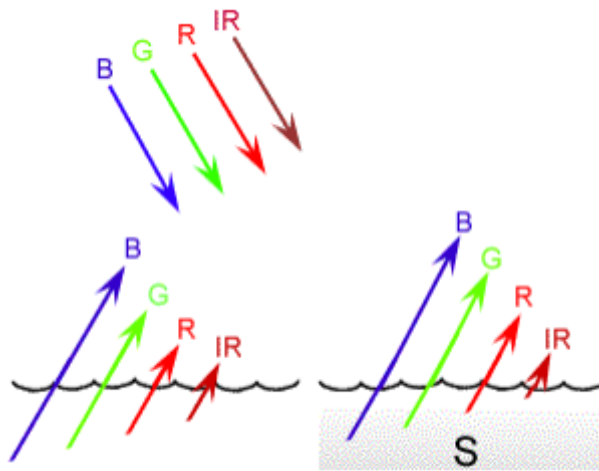


Figure 4: l'absorption et la désorption avec l'eau

Ces exemples démontrent que nous observons des réponses très différentes aux mécanismes d'absorption, de transmission et de réflexion selon la composition de la cible et la longueur d'onde du rayonnement qui lui est propre. En mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. En comparant les signatures de différents objets, nous pouvons les distinguer les uns des autres, alors que nous ne pourrions peut-être pas les distinguer si nous les comparions seulement avec une longueur d'onde.

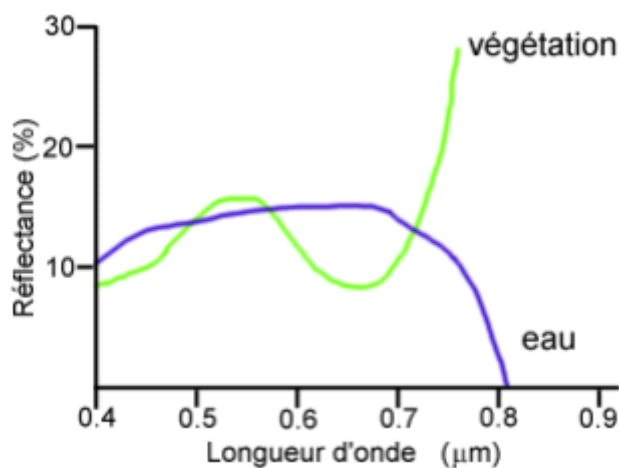


Figure 5: graphe significatif à propos de la végétation et l'eau

Par exemple, l'eau et la végétation peuvent avoir une signature spectrale similaire aux longueurs d'onde visibles, mais sont presque toujours différenciables dans l'infrarouge. Les signatures spectrales peuvent être très variables pour la même sorte de cible et peuvent aussi varier dans le temps et dans l'espace. Pour interpréter correctement l'interaction du

rayonnement électromagnétique avec la surface, il est important de savoir où regarder dans le spectre et de comprendre les facteurs qui influencent la signature spectrale de la cible.

1. Le couvert végétal observé des satellites :

Que de capteur utilisé pour observer les régions sèches soit passif ou actif, le rayonnement qu'il reçoit est réfléchi ou émis par des surfaces terrestres essentiellement composées de sol et de végétation. Cette dernière n'étant généralement pas l'élément dominant. Le terme « sol » est utilisé ici selon sa définition large, utilisées par la science des sols française, ou les roches affleurant et les accumulations de sable (les dunes, par exemple) sont des sols minéraux bruts (alors que dans le système de classification nord-américain, ce sont des « non sols »). Ici, les sols sont donc un composant très important, même si dans l'utilisation habituelle de la télédétection pour la surveillance écologique, l'accent est mis sur le suivi de la végétation verte, réalisé notamment avec l'indice de végétation NDVI (NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX).

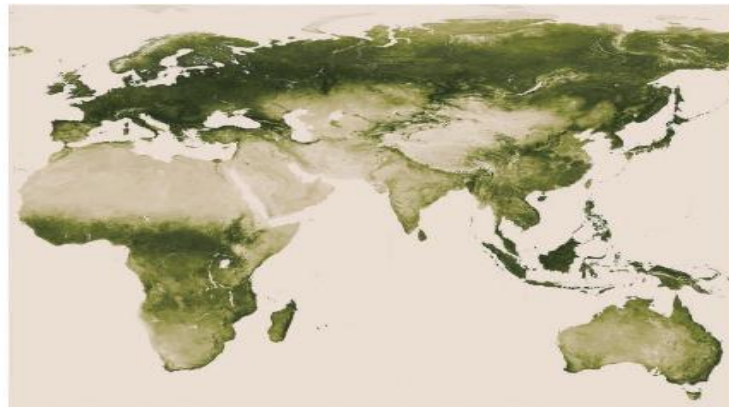


Figure 6 : valeur de l'indice de végétation NDVI, croissantes du gris au vert foncé

On remarque sur la figure 1.1 les faibles valeurs de l'indice NDVI sur les régions sèches. Pour bien caractériser la végétation de ces régions, il faut tenir compte du fait qu'elle est discontinue dans le temps et/ou dans l'espace, c'est un point important notamment pour le choix des dates de prise de vue. Dans le cas de la végétation herbacée qui envahit le paysage

après les pluies, l'indice NDVI est bien adapté pour évaluer le recouvrement ou la biomasse de ce tapis végétal et caractériser ses fluctuations, notamment sur le long terme.

Ainsi, les images des satellites NOAA-AVHRR ont été utilisées par de nombreuses équipes pour mesurer l'évolution de la couverture végétale au niveau global et tenter d'en tirer diagnostics sur l'état du milieu. Une des difficultés observées est la possibilité de relier ce que le satellites utilisés ici couvre 9KM x 9KM, il est le plus souvent difficile d'avoir une mesure de la végétation sur le terrain couvrant la même aire au moment où le satellite est passé. De plus, la transparence de l'atmosphère est affectée par les nuages et les poussières, ce qui complique la mise en relation des deux types de mesures : au sol et par satellite. Des instruments à grands champs plus récents, tels SPOT-Vegetation, MODIS, MERIS ont une résolution spatiale plus fine, permettant un suivi plus détaillé, mais sur un nombre d'années plus court, puisqu'ils observent notre planète depuis moins longtemps.

Parmi les travaux récents, une équipe française a pu comparer le taux de couverture végétale au sol avec l'indice de végétation mesuré par satellite, sur deux sites de référence : l'un dans le gourma au Mali, l'autre dans la région de FAKARA au NIGER. Cette comparaison a pu être faite des années 1981 à 2011, grâce à un dispositif de mesure de terrain qui a fonctionné sur ces sites à peu près tout au long de cette période (figure 1.2).

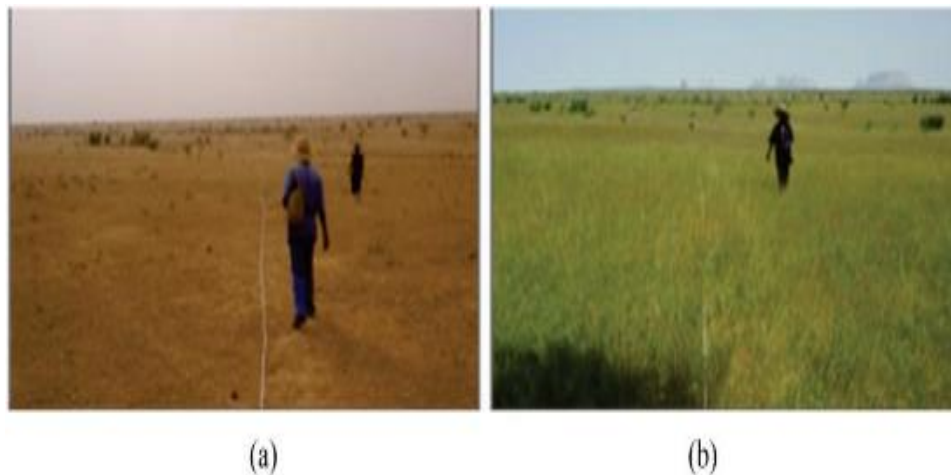


Figure 7 : Mesure du taux de couverture végétale sur site à sols sableux en Afrique sahélienne : (a) saison sèche, (b) saison humide

Parmi les résultats de cette étude, la figure 1.3 montre l'évolution de l'indice de végétation NDVI sur la même période, pour l'ensemble de la zone sahéenne. Elle illustre bien le « reverdissement » constaté dans cette région, puisqu'on voit une forte proportion de cette région en vert sur l'image, ce qui correspond à une tendance moyenne à l'augmentation de l'indice de végétation sur les 30 ans pris en considération. Il y a donc un reverdissement global du sahel, dont on peut donc dire qu'il ne s'est pas désertifié. Les spécialistes s'accordent pour dire qu'il est essentiellement dû à une augmentation des précipitations moyennes.

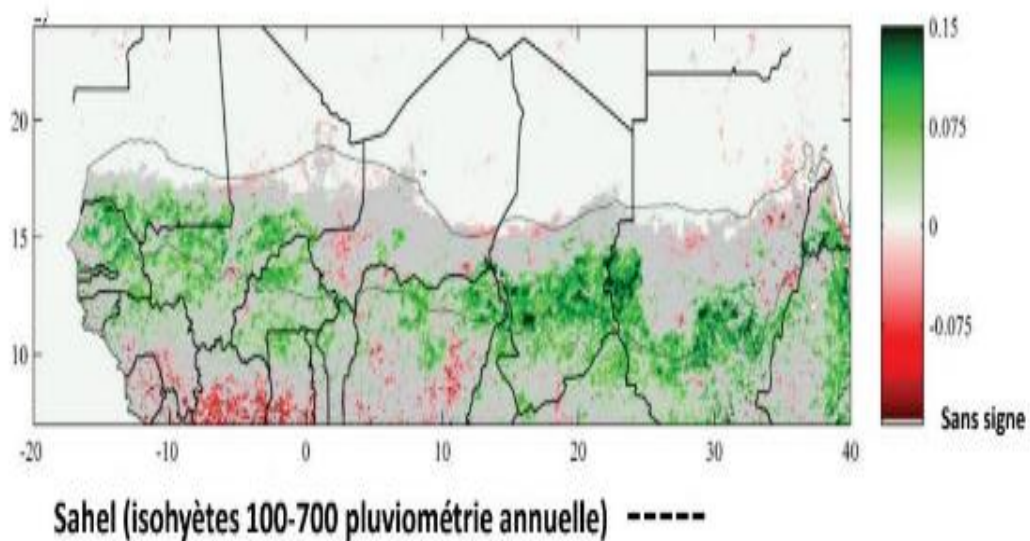


Figure 8 : Evolution moyenne de l'indice de végétation satellitaire (NDVI-AVHRR) sur la période 1981-2011

(En rouge : diminution de la couverture végétale

En vert : augmentation de la végétation

En gris : pas de tendance nette)

Cependant, on voit des disparités et ainsi les deux sites ont connu des destins différents. L'essentiel de la couverture végétale est composé de plantes annuelles, et si celle du MALI a augmenté en moyenne, elle a au contraire diminué sur le site du NIGER. Dans les deux cas, les mesures par satellite sont confirmées par les observations de terrain. Une analyse des

différents travaux sur le suivi de la végétation par satellite a montré que leurs résultats ne sont pas toujours convergents¹⁷.

Ces serie temporelles d'images satellites permettent donc bien de suivre la couverture végétale et de détecter des tendances, mais il faut pouvoir les valider avec des observations de terrain adaptées, et etre bien prudent dans leur interprétation¹⁷.

Continental ne semble pas appropriée, elle doit etre contextualisée¹⁸. Le suivi de la rue reste une approche utilisable au niveau d'un bassin versant pour suivre son etat écologique, meme si la difficulté majeure est disposer d'informations suffisamment précises sur les précipitations et leur distribution réelle.

Dans le cas de la végétation de type steppique, la période de croissances après les pluies se traduit aussi par le développement d'une biomasse verte, cependant généralement moins abondante et plus éparse. Et de ce fait, le suivi de ces formations par le NDVI est plus difficile, du fait également q'une grande partie des plantes est ligneuse, non verte¹⁹.

La détection et le suivi de la végétation non photosynthétique(NPV, non photosynthetic vegetation) sont en effet plus délicats. Ce composant « non vert » des surfaces comprend essentiellement les parties

Ligneuses des végétaux et la biomasse mortesur pied ou sous forme de litière. Le recours à d'autres bandes spectrales que celles utilisées pour les indices de végétation habituels (visible et proche infrarouge) fait l'objet de développement, notamment en utilisant celles de l'infrarouge moyen.ils n'ont cependant pas encore abouti à un indice aussi universel que le NDVI, meme si des résultats convaincants ont été obtenus dans certains cas²⁰.l'espoir se porte maintenant sur de nouveau capteur tels le lidar pour mieux distinguer cette NPV dont l'importance est grande dans les régions sèches, notamment au niveau global par son role dans le cycle du carbone, mais aussi au niveau local, par son role d'habitat et de protection des sols²⁰.

2. La discontinuité du couvert végétal (PATCHINESS) :

Au-delà de la mesure de la masse de la végétation et de son évolution, essentielle pour comprendre le fonctionnement des écosystèmes et le niveau de performance des

agroécosystèmes, la distribution spatiale de cette végétation est aussi une information utile, qui peut être obtenue par télédétection.

Au sahel, l'organisation de la végétation en bandes, donnant des formations qualifiées de « brousse tigrée » a très tôt attiré l'attention des naturalistes. Les mathématiciens se sont même emparés de ces motifs particuliers et ont proposé différents modèles expliquant leur apparition. L'étude sur le terrain du fonctionnement éco hydrologique de ces milieux a mis en évidence l'excellente adaptation à l'aridité qu'ils représentent.

Il est d'ailleurs à remarquer que ce type d'organisation en bandes végétalisées, séparées par des bandes de sols nus, se retrouve, par exemple dans les cultures sur glacis traditionnellement implantées par les agriculteurs du sud de la Tunisie²¹.

3. Télédétection optique :

Les premières études de télédétection optique sur l'estimation de l'humidité du combustible ont utilisé l'indice de verdure relative (RG) ou l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) qui sont calculés en utilisant les bandes rouges et proche infrarouges des capteur NOAA-AVHRR, LANDSAT-TM ou SPOT-HRV(Daumard, 2010) .

Les indices NDVI ou RG étaient généralement bien corrélés aux indices de la MCEDIF (voir OLD 06 LEB 07) audegré sécheresse dans certains milieux ouverts (prairies voir ainsi qu'à la fréquence des feux. des systèmes opérationnels utilisant les indices NDVI ont été proposé pour cartographie le potentiel d'incendie. plus récemment des données dans la bande bleue de LANDSAT-TM ont été combinées avec des données dans les bandes rouges et proche infrarouges pour former l'indice de végétation Visible *Atmospherically resistant index*(VARI), qui a été corrélé avec l'indice de teneur en eau du combustible vivant H, sur les écosystèmes du sud de la CALIFORNIE et de l'AUSTRALIE²³.

les études utilisant les bandes rouge, infrarouge ou bleue pour la cartographie de l'humidité du combustible ont aussi répertorié plusieurs problèmes : la saturation des relations entre indices et humidités du combustible, l'influence de l'humidité du site sur les relations, l'influence des maladies ou de la sénescence, l'effet de l'ombre ou de la pénombre et la difficulté d'utiliser ces indices sur les forêts, en raison du mélange spectral entre l'étage dominant et le sous-bois, les deux étant différents en natures et en humidité. En fait, ces images optiques ne sont qu'indirectement liées à l'humidité du combustible, car elles mesurent plutôt la verdure et l'activité chlorophyllienne de la végétation²².

Dans une étude sur les conditions avant feu avec des images NOAA_AVHRR sur la forêt boréale des territoires du Nord-Ouest (Canada) Oldford et al ont montré que les zones correspondant aux valeurs élevées de l'IFM correspondent à des valeurs élevées de température de surface, ce qui indique un stress hydrique, mais aussi à des valeurs élevées de NDVI, qui ne pourraient indiquer aucune condition de sécheresse. De même la verdure et l'activité chlorophyllienne de la végétation expliquent les corrélations positives entre les indices du système IFM et les valeurs de NDVI cumulées trouvées par LEBLON et AL sur les forêts boréales du Nord canadien, puisque les deux types de variables augmentent en parallèle tout au long de la saison des feux, mais pour deux raisons différentes :

- Raison de la sécheresse pour les indices du système IFM.
- Raison de la croissance de la végétation pour les valeurs de NDVI cumulées.

Pour toutes ces raisons, les images NDVI seraient mieux utilisées dans la gestion des incendies pour cartographier le moment d'apparition ou de disparition des feuilles caduques. Ainsi, un des sous-systèmes de la MCEDIF, la méthode canadienne de prévision du comportement des incendies de végétation pour onze types de combustibles standards. Cinq de ces onze types sont définis en fonction de la présence ou l'absence de feuilles, à savoir les types D1 (peuplement de peupliers faux-trembles sans feuilles), M1 (forêt boréale mixte, sans feuilles), M2 (forêt boréale mixte, avec feuilles), M4 forêt mixte à sapin baumiers morts, avec feuilles). En effet, la présence de feuilles réduit fortement la propagation du feu. Par exemple, dans le cas de la forêt boréale mixte, lorsque l'étage dominant et le sous-étage sont en feuilles (combustible M2), la propagation du feu en été n'est au plus que le cinquième de celle que l'on observe au printemps et en automne lorsque ces étages sont sans feuilles (combustible M1), toutes autres conditions environnementales étant semblables²⁴. La présence des feuilles est aussi importante pour le risque d'incendie dans d'autres régions du monde. Par exemple, en zone méditerranéenne, les espèces décidues, comme la *calicotome* velu (*calicotome villosa* (poir) link) ou semi-décidues, comme le ciste de Montpellier perdent leur feuilles en période de sécheresse estivale et deviennent donc plus susceptibles aux incendies.

L'humidité est théoriquement mieux associée à l'infrarouge moyen (MIR) (1 300-2 500 nm) parce que ces longueurs d'onde MIR sont associées aux bandes d'absorption de l'eau. Plusieurs indices basés sur le MIR ont été associés à l'indice de teneur en eau du combustible vivant H, pour divers écosystèmes et à l'occurrence des feux dans les forêts boréales et méditerranéennes²⁵. Il y a cependant plusieurs limitations dans l'utilisation de bandes MIR

pour le suivi de l'humidité du combustible. Des relations peuvent être établies, mais uniquement lorsque le stress hydrique est déjà important. De plus, les changements de réflectance associés aux changements de la teneur en eau peuvent être inférieurs à l'indice foliaire. Enfin, les bandes MIE sont fortement perturbées par les effets atmosphériques.

Les données hyperspectrales ont été également testées pour l'estimation de l'humidité du combustible. Elles ont l'avantage de permettre le calcul de dérivées qui sont utiles pour supprimer l'effet spectral de la structure foliaire et de l'atmosphère ainsi que pour résoudre le chevauchement des spectres afin de mieux séparer les composantes du spectre global²². Des données hyperspectrales ont été reliées aux teneurs en eau par le biais de relations empiriques ou des modèles de transfert radiatif, qui sont détaillés dans la revue²³. De tels modèles ont aussi été testés pour estimer H, avec des données MODIS multispectrales brutes et des indices associés pour différents écosystèmes²³.

Toutefois, du point de vue opérationnel, les données MIR et hyperspectrales sont acquises jusqu'à maintenant par un nombre limité de capteurs spatiaux. Les données MIR sont uniquement acquises par des capteurs tels que LANDSAT-TM, SPOT-VEGETATION, NOAA-16 et MODIS. Les données hyperspectrales sont fournies uniquement par des capteurs aéroportés ou le capteur satellitaire HYPERION EO-1. Les capteurs MIR et hyperspectraux ont aussi un temps de revisite long, qui peut même être allongé à cause des périodes nuageuses, bien que les capteurs optiques plus récents, tels que SPOT-VEGETATION, MODIS et AVHRR de NOAA-16, aient l'avantage de permettre l'acquisition quotidienne d'image. Les performances de ces nouveaux capteurs sont encore en cours d'évaluation. En revanche, les données infrarouges thermiques sont acquises plus fréquemment et plus souvent en même temps que les données visibles et le proche infrarouge, par plusieurs capteurs des satellites géosynchrones et géostationnaires. Les capteurs des satellites géostationnaires acquièrent des images à haute fréquence (chaque 15 ou 30 min), mais à une échelle spatiale plus grossière que les capteurs des satellites géosynchrones et il est optimal d'utiliser les deux types de données tel que détaillé à la section suivante.

4. Télédétection infrarouge thermique :

La température de surface (T) mesurée par les capteurs infrarouges thermiques est mieux corrélée que le NDVI aux indices de la méthode de l'indice forêt-météo à l'indice de teneur en eau du combustible vivant²³ H, et au potentiel hydrique de la strate arbustive, elle a

également été utilisée pour détecter le stress hydrique des peuplements résineux, lorsque des différences extrêmes de teneur en eau du couvert se produisent²⁶. En fait, la différence entre les températures de surface et de l'air ($T_s - T_a$) est un meilleur indicateur du statut hydrique végétal que la température de surface T , seule, parce que celle-ci est trop sensible aux conditions météorologiques²⁷.

Les plantes répondent à un stress hydrique par la fermeture des stomates, ce qui diminue leur transfert d'eau vers l'atmosphère sous forme de chaleur latente et induit une augmentation de température de la surface foliaire. Si on exprime dans l'équation du budget énergétique le flux de chaleur sensible (H) en fonction de la différence entre les températures de surface et de l'air ($T_s - T_a$), on obtient la relation analytique suivante qui permet de calculer le taux d'évapotranspiration réelle (E ou ETR) en fonction de $T_s - T_a$:

$$LE = R_n - G - \frac{\rho C_p (T_s - T_a)}{r_a + r_c} \quad [1.1]$$

Avec :

- LE = flux de chaleur latente ($W.m^{-2}$), ou L est l'énergie utilisée pour l'évapotranspiration et E est le taux d'évapotranspiration réelle (ETR en mm d'eau par unité de temps) ;

- R_n = flux de rayonnement net ($W.m^{-2}$) ;

- G = flux de chaleur du sol ($W.m^{-2}$) ;

- ρC_p = capacité thermique volumique de l'air = $\pm 1200 J.m^{-3}.K^{-1}$;

- r_a = résistance thermique aérodynamique qui est la résistance de l'air à la propagation du flux de chaleur sensible ($s.m^{-1}$) ;

- r_c = résistance thermique de la canopée, incluant la résistance de la couche-limite des feuilles et une résistance en excès au transfert de chaleur à partir des feuilles vers la couche-limite ($s.m^{-1}$) ;

- T_s = température de surface (K) ;

- T_a = température de l'air (K) ;

La valeur cumulée de $T_s - T_a$ était bien corrélée au nombre de feux mensuels dans le cas de forêt méditerranéennes. Pour le même écosystème, Vidal et al ont utilisé l'équation [1.1] pour calculer quotidiennement le rapport entre les évapotranspirations réelle et potentielle (ETR/ETP) à partir des températures de surface NOAA-AVHRR et des températures de l'air

mesurées par des stations synoptiques, ETP étant calculé par exemple par la méthode de Penman-Monteith, qui est la plus largement utilisée et est considérée comme une méthode de référence tel que détaillé dans ALLEN et al, elle nécessite les variables d'entrée suivantes :

- ❖ Température de l'air ;
- ❖ Rayonnement solaire ;
- ❖ Humidité relative ;
- ❖ Pression de vapeur ;
- ❖ vitesse du vent ;

le rapport ETR/ETP a été corrélé à l'occurrence des indices et à deux indices d'inflammabilité (délai de mise à feu et indice de sécheresse) pour deux arbustes sur les forêts méditerranéennes, ainsi qu'à l'indice forêt-météo (IFM) dans le cas des forêts boréales du nord canadien. Le rapport a servi à prédire de façon opérationnelle des risques d'incendie en 1994²⁸.

Cependant, ces études montrent également que l'estimation de l'ETR à partir de $T_s - T_a$ avec l'équation [1.1] est plus problématique sur les forêts que les cultures pour les raisons suivantes :

- la hauteur de la canopée fait que les forêts ne sont pas une surface foliaire mince, tel que supposé par l'équation [1.1], ce qui produit un niveau supplémentaire d'absorption de rayonnement et d'échange de chaleur par convection entre le sol et la strate supérieure ;
- la température radiative de surface (T_{rad}) mesurée est différente de la température de surface aérodynamique (T_s) requise par l'équation [1.1], en raison d'une résistance supplémentaire (connue comme le facteur kB^{-1}) au transfert de chaleur des feuilles, qui augmente avec la hauteur de la canopée ;
- la résistance aérodynamique (r_a) est inférieure à la résistance de la canopée (r_c) et $T_s - T_a$ est donc moins sensible aux variations d'humidité. Cependant, cette sensibilité plus faible peut être compensée si le signal satellitaire atteint la végétation en sous-bois qui est généralement plus courte, pour une végétation courte, la résistance aérodynamique (r_a) est supérieure à la résistance de la canopée (r_c). Cette végétation de sous-bois joue souvent un rôle important dans le risque d'incendie de plusieurs écosystèmes

Surveillance des cultures et évaluation des dommages :

L'évaluation de la santé des cultures, de même que la détection rapide d'infestations maximisent la qualité des productions agricoles. Le stress associé notamment au manque d'eau, aux insectes, aux infestations de champignons ou de mauvaises herbes, doit être détecté assez rapidement pour permettre au fermier de le corriger. Ce processus exige que les images soient acquises fréquemment (au minimum, une fois par semaine) et qu'elles soient livrées au fermier rapidement, habituellement dans les 2 jours.

De plus, une culture donnée ne croît pas partout au même rythme, ce qui entraîne d'importantes variations de production à l'intérieur d'un même champ. Ces différences de croissance peuvent être dues à des carences du sol en nutriments ou à d'autres formes de stress. La télédétection permet au fermier d'identifier les sections d'un champ les moins productives et de prendre des mesures correctives comme l'application d'engrais, d'herbicides ou de pesticides aux endroits précis qui en ont besoin. En plus d'améliorer la productivité de sa terre, cette approche permet au fermier de réduire ses dépenses ainsi que l'impact environnemental de ses interventions.

Certains gestionnaires qui sont très peu familiarisés avec les techniques agricoles sont appelés à gérer les échanges commerciaux et doivent fixer les prix d'achat et de vente des récoltes. Ils ont besoin d'information sur la santé des cultures mondiales pour fixer les prix et négocier des accords commerciaux. Ces gestionnaires se fient sur des données comme l'index d'évaluation des récoltes pour comparer les taux de croissance et la productivité d'une année à l'autre, et pour connaître la production de l'industrie agricole de chaque pays. Ce genre d'information peut aussi aider à cibler les sites de futurs problèmes, comme la famine en Éthiopie qui a été causée par la sécheresse à la fin des années 1980. L'identification de ces régions facilite la planification et la gestion de l'aide humanitaire et des efforts de secours.

Chapitre II :

L'agriculture de
précision

Chapitre 02 : l'agriculture de précision

1- Histoire et généralité :

L'évolution de l'agriculture a été marquée par de grandes étapes qui ont amélioré la qualité de travail des agriculteurs.

La mécanisation de l'agriculture fut la première étape et celle-ci a permis, à l'aide de la traction animale de faciliter les tâches agricole. Ensuite, la motorisation a remplacé les chevaux et les bœufs afin d'augmenter la productivité des parcelles tout en réduisant la main d'œuvre et le temps de travail nécessaires. Ces changements fondamentaux ont transformé le paysage agricole en favorisant le remembrement des parcelles (regroupement des champs agricoles). Une même parcelle, issue de cette centralisation peut par exemple, contenir quatre compositions de sol différentes. Même si ces variations intra-parcellaires sont connues par l'agriculteur, celui-ci ne possède généralement pas la technologie nécessaire pour moduler ses traitements et doit ainsi appliquer une gestion homogène sur l'ensemble du champ²⁹. La tendance de ces dernières années est justement d'utiliser les informations et les technologies spatialisées disponibles pour connaître les variabilités d'un champ et ainsi mettre en place une gestion optimale à l'échelle des variations intra-parcellaires, cette approche a créé l'agriculture de précision (la géomatique au service de l'exploitant agricole) (INRA, 2005).

Dans cet élan, le développement de la géomatique en agriculture est un outil efficace pour mettre en place une gestion optimale des parcelles agricoles²⁹. Entre 2011 et 2013, selon l'étude d'Erickson les agriculteurs ont été plus nombreux à utiliser les nouvelles technologies pour améliorer la gestion de leurs parcelles agricoles, la majorité d'entre eux utilisent la barre de guidage (lignes virtuelles spatialisées et générées pour guider le conducteur) et le pilotage automatique du matériel (Erickson et all., 2013).

L'agriculture de précision est un concept qui naît aux États-Unis dans les années 1980. À l'époque l'agriculture américaine se base sur l'utilisation d'engrais, de produits phytosanitaires et d'eau qui s'accroît fortement et il devient important d'en optimiser l'usage afin de protéger l'homme et l'environnement pour une agriculture modernise, cette agriculture ne cesse de se développer depuis.

L'agriculture de précision est un sujet de recherche depuis de nombreuses années. Plusieurs congrès internationaux sont organisés autour de cette notion, L'ECPA (European Conference on Precision Agriculture) a lieu tous les deux ans depuis 1997, La société savante ISPA (International Society on Precision Agriculture) organise l'ICPA (International Conference on Precision Agriculture) tous les deux ans depuis 1996. On trouve également l'Asian Australasian Conference on precision Agriculture organise des conférences depuis 2005 tous les deux ans, aussi l'International Conference on Agricultural Technology and Precision Agriculture organise des conférences depuis 1997 chaque année. Il y a aussi des conférences dédiées à l'application des nouvelles technologies à l'agriculture, dont l'agriculture de précision, comme la conférence organisée par EFITA (l'European Federation for Information Technology in Agriculture, Food and the Environment). Le journal scientifique international de référence pour l'agriculture de précision apparu en 1999.

Si l'agriculture de précision intéresse de nombreux scientifiques de différentes communautés à l'international, il faut noter qu'il n'existe pas de définition unique de l'agriculture de précision. Les définitions de l'agriculture de précision peuvent être classées en 2 catégories, des définitions à orientation technologique qui mettent l'accent sur le progrès technique et les outils [développement des capteurs de rendement, des capteurs GPS (Global Positioning System)] et des définitions à orientation agronomique agricole qui mettent l'accent sur la finalité de la démarche. On peut par exemple se référer à la thèse de Jerémy Lherbier intitulée "Valorisation de l'information géographique en agriculture de précision" qui présente plusieurs définitions et les compare. Nous retiendrons deux définitions complémentaires :

1. La Chambre des représentants des États-Unis en 1997 a donné une première définition de l'agriculture de précision : Un système qui vise à augmenter l'efficacité, la productivité et la rentabilité à long terme de la production agricole et de la production tout entière tout en minimisant les impacts non désirés sur la faune et l'environnement.

2. Le laboratoire d'agriculture de précision de l'université de Sydney définit la gestion des cultures spécifiques au site SSCM (site specific crop management) : Une forme d'agriculture de précision où les décisions sur l'application des ressources et les pratiques agronomiques sont améliorées pour mieux correspondre aux exigences du sol et des cultures, car elles varient sur le terrain.

La première définition de l'AP est une définition générale qui englobe toutes les productions agricoles qu'elles soient animales ou végétales, elle donne les finalités de l'agriculture de précision mais elle ne précise pas comment on atteint ces objectifs. La deuxième définition précise les moyens à employer et notamment l'exploitation de la variabilité spatiale de la culture.

Le concept d'AP est en fait né aux USA au début des années 80 sous le nom de "specific farming". Les travaux menés à cette époque concernent la fertilité des sols. Des cartes avec des analyses tous les 100 mètres ont mis en évidence la nécessité d'une modulation des apports d'engrais suivant les zones. Plus précisément, des études des taux de Phosphore (P) et de Potassium (K) ont montré une grande variabilité de la fertilité des parcelles. Certains affirment que la variabilité intra-parcellaire est l'origine du développement de l'agriculture de précision. En Europe, l'AP est apparue pour la première fois en Angleterre à la fin des années 80 pour les cultures herbacées (cultures de céréales, cultures maraîchères, cultures des espèces de la famille des légumineuses). Un point d'histoire sur l'agriculture de précision est disponible dans. La pratique de l'agriculture de précision en France a débuté à la fin des années 90.

Le début de l'AP a été confronté à plusieurs types de verrous, socio-économiques, technologiques et agronomiques. A l'époque, les verrous socio-économiques identifiés concernaient principalement les coûts liés à l'AP, l'attitude de l'exploitant et sa résistance au changement due à son niveau de formation considéré comme souvent limité. Les verrous technologiques étaient essentiellement liés à la conception des machines agricoles (problèmes d'entretien, machines mal adaptées aux petites parcelles), et aux capteurs (inexistants ou trop coûteux). Les verrous agronomiques identifiés concernaient le manque de conseillers connaissant ces techniques et le manque de données détaillées, notamment sur les variations intra-parcellaires de la qualité des sols.

C'est grâce au développement de nouveaux des capteurs et à la réduction des coûts, notamment des coûts des informations GPS, que l'agriculture de précision s'est développée rapidement. Un récepteur GPS permet de se localiser pratiquement n'importe où en extérieur, dès lors que suffisamment de satellites sont visibles du récepteur, et n'importe quand.

Ce système a été utilisé au départ en agriculture pour mesurer la surface des terrains (arpentage) et pour la cartographie des rendements. En ce qui concerne les outils utilisant la

technologie de GPS et aujourd'hui largement disponibles pour les agriculteurs en grandes cultures, des experts techniques comme Caroline Desbourdes (spécialiste en agriculture de précision chez Arvalis) les classent en 2 catégories : applications du GPS pour la précision en agriculture et applications du GPS pour l'agriculture de précision.

Dans le premier cas, le GPS est utilisé pour repérer avec précision la position d'un appareil agricole dans un champ afin d'effectuer des actions dont la localisation est certaine et précise. Un premier exemple est le guidage ou l'autoguidage. L'autoguidage consiste à guider un appareil en suivant une trajectoire de référence sans intervention du chauffeur. Ceci permet de diminuer par exemple, la surface de recouvrement entre deux parcelles.

Dans la seconde catégorie d'applications, l'AP consiste à réaliser les bonnes actions au bon endroit en fonction des caractéristiques du sol ou de la culture en place. C'est la modulation intra-parcellaire, notion qui recouvre la gestion des cultures spécifiques au site vue plus haut. Toujours d'après Caroline Desbourdes, la modulation intra-parcellaire comporte 3 étapes :

- Étape 1 : Caractériser la variabilité liée au milieu physique et au végétal.
- Étape 2 : Établir une carte de préconisation pour chaque point de la parcelle.
- Étape 3 : Réaliser la modulation dans le champ (modification de dose par exemple) de manière manuelle ou automatique.

Spécialiste en agriculture de précision chez Arvalis, Journée Agriculteurs du 08/12/15 à St Jean de Linières (49) - Arvalis, diapos disponibles sur www.evenements-arvalis.fr.

Avec la maturité des technologies dans certains secteurs de l'agriculture et la disponibilité grandissante de données, les scientifiques académiques du domaine de l'AP ont mis en avant les questions méthodologiques, au-delà de l'évaluation du potentiel de nouvelles technologies pour répondre aux objectifs de l'AP. C'est pourquoi la section suivante présente une schématisation des grandes fonctions de l'agriculture de précision, qui va nous permettre de situer les contributions de ce mémoire.

De manière générale, seulement 45% des agriculteurs sondés aux niveaux mondiale n'utilisent aucune nouvelle technologie à référence spatiale pour appuyer leurs travaux agricoles. L'interprétation des images satellitaires et aériennes, qui offrent un autre angle de vue des parcelles, est la clé pour fournir des conseils agronomiques aux exploitants agricoles. Ce principe de la télédétection végétale consiste à faire correspondre les caractéristiques biophysiques de la végétation étudiée avec ses propriétés optiques. Les valeurs spectrales

peuvent être mises en corrélation avec des paramètres mesurés et ainsi identifier des problématiques. En agriculture, ces éléments sont importants car ils renseignent sur l'état de santé des plantes. Selon les études d'Atzberger identifient quatre types d'applications différentes de la télédétection en agriculture :

- Estimation de la biomasse et du rendement.
- Gestion de la vigueur de la végétation et des stress hydriques.
- Évaluation du développement phénologique.
- Cartographie des parcelles et du changement d'occupation du sol (Atzberger et all., 2013).

Dans la littérature scientifique, l'estimation du rendement et de la biomasse est généralement effectuée par régression simple ou par des modèles complexes à partir d'indices de végétation issus de l'imagerie.

Selon les études de Jensen qui montre qu'il est possible d'estimer le rendement du blé (*Triticum spp*) grâce à une régression linéaire simple tout en obtenant une forte corrélation avec un coefficient de détermination (la R^2 et de 0,91) à partir de l'indice de végétation DVI (Différence Végétation Index) (Jensen et all., 2007).

Les études de Swain et son équipe ont démontré la possibilité de l'utilisation également d'une régression linéaire simple avec de bons résultats pour estimer le rendement du riz (*Oryza sativa*) (la R^2 et de 0,76).

2- Définition et concepts de l'agriculture de précision (AP) :

L'agriculture de précision utilise des outils et des technologies pour identifier la variabilité des sols et des cultures sur le terrain afin d'améliorer les pratiques agricoles et d'optimiser les intrants agronomiques en fonction des conditions spécifiques du site³³. Ce système de production est basé sur de nouveaux outils et sources d'information fournis par les technologies modernes. Ceux-ci incluent le système de positionnement global (GPS), les systèmes d'information géographique (SIG), les drones agricoles, la station météo connectée, l'analyse d'imagerie satellite via un système informatique bénéficiant d'une grande expertise agronomique, les dispositifs de surveillance du rendement, les capteurs de sol, de plantes et de

parasites, la télédétection et les technologies à taux variables pour les applicateurs d'intrants³⁴. L'AP s'impose afin d'ajuster l'irrigation en fonction des besoins en eau de la culture³⁵. Par conséquent, elle est basée sur l'application de la bonne source et la bonne dose au bon moment, au bon endroit et de la bonne manière.

Donc l'agriculture de précision aide l'agriculteur à prendre les meilleures décisions possibles pour ses cultures.

D'après les études de Cambouris, le concept de l'AP se résume en trois étapes (voir la figure 1).

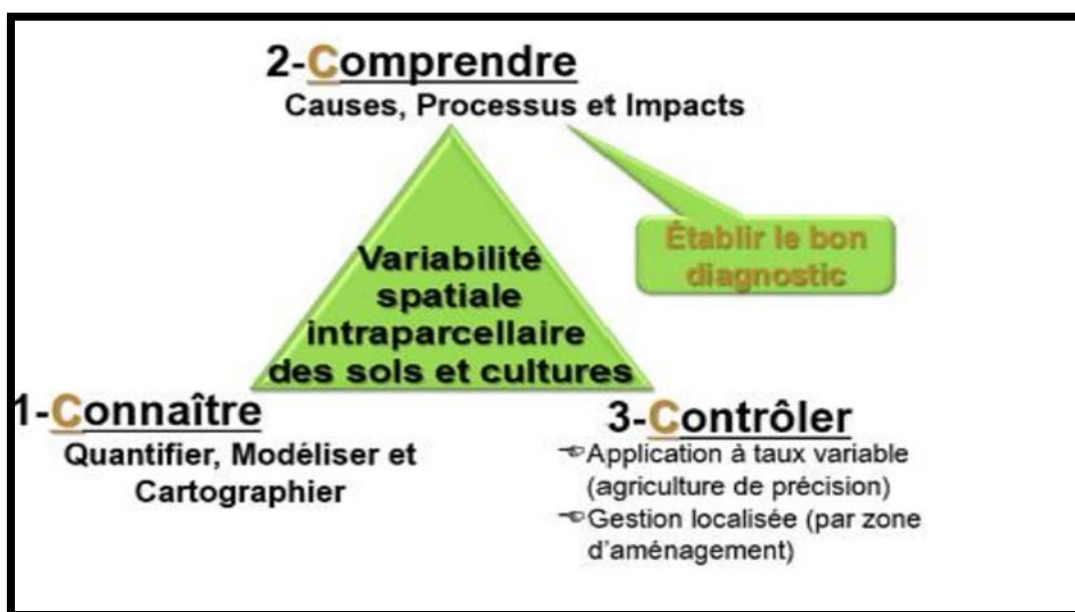


Figure 9 : L'image suivante est une illustration des trois étapes du concept de l'agriculture de précision (Cambouris et al., 2014).

1. Un échantillonnage intensif au sol, des moniteurs de rendement et/ou des capteurs distants et proximaux afin de quantifier, modéliser et cartographier la variabilité spatiale intra-parcellaire des sols et des cultures.

2. Un diagnostic de gestion de la culture pour comprendre cette variabilité spatiale qui se base sur un bilan complet fait par un expert agronome expliquant les causes, les processus et les impacts.

3. Deux approches sont utilisées pour contrôler cette variabilité spatiale :
 - a. Réaliser des applications à taux variable en mode continu.
 - b. Délimiter des zones d'aménagement pour une gestion bien localisée (Cambouris et all., 2014).

D'après les travaux de Jullien et Huet, l'objectif de l'AP est d'adapter les techniques culturales qui sont basées sur les nouvelles technologies de mesure et de traitement de l'information à l'hétérogénéité intra-parcellaire du sol et des cultures (Jullien et Huet., 2005).

3- Les fonctions de l'agriculture de précision :

Comme défini précédemment et illustré dans la figure 2, l'agriculture de précision peut être vue comme une stratégie de gestion spatialisée et d'amélioration cyclique des procédés culturaux basée sur 5 fonctions :

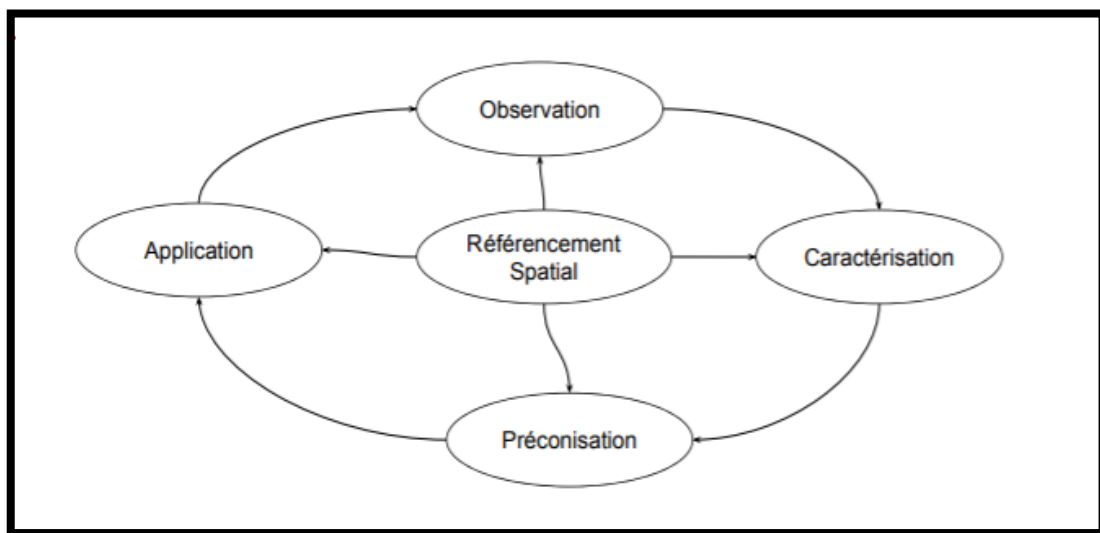


Figure 10 : L'image suivante est une illustration des fonctions de l'agriculture de précision.

- L'observation : elle consiste à l'acquisition des données sur le végétal. Certaines données sont coûteuses à acquérir et sont disponibles avec une faible résolution spatiale, d'autres au contraire, grâce à des technologies embarquées sur les équipements ou la télédétection, sont acquises avec une résolution importante.
- La caractérisation : elle permet de transformer les données obtenues lors de la phase d'observation en information agronomique.

- La préconisation : elle permet de produire un conseil technique explicite en se basant sur les informations agronomiques élaborées lors de la caractérisation.
- L'application : c'est la mise en œuvre de la préconisation, le conseil agronomique est appliqué sur la ou les parcelle(s) par l'opérateur.
- Le référencement spatial : c'est la fonction centrale qui permet de spatialiser les données récoltées, les informations agronomiques et l'application de la préconisation.

4- Techniques d'agriculture de précision :

Les outils de mesure de l'hétérogénéité intra-parcellaire du sol sont nombreux et qui peuvent être classés principalement sous quatre classes qui sont : Tout d'abord, les outils classiques qui se basent sur un plan d'échantillonnage classique tels que les mesures directes par sondage du sol, l'épandage des engrais ou de produits phytosanitaires. Cet outil s'avère lourd et coûteux en termes de temps et de moyens personnel et matériel. Deuxièmement, les machines agricoles qui donnent aux agriculteurs la possibilité d'enregistrer l'itinéraire technique en chaque zone de la parcelle à l'aide des capteurs embarqués sur tracteurs et connectés à un SIG³⁶. Citons l'exemple des moniteurs de rendement combinés avec GPS, qui servent à mesurer l'hétérogénéité spatiale du sol ainsi que le rendement des cultures en question via une cartographie du rendement³⁷. Le GPS est une antenne de réception installée sur les toits des tracteurs et qui permet de donner des positions géographiques par rapport à un point de contrôle du sol pour toutes les propriétés des cultures et des sols mesurées (voir la figure 3)³⁸. Toutefois, un moniteur de rendement est généralement composé d'une unité centrale de commande, de l'antenne GPS avec le récepteur correspondant, 12 de capteurs de vitesse, de capteur de maintien à la hauteur et de capteur de rendement infrarouge.

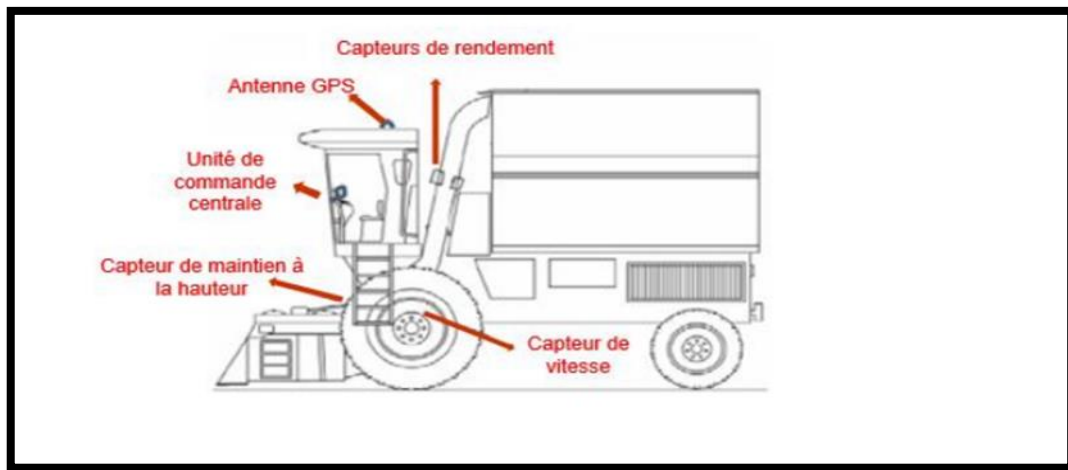


Figure 11 : L'image suivante est une illustration des Composants d'un système de cartographie des rendements.

Troisièmement, ils viennent autres outils in-situ permettant de quantifier la variabilité du sol tels que les méthodes géophysiques qui se basent sur la mesure de la résistance électrique des sols donnant une information détaillée sur l'humidité, la densité apparente, et la granulométrie des sols.

En dernier lieu, les outils qui se basent sur les technologies avancées telles que les photographies aériennes et la télédétection optique et radar, la télédétection avec l'infrarouge thermique donnant ainsi une information sur l'état phénologique des cultures et la rugosité et l'humidité des sols. Les techniques culturales basées sur la télédétection fournissent des informations très pertinentes sur l'état hydrique, le statut azoté des cultures, l'application de l'irrigation et les produits phytosanitaires³⁹.

La télédétection est une source d'information privilégiée pour le domaine agricole. Les apports de la télédétection sont nombreux et variés selon la méthode utilisée (imagerie satellitaire et aéroportée). Elle permet de combiner les propriétés biophysiques des cultures avec les propriétés thermiques et optiques afin de spatialiser le stress hydrique chez les plantes, de faire le suivi de la culture et de détecter les mauvaises herbes, etc⁴⁰. En fait, plusieurs outils à savoir les capteurs portables manuels ou thermiques ¹³ ajoutés aux systèmes optiques montés sur un avion ou satellite sont utilisés pour obtenir des images visibles appelées thermo grammes ou images thermiques.

A. Principe de l'imagerie infrarouge thermique :

L'infrarouge thermique « est une technique non invasive, sans contact et non destructive utilisée pour déterminer les propriétés thermiques et les caractéristiques de tout objet d'intérêt. Elle peut donc être utilisée dans de nombreux domaines, où la chaleur est générée ou perdue dans l'espace et dans le temps ». En outre, la télédétection par infrarouge thermique se base sur le fait que tout objet à une température supérieure au zéro absolu (0 K ou -273,15 °C ou -459 °F) émet du rayonnement dans l'infrarouge thermique⁴¹. Pour étudier l'émission, on a recours à un objet idéalisé : le corps noir dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température. Le corps noir a la propriété d'absorber toute l'énergie reçue par une source externe et d'émettre vers l'espace ambiant d'une façon isotrope. Par ailleurs, la télédétection thermique diffère de la télédétection optique. Elle mesure les rayonnements émis à partir de la surface d'un l'objet cible, tandis que la télédétection optique mesure ses rayonnements réfléchis⁴⁰. Toutefois, le domaine spectral infrarouge (voir la figure 3.1) n'occupe qu'une partie limitée de l'ensemble du spectre de rayonnement électromagnétique où la longueur d'onde des infrarouges est comprise entre le domaine visible (environ 0,78 μm) et le domaine des micro-ondes (environ 1 mm), constituée de moyennes et longues ondes infrarouges. La bande thermique la plus utilisée est celle allant de 8 à 14 μm , car dans cette fenêtre atmosphérique, l'atmosphère est assez transparente et le signal est un peu diminué par l'absorption atmosphérique⁴².

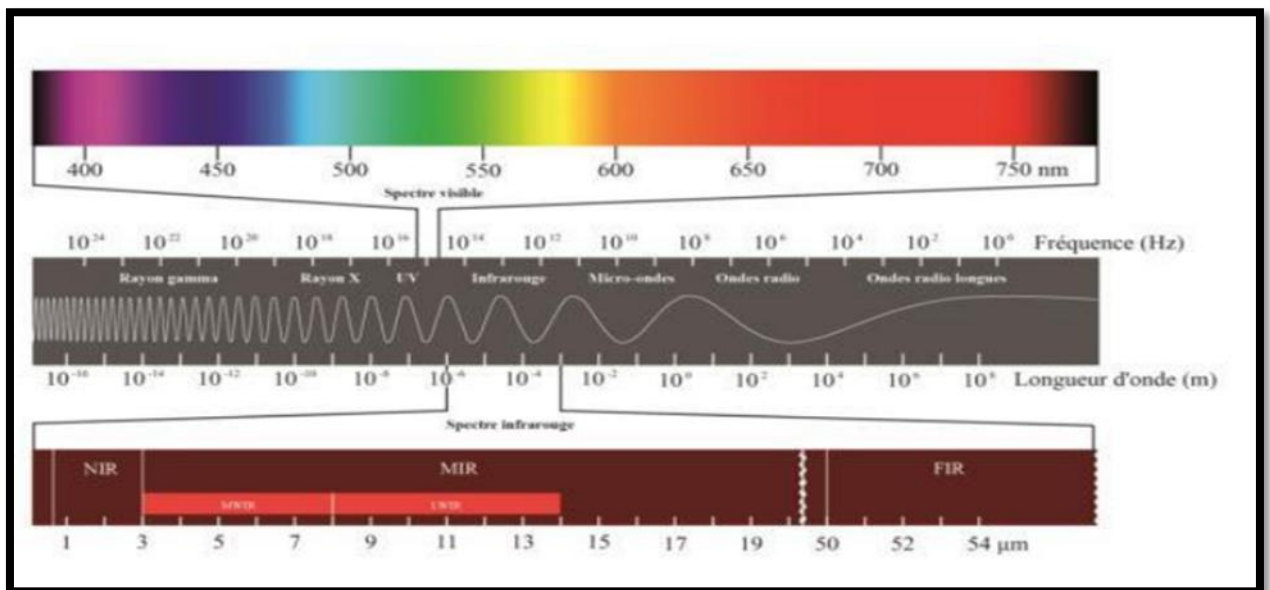


Figure 12 : L'image suivante et une illustration du spectre électromagnétique de l'infrarouge thermique.

Depuis une vingtaine d'années, la télédétection par infrarouge thermique a montré son potentiel dans plusieurs applications d'agriculture et récemment intégrée dans l'agriculture de précision. Ce domaine spectral est très utilisé pour la détection de stress hydrique tel que les travaux de Bellvert et de Baluja qui ont montré que les images thermiques aéroportées permettent d'évaluer la variabilité spatiale du déficit hydrique des vignobles (Bellvert et al., 2016), les travaux de Gonzalez-Dugo ont montré que la variation spatiale de la température de canopée est un bon indicateur de stress hydrique chez les arbres d'amandiers (Gonzalez-Dugo et al., 2012).

Lois physiques Les propriétés physiques d'un corps noir ont été représentées par les lois suivantes⁴² :

- **Loi de Planck** : Le physicien Max Planck en 1900 a montré par l'équation 1 que l'énergie émise (luminance spectrale) par un corps noir dépendait uniquement de sa température (équation 1).

$$W(\lambda) = \frac{2 \pi h c^2 \lambda^{-5}}{[\exp(hc/\lambda KT) - 1]} \quad \longrightarrow \quad \text{l'équation 1}$$

Où $W(\lambda)$ est la radiation du corps noir (W) à la longueur d'onde λ ($W m^{-2} \mu m^{-1}$) c'est la vitesse de la lumière ($299\,792\,458 m.s^{-1}$).

Où h est la constante de Planck ($6,63 \times 10^{-34} Js$).

K est la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} J.K^{-1}$).

T est la température cinétique du corps noir en Kelvin (K).

λ est la longueur d'onde (m).

σ est la constante de stefan-Boltzmann ($5,669 \cdot 10^{-8} w m^{-2} K^{-2}$).

Donc la loi de Planck décrit la distribution spectrale de l'énergie émise par un corps noir en fonction de sa température. Les maximums des températures suivent une ligne droite.

- **Loi de Wien** : La loi de Wien décrit la relation entre la longueur d'onde du maximum d'émission (λ_{max}) et la température du corps noir. Elle montre que la longueur d'onde du maximum d'émission est inversement proportionnelle à sa

température, ainsi à l'énergie des corps les plus chauds se déplace vers les courtes longueurs d'onde (l'équation 5) :

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad \longrightarrow \quad \text{l'équation (5)}$$

Où : λ_{max} est la longueur d'onde du maximum d'émission du corps noir (μm) σ est une constante (égale à 2898 m k), et T est la température du corps noir (K) 44.

- Émissivité des surfaces Pour une même température, un corps gris n'émet jamais autant qu'un corps noir. Le rapport entre le flux radiatif (ou les luminances spectrales) émis par le corps gris et le corps noir définit l'émissivité spectrale. Le coefficient d'émissivité d'une surface naturelle, noté ξ_λ a toujours une valeur inférieure à 1 et s'exprime de la façon suivante (l'équation 6) : $\xi_\lambda = L(T)/L_0(T)$, Où $L(T)$ est la luminance spectrale de la surface naturelle à la température T $L_0(T)$ est la luminance spectrale du corps noir à la même température T Dans l'IRT, il est important de définir la valeur de l'émissivité pour bien interpréter les images thermiques. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer l'émissivité. La première méthode est d'utiliser un thermocouple couplé avec un thermomètre pour mesurer la température de surface de l'objet visé au même endroit et d'ajuster par la suite l'émissivité jusqu'à obtenir la même température⁴⁵.

D'autres méthodes sont classées suivant la nature de mesure, celles dites calorimétriques et radiométriques qui se basent sur l'énergie rayonnée par la surface, d'autres qui se basent sur les propriétés optiques par réflectomètre.

Des logiciels tels que le logiciel IRBIS est utilisé pour corriger la valeur de l'émissivité globale ou sélective. L'émissivité du couvert végétal varie suivant les propriétés physicochimiques de la surface du sol qui varie entre 0,95 et 0,99 dont 0,98 est la plus utilisée⁴⁶.

Les capteurs thermiques à l'heure actuelle, une large gamme de capteurs d'imagerie est offerte. Ces capteurs détectent des parties différentes de spectre électromagnétique afin d'aider les agriculteurs à appliquer l'agriculture de précision. Par ailleurs, les capteurs thermiques sont capables de détecter la partie infrarouge thermique de spectre électromagnétique (6- 14 μm). Cette forte fenêtre atmosphérique est utilisée pour expliquer les caractéristiques de couvert végétal parce qu'elle présente les caractéristiques d'absorption fondamentales des végétations. En fait, les systèmes d'imageries thermiques sont composés

des problèmes pour l'agriculteur.

- Exploration de nouveaux modèles commerciaux.
- Promotion de l'agriculture de précision en vue de l'établissement de nouvelles tendances et auprès de la nouvelle génération.
- Publication d'un rapport annuel sur l'adoption de l'agriculture de précision.
- Construction des infrastructures appropriées pour retenir et attirer les jeunes agriculteurs.
 - du maximum d'émission est inversement proportionnelle à sa température, ainsi à l'énergie des corps les plus chauds se déplace vers les courtes longueurs d'onde (l'équation 5) :

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \quad \longrightarrow \quad \text{l'équation (5)}$$

Où : λ_{max} est la longueur d'onde du maximum d'émission du corps noir (μm) σ est une constante (égale à 2898 m k), et T est la température du corps noir (K) 44.

- Émissivité des surfaces Pour une même température, un corps gris n'émet jamais autant qu'un corps noir. Le rapport entre le flux radiatif (ou les luminances spectrales) émis par le corps gris et le corps noir définit l'émissivité spectrale. Le coefficient d'émissivité d'une surface naturelle, noté ξ_λ a toujours une valeur inférieure à 1 et s'exprime de la façon suivante (l'équation 6) : $\xi_\lambda = L(T)/L_0(T)$, Où $L(T)$ est la luminance spectrale de la surface naturelle à la température T $L_0(T)$ est la luminance spectrale du corps noir à la même température T Dans l'IRT, il est important de définir la valeur de l'émissivité pour bien interpréter les images thermiques. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour estimer l'émissivité. La première méthode est d'utiliser un thermocouple couplé avec un thermomètre pour mesurer la température de surface de l'objet visé au même endroit et d'ajuster par la suite l'émissivité jusqu'à obtenir la même température⁴⁵.

D'autres méthodes sont classées suivant la nature de mesure, celles dites calo métriques et radiométriques qui se basent sur l'énergie rayonnée par la surface, d'autres qui se basent sur les propriétés optiques par réflectomètre.

Des logiciels tels que le logiciel IRBIS est utilisé pour corriger la valeur de l'émissivité globale ou sélective. L'émissivité du couvert végétal varie suivant les propriétés physicochimiques de la surface du sol qui varie entre 0,95 et 0,99 dont 0,98 est la plus utilisée⁴⁶.

Les capteurs thermiques à l'heure actuelle, une large gamme de capteurs d'imagerie est offerte. Ces capteurs détectent des parties différentes de spectre électromagnétique afin d'aider les agriculteurs à appliquer l'agriculture de précision. Par ailleurs, les capteurs thermiques sont capables de détecter la partie infrarouge thermique de spectre électromagnétique (6- 14 μm). Cette forte fenêtre atmosphérique est utilisée pour expliquer les caractéristiques de couvert végétal parce qu'elle présente les caractéristiques d'absorption fondamentales des végétations. En fait, les systèmes d'imageries thermiques sont composés d'une caméra thermique équipée de détecteurs infrarouges, un système d'acquisition d'images ainsi qu'une unité de traitement de signal. Ils sont évalués par leur sensibilité thermique, leur vitesse de balayage, leur résolution d'image et leur résolution d'intensité. Ainsi, le principe des capteurs thermiques est basé sur la mesure de la température tout en connaissant la luminance dans l'IRT et l'émissivité de l'objet visé. Ils analysent la distribution spatiale des températures apparentes de la surface. Certes, les caméras thermiques sont généralement utilisées dans l'agriculture de précision et fonctionnent dans les longueurs d'ondes comprises entre 5000 et 14000 nm, elles sont très coûteuses par rapport aux caméras conventionnelles. De plus, il existe plusieurs capteurs satellitaires qui captent les radiations dans le visible et l'infrarouge thermique.

Les capteurs thermiques utilisent des photo-détectrices dont la surface est sensible au contact des photons infrarouges émis par la Terre. Ces détecteurs sont refroidis à des températures très basses (près du zéro absolu), de façon à limiter leur propre émission d'infrarouge thermique. Les capteurs IRT mesurent la température de surface et les propriétés thermiques de la cible. Plusieurs satellites sont munis de capteur thermique tel que : ENVISAT/AATSR, ABI/GOES-R, Terra/ASTER, NOAA/AVHRR-3, Daedalus(AMS) AA3600DS, Daedalus(AMS) AA3607DS, Daedalus (ATM), DAIS 79155AIRBONE Sensor^o, IRMSS/CBRES , IRS/HJ-1 , Landsat 8, Landsat 7 ETM+, MERSI/FY-3 , Aqua/MODIS, MVISR/FY-1, NS0015Airbone Sensor), SEVERI/MSG, S-VISSR/FY-2, VIRR/FY-347.

B. Utilisation de l'IRT pour la détection du stress hydrique :

Lorsque les plantes sont en stress hydrique, elles réduisent l'ouverture de leurs stomates pour diminuer la transpiration et tout échange avec l'environnement, ce qui engendre une élévation leur température. Ce qui engendre une élévation de leur température. Plusieurs indices spectraux ont été développés dans l'IRT. Ces indices sont basés sur la température foliaire puisqu'elle est directement liée au statut hydrique de la plante.

Par ailleurs, ont élaboré une technique pour évaluer l'état hydrique des plantes en associant la température de surface mesurée par thermométrie infrarouge moins la température de l'air ($T_c - T_a$) avec des facteurs d'environnement (pression de vapeur, rayonnement net et vitesse de vent). Cette technique est basée sur la régression linéaire entre les 20 pressions de vapeur et l'indice ($T_c - T_a$) en utilisant deux lignes inférieure et supérieure ce qui a leur permis de définir l'indice de stress hydrique CWSI. D'après, la température composite du sol et des végétations peut engendrer des erreurs d'interprétation des indices de stress tel que le CWSI donc la solution sera de combiner les mesures IRT avec les indices de végétations ou de les limiter au niveau de la feuille. Par conséquent, d'autres méthodes sont utilisées pour remédier à ces problèmes tels que les méthodes 3D en prenant compte des échanges thermiques dans le système SVAT (sol-végétation-atmosphère). D'autres utilisent la spectro-radiométrie IRT en faisant appel aux capteurs imageurs⁴⁸.

C. Télédétection par drones dans l'agriculture :

De nos jours, les drones ou les véhicules aériens télé-pilotés sont équipés de différents capteurs permettant d'acquérir à très fine résolution spatiale des données multi-spectrales, hyper-spectrales et thermiques, l'utilisation des drones devient de plus en plus répandue et ils ont démontré leur performance dans plusieurs applications. Ils sont omniprésents dans certains pays dans l'industrie agricole et sont devenus une approche prometteuse dans l'agriculture de précision, car ils permettent le suivi non destructif de la croissance des cultures, avec une très haute résolution spatio-temporelle⁴⁹. La présente section vise à définir les drones à savoir leurs avantages, leurs limites ainsi que leurs types en s'intéressant à leurs applications dans le domaine de l'agriculture.

1. Généralité et définition :

Il existe plusieurs définitions relatives au drone tel qu'un véhicule aérien sans pilote guidé par les êtres humains à distance. Ce type de véhicule vole sur un chemin prédéterminé et

contrôlé par une station de contrôle au sol qui est composé d'une télécommande et un ordinateur ou tablette afin de contrôler l'engin au cours du vol, planifier et modifier le plan de vol 49. Par ailleurs, les drones déploient plusieurs types de capteurs, dont les plus utilisés dans l'agriculture sont de type thermique, multi-spectral et hyper-spectral. Toutefois, les capteurs actuellement utilisés devraient avoir la précision et la haute résolution pour décrire les champs en détail et fournir un suivi des cultures. Historiquement, les drones ont été utilisés principalement dans un contexte militaire ou sa première exploitation était en 1949 lorsque l'armée autrichienne a envoyé des bombes guidées au-dessus de la ville de Venise. Toutefois, l'utilisation des drones a connu un grand essor au 21 cours de la Deuxième Guerre mondiale afin de donner une vision rapide pour résoudre les problèmes des endroits non accessibles ou à risque 50. Depuis les années 2000, les drones ont commencé à jouer un rôle dans le secteur agricole afin de surveiller les grandes cultures et résoudre les problèmes tels que : l'insuffisance des mains d'œuvre, le travail fastidieux du terrain associé avec les longues périodes, le suivi phytosanitaire des plantes, etc.50

2. Drones : classification, avantages et limites :

➤ Classification des drones Dans la littérature :

Il existe plusieurs types de classification des drones⁵¹, mais il y a deux classifications qui sont les plus couramment utilisées. La première classification est basée sur les caractéristiques physiques telles que le poids de l'appareil, l'autonomie et l'altitude maximale de vol tandis que la deuxième classification est basée sur le type de voilure⁵². Selon cette dernière, il existe deux grandes catégories de drones : les systèmes d'hélicoptères à hélices et les plates-formes à voilure fixe. Les drones à hélices tournantes (voir la figure 3.2) ont des capacités de vol stationnaire et VTOL (Vertical Take-Off and Landing), tandis que les unités à voilure fixe ont tendance à avoir une durée et une portée plus longues (voir la figure 3.3). Par contre, en adoptant la première classification, il existe quatre catégories principales de drones en fonction de la taille, de la portée, de l'altitude opérationnelle et de l'autonomie⁵³.

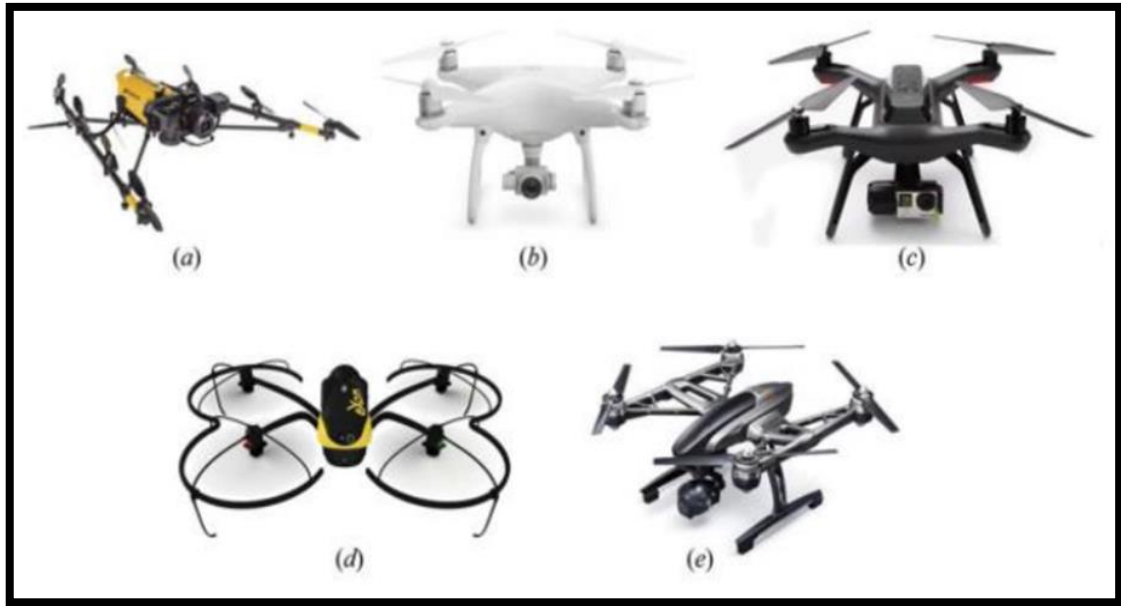


Figure 13: L'image suivante et une illustration des différents types de drone ou systèmes d'hélicoptères à hélices.

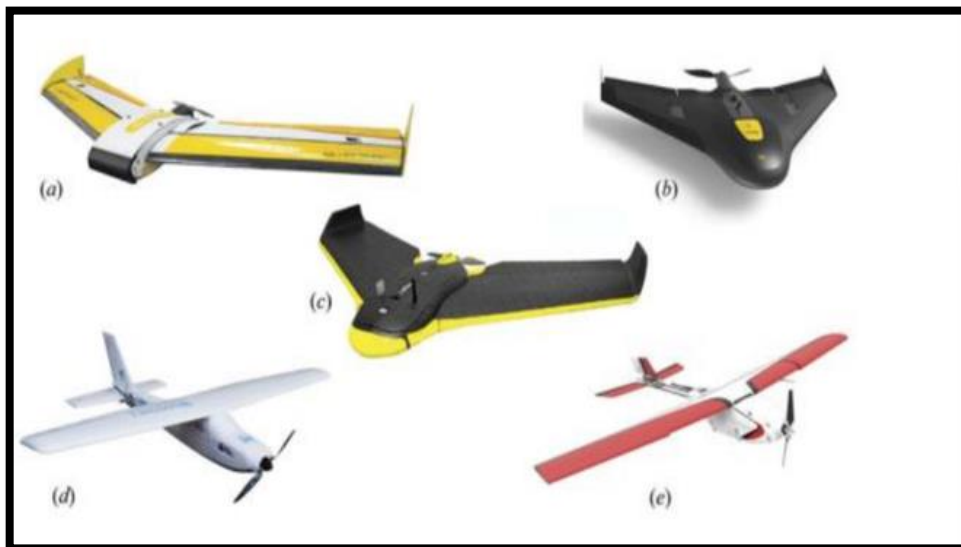


Figure 14: L'image suivante et une illustration des différents types de drone ou systèmes à plates-formes à voilure fixe.

➤ **Avantages et limites des drones :**

Les drones ou les aéronefs non habités présentent des plateformes d'acquisition avantageuses par rapport aux plateformes classiques de télédétection puisqu'ils ont plusieurs apports à différents niveaux tels que :

- Une grande flexibilité opérationnelle : grâce à leurs petites dimensions, les drones sont facilement transportés et rapidement déployés localement sans la nécessité des pistes de décollage et d'atterrissage.

- Ainsi, l'opérateur de drone est capable d'effectuer le vol ou de le retarder pendant une période de temps (quelques minutes, heures ou jours) selon les conditions météorologiques (si présence de pluie ou de couverture nuageuse) et selon la condition phénologique de la plante⁵².

- Une bonne précision de navigation, les drones sont capables de suivre le plan de vol d'une façon précise.

- Ils offrent des images plus précises qui suivent des lignes de vol qui sont parallèles, droites et bien séparées entre eux d'une distance bien définie par l'opérateur⁵⁴.

- Absence de pilote : les aéronefs non habités présentent une plateforme avantageuse et sécuritaire par rapport aux aéronefs habités de sorte qu'ils ne mettent pas la vie humaine en danger, car ces derniers lorsqu'ils volent à une basse altitude avec une vitesse atteignant la vitesse de décrochage (near-stall speeds) ne laissent pas aux pilotes le temps de réagir dans le cas de mauvaises conditions météorologiques (ex : fort vent) ou encore dans le cas d'une panne mécanique⁵³.

- Une haute précision à basse altitude : à une faible altitude de vol, les drones peuvent donner des images à très haute résolution spatiale inférieure à 0,25mètre/pixel et même 0,005 mètre/pixel contrairement aux autres plateformes classiques telles que les avions⁵³.

- Accès à des zones à risque ou inaccessibles par les aéronefs habités : les drones présentent une plateforme sécuritaire qui peuvent voler sans mettre la vie humaine en danger dans des zones à haut risque ou inaccessible par les avions⁵⁵.

Certes les drones présentent une solution plus avantageuse par rapport aux plateformes classiques (ex : les avions), mais certains points de faiblesses doivent être bien considérés tels que :

- Faible couverture.
- La réglementation peut restreindre les opérations : la réglementation de transport Canada exige un certificat d'opérations aériennes spécialisées (COAS) pour l'utilisation des drones pour des fins autres que récréatives lorsque le drone pèse plus de 35 Kg afin d'assurer la sécurité des personnels et du public⁵⁶.
- Sensibilité aux intempéries : Les drones sont sensibles aux vibrations causées par le vent qui engendre une déstabilisation de l'aéronef et qui pourrait donner des images floues ou encore déformées et qui seront non utilisables à la création d'orthomosaique⁵³.
- Difficulté à reconstituer des zones homogènes (peu de points de rattachement).
- Charge utile limitée : les faibles dimensions des drones ainsi que sa charge utile réduite limitent le choix de capteurs ainsi que l'unité de navigation⁵⁷.

3. L'application des drones agriculture :

À l'heure actuelle, les drones sont des technologies récemment introduites dans le secteur agricole en raison de leur potentiel de fournir des données riches en informations et en ultra forte résolution spatiale, de leur facilité de déploiement permettant l'acquisition fréquente de données. Ceci pourra assurer une cartographie spatio-temporelle des caractéristiques biophysiques des cultures avec une haute résolution spatiale. En offrant une observation rapide sur la zone d'étude, les drones pourraient répondre aux besoins de l'agriculture de précision. Ils offrent des données sur l'état de culture, effectuent les tâches des agriculteurs (pulvérisation d'engrais liquides, pesticides etc.) à un rythme plus rapide tout en favorisant des gains économiques et en minimisant les effets sur l'environnement (Zhang et al. 2012). Dans ce contexte, la télédétection par drones touche plusieurs aspects :

- Estimation de biomasse végétale telle que les exemples dans la culture de riz⁵⁹, la culture de blé la culture de maïs⁶⁰.

- Estimation des besoins nutritifs tels que l'azote qui est l'élément nutritif le plus important qui se caractérise par une grande variabilité spatiale. Il existe de nombreux travaux réalisés dans les cultures de riz⁵⁹ et de blé⁶⁰.

- Estimation des propriétés du sol : l'imagerie acquise par drone permet de cartographier les propriétés du sol. Gilliot et al. (2017) ont utilisé afin de déterminer la teneur en 26 carbones organiques dans une parcelle. Les données aériennes permettent de produire une carte de l'hétérogénéité de la surface du sol en caractérisant ses propriétés physiques et chimiques (granulométrie, carbone organique, azote, etc.) assemblées avec les données de l'échantillonnage du sol dans un vignoble.

- Selon les travaux de Ivushkin qui se base sur l'étude de la salinité des sols en utilisant de différents capteurs (deux caméras thermique et hyper-spectrale et un scanner avec détection de la lumière) embarqués sur drone dans les plantes de quinoa (Ivushkin et all., 2019).

- Infestations de mauvaises herbes : Les drones permettent de cartographier les mauvaises herbes tandis qu'il reste difficile de différencier les mauvaises herbes de la culture⁶¹.

- Détection des insectes et des maladies : Plusieurs études ont démontré l'efficacité des caméras multi-spectrales embarquées sur drone dans la détection des maladies et des insectes ravageurs pour différentes cultures⁶².

- Détection de stress hydrique : La télédétection par imagerie thermique a montré son potentiel pour la détection de stress hydrique, elle contribue à l'estimation des coefficients culturaux et de calculer des indicateurs de stress hydriques. Des seuils calibrés de ces derniers peuvent permettre de planifier l'irrigation et de déterminer les quantités d'eau d'irrigation⁶³.

De ce fait, plusieurs travaux sont menés pour la surveillance du stress hydrique de deux espèces d'amandiers, de la culture de coton ⁶⁴et en viticulture⁶⁵.

D. Données agro-météorologiques :

Les indicateurs agro-météorologiques sont des variables météorologiques donnant les conditions qui affectent la croissance des cultures (température, radiation solaire, évapotranspiration, etc.) en un lieu et un moment précis.

L'estimation des indicateurs agro-météorologiques dans l'espace et dans le temps permet de contrôler et de prévenir les ravageurs et les maladies des cultures, les indicateurs dérivés de données de télédétection permettent également d'estimer les conditions de croissance des cultures.

Il faut souligner l'importance de connaître les conditions météorologiques avant de réaliser un vol de drone, car la présence des pluies ou de vent pourrait influencer l'acquisition des images par drone et donner des résultats aberrants. Les données météorologiques relatives aux périodes de campagnes de terrain (température de l'air, précipitations, vitesse de vent, humidité de l'air) ont été obtenues à partir d'une station située à proximité de la parcelle expérimentale et opérée par l'IRDA. Le suivi du statut hydrique de la culture de pomme de terre s'est effectué à l'aide d'une série de tensiomètres (TX3, TX3web, Hortau) et des sondes TDR (CS625, Campbell Scientific) qui ont été bien installées dans les parcelles de régie A et B pour les huit cultivars permettant de suivre la teneur en eau volumique du sol en continu à tout moment.

5- Bénéfices environnementaux attendus des principaux procédés et techniques de l'agriculture de précision :

Le rôle de l'agriculture de précision dans les différents types de procédé agricole et les techniques utilise et leur bénéfice environnemental voir le tableau 1.

procédés	techniques	Bénéfices environnementaux
Respect des délais de travail, dans des conditions climatiques défavorables.	Guidage automatique des machines par GPS	Réduction du tassement du sol Réduction des émissions de carbone
Maintien d'une végétation permanente à des emplacements clés et aux bordures de champs.	Guidage automatique et culture suivant les courbes de niveau sur les terrains vallonnés.	Réduction de l'érosion (de 17 t/ha.a à 1 t/ha.a et peut-être moins) Réduction de l'écoulement des eaux de surface et de l'engrais.

		Réduction du risque d'inondation.
Réduction ou ralentissement du débit d'eau entre les billons de pommes de terre/légumes pour ralentir l'écoulement de l'eau	Micro-barrages ou microréservoirs entre : - Billons (billons cloisonnés) - Billons le long des contours de champ	- Réduction de l'écoulement de Sédiments - Réduction de l'écoulement d'engrais
Maintien des engrais et des pesticides aux distances recommandées des voies d'eau	- Guidage automatique basé sur les informations géographiques - Contrôle par section des pulvérisateurs et de la distribution d'engrais	Prévention/élimination de la contamination directe des eaux de rivière
Prévention du chevauchement de l'épandage de pesticides et d'engrais.	Contrôle par section des pulvérisateurs et de la distribution d'engrais	Réduction/prévention des intrants chimiques excessifs dans les sols et du risque de pollution des eaux
Application de fumier à taux variable	Détection immédiate de la composition du fumier et l'ajustement de la profondeur de l'injection	- Réduction de la pollution des eaux souterraines - Réduction des émissions d'ammoniac dans l'air
Irrigation de précision	Mappage de la texture des sols	- Prévention de la consommation excessive d'eau, d'engorgement hydrique - Réduction de la consommation d'eau douce

Pulvérisation de précision sur les vergers et les vignobles	<ul style="list-style-type: none"> - Détection de la taille des arbres et de l'architecture. - Lutte intégrée contre les organismes nuisibles de précision. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction de l'utilisation de pesticides pouvant aller jusqu'à 20 voire 30 % - Réduction de la zone pulvérisée de 50 à 80 %
Estimation de la biomasse des cultures	Indice de végétation des cultures	Ajustement de la dose de fongicide en fonction de la biomasse des cultures
Réduction de la mycotoxine	Indice de végétation des cultures et risque de maladies fongiques	Optimisation de la dose d'engrais et de l'utilisation de fongicide fondée sur un risque de maladie plus élevé dans les zones à densité de culture élevée
Épandage d'engrais azoté à taux variable en fonction des besoins des cultures et des conditions climatiques	<ul style="list-style-type: none"> - Indice de végétation des cultures basé sur des capteurs optiques - Mappage des nutriments du sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Amélioration du rendement de l'azote - Réduction de 30 à 50 % de l'azote résiduel dans les sols
Épandage d'engrais phosphorés à taux variable en fonction des besoins des cultures et des conditions climatiques	<ul style="list-style-type: none"> - Indice de végétation des cultures - Mappage des nutriments du sol 	Amélioration de la récupération du phosphore de 25 %

Tableau 01 : Quelque bénéfice environnemental attendus des principaux procédés et techniques de l'agriculture de précision.

6-L'influence de l'agriculture de précision sur les pratiques de travail et les conditions de vie sur les terres agricoles :

L'agriculture de précision réduira l'écart entre les hommes et les femmes en facilitant les opérations agricoles pour les femmes, notamment en ce qui concerne l'utilisation d'équipements lourds ou l'exécution de tâches physiques difficiles. Ces deux types d'activités seront effectués par des systèmes automatisés ou des robots. De nouvelles interactions sociales avec des perspectives plus larges sont attendues de ce changement sociétal.

L'agriculture de précision améliorera également la qualité de vie des agriculteurs européens. Comme nous l'avons vu, la robotique est largement acceptée dans les exploitations laitières. Au cours des dix dernières années, des robots ont été développés pour soulager les agriculteurs de travaux fatigants comme gratter le fumier et repousser les fourrages, des tâches par essence très répétitives et longues.

D'ici à 2050, il est prévu que de plus en plus de tâches seront automatisées, libérant du temps pour les agriculteurs. Ces derniers auront plus facilement accès à une société de loisirs équivalente à celle dont jouissent les populations urbaines.

En revanche, l'agriculture de précision pourrait avoir une incidence négative sur le travail saisonnier, les travailleurs saisonniers sont peu payés et peu qualifiés. Ils sont généralement employés pour aider aux tâches de récolte, telles que la cueillette des fruits. Plus de 4 millions de travailleurs saisonniers sont employés comme intérimaires.

6- 1- Compétences et formation des agriculteurs pour la maîtrise de l'agriculture de précision :

Comme pour toute autre technologie, l'introduction et l'adoption de l'agriculture de précision demanderont aux agriculteurs d'acquérir de nouvelles compétences. L'hypothèse générale, qui veut que la mondialisation a transformé nos économies en économies des connaissances, s'applique également à l'agriculture, les jeunes agriculteurs doivent être dotés de la bonne combinaison de compétences professionnelles spécifiques et de compétences de base transdisciplinaires pour pouvoir accéder à l'agriculture de précision.

L'agriculture de précision exige l'apprentissage de nouvelles compétences, ces compétences peuvent être classées en trois catégories : compétences en matière de TIC et de

technologies de l'automatisation et de la robotique, compétences environnementales et compétences de direction.

- Compétences technologiques :
 - Travail avec des robots.
 - Travail avec des données traitées.
 - Choix des solutions appropriées en fonction du projet agricole.
 - Sciences informatiques.
 - Machines technologiquement avancées : équipements à direction automatisée, drones.
 - Applications complexes (RTK, imagerie par satellite, etc.).
- Compétences environnementales :
 - Aptitude à comprendre la législation.
 - Expertise en matière d'agriculture circulaire.
 - Connaissances des écosystèmes locaux.
 - Expertise génétique.
- Compétences de direction :
 - Gestion d'entreprise.
 - Gestion de l'innovation.
 - Esprit d'entreprise.
 - Compétences en matière de commercialisation.

7- Pourquoi pas une assistance politiques pour facilite l'agriculture de précision :

L'Algérie pourrait envisager les options suivantes pour maintenir les agriculteurs informés des développements technologiques attendus :

- Encourager de nouvelles formes d'apprentissage :

Le secteur de l'éducation doit passer par un changement de paradigme pour diffuser les technologies de l'agriculture de précision au moyen de cours virtuels, de l'apprentissage en ligne et de programmes de formation mixte (apprentissage virtuel et en présentiel).

- Atteindre les exploitations plus petites :

Le partage des connaissances avec les petites exploitations nécessite de nouveaux mécanismes d'éducation et de mentorat. Il serait par exemple possible d'encourager les étudiants en doctorat d'agronomie ou titulaires d'un doctorat et disposant d'une expérience en agriculture de précision de rendre se rendre dans les communautés rurales avec une formule de formation et du matériel de démonstration afin de partager leurs connaissances sur l'agriculture de précision et de promouvoir de nouvelles technologies. Ces visites pourraient être réalisées avec des bus spécialement équipés pendant la saison hivernale.

➤ Combiner les connaissances traditionnelles et les technologies de l'agriculture de précision :

Pour éviter la perte des connaissances et de l'expertise traditionnelles, les relations maître-apprenti doivent être revisitées afin de privilégier l'échange d'expertise entre les anciennes et les jeunes générations.

➤ Promouvoir les formations et les conseils ciblés afin de développer l'utilisation de bonnes pratiques (prévention des erreurs) :

Les produits agricoles sont régulièrement soumis à un contrôle de respect des normes de santé et de sécurité et détruits en cas de non-conformité. À l'avenir, une plus grande attention doit être accordée à la promotion des bonnes pratiques et à l'offre de formations ciblées pour éviter autant que possible ces destructions, et en particulier la répétition d'erreurs qui entraîne des problèmes pour l'agriculteur.

➤ Exploration de nouveaux modèles commerciaux.

➤ Promotion de l'agriculture de précision en vue de l'établissement de nouvelles tendances et auprès de la nouvelle génération.

➤ Publication d'un rapport annuel sur l'adoption de l'agriculture de précision.

➤ Construction des infrastructures appropriées pour retenir et attirer les jeunes agriculteurs.

3. Le comportement spectral de la végétation :

La réflectance spectrale de la végétation est expliquée majoritairement par les propriétés optiques des feuilles. Trois phénomènes physiques sont mesurés en télédétection : la réflectance ρ (fraction de rayonnement incident réfléchi), l'absorptance α (fraction de rayonnement incident absorbé) et la transmittance τ (fraction de rayonnement incident transmis). La luminance est le rayonnement électromagnétique intercepté par le capteur utilisé et varie en fonction de la réflectance de la végétation visée. Même si l'on étudie la végétation à l'aide du domaine ultraviolet (0,01 à 0,38 μm) à celui des micro-ondes (1 mm à 30 cm), celle-ci est principalement analysée sur une étendue spectrale plus réduite, du visible (0,4 μm) à l'infrarouge thermique (14 μm) (Gerber, 2011). La chlorophylle, contenue dans la végétation, possède deux bandes d'absorption (Figure 6), une dans le bleu (0,45 μm) et une dans le rouge (0,66 μm). Les plantes sont composées à 80% d'eau et cette dernière possède, quant à elle, trois bandes d'absorption dans l'infrarouge à 1,47 μm , 1,9 μm et 2,87 μm (Figure 3.1). Les propriétés optiques des feuilles sont associées à leurs caractéristiques biochimiques : teneur en pigments, structure cellulaire, teneur en eau et état physiologique⁶⁸. Les stress présentés dans la section 2.2. Agissent fortement sur ces paramètres biochimiques et par la suite sur la signature spectrale de la végétation (Figure 3.2). Par exemple, une augmentation de la réflectance dans le rouge et une diminution de la réflectance dans le proche infrarouge permettent d'identifier un stress (Huete 2012).

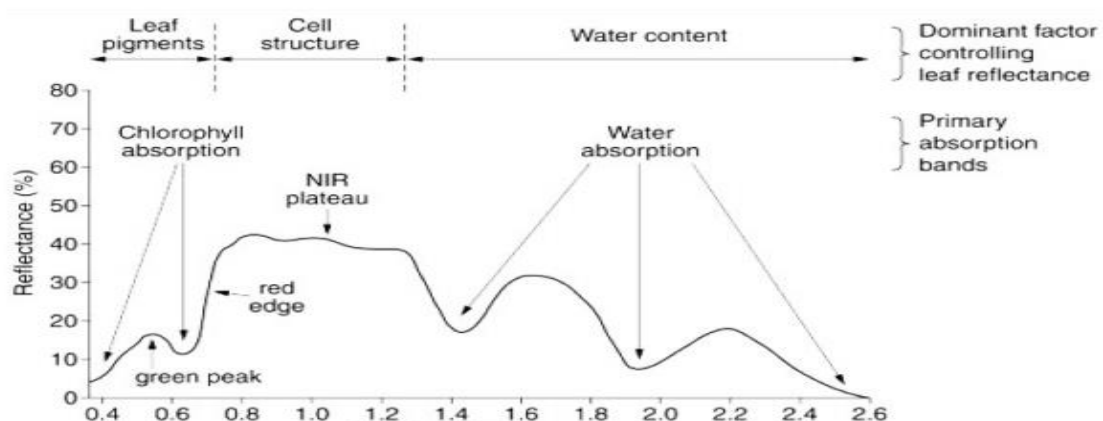


Figure 15 : signature spectrale de la végétation de 0,4 à 2,6 μm

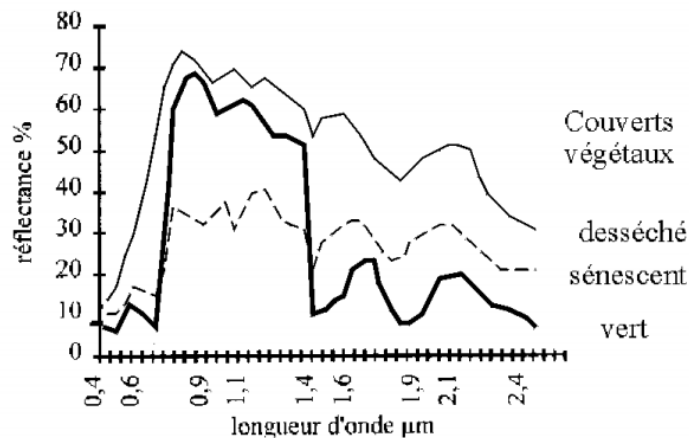


Figure 16 : mesure de réflectances sur une feuille verte, malade et desséchée.

Les variations de la réflectance spectrale à certaines longueurs d'ondes connues sont utilisées pour caractériser l'état de santé de la plante par le biais d'indices de végétation. Ces indices transforment les réflectances apparentes en rapports interprétables en environnement. La majorité des indices en lien avec l'étude de la végétation se basent principalement sur les bandes verte, rouge et proche infrarouge alors que la bande bleue est peu utilisée (UVED, 2014).

Certains indices de végétation prennent en compte la réflectance de la végétation dans l'infrarouge thermique afin d'illustrer la teneur en eau de la végétation. Des ouvertures dans l'épiderme des feuilles appelées stomates permettent les échanges gazeux avec l'atmosphère et le refroidissement des tissus. Lorsqu'un déficit hydrique est présent, la perte en eau est limitée par la fermeture des stomates qui entraîne une augmentation de la température des feuilles. Ce réchauffement de l'épiderme est également visible dans le cas d'une réaction de défense chez la plante suite à la présence d'une maladie ou une attaque d'un ravageur. De nombreuses études scientifiques utilisent la télédétection infrarouge thermique pour mesurer l'état de déshydratation de la plante. De plus, dans le cas de stress hydriques, maladies ou ravageurs, l'activité photosynthétique est également perturbée (Figure 3.3), ce qui entraîne une réduction de la surface foliaire. Trois variables sous-jacentes sont ainsi détectables par télédétection : la réduction de la biomasse, du taux de couverture du sol et de la teneur en chlorophylle (Gerber, 2011)

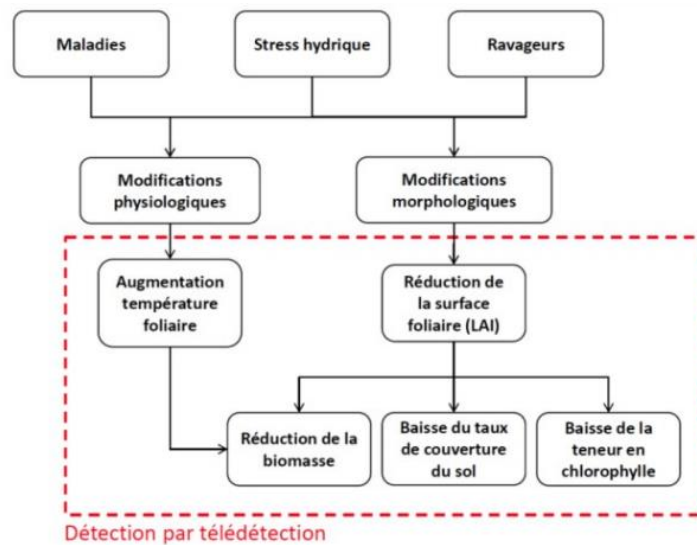


Figure 17 : Influence des stress sur les variables d'état de la plante.

2.4. Les aéronefs sans pilote Les ASP :

Sont des véhicules aériens sans pilote à bord. Ils sont autopilotés depuis le sol par une station informatisée. L'autopilote est assisté par deux opérateurs, en contact visuel permanent avec l'appareil, prêts à intervenir en cas de problème technique. L'autopilote est paramétré afin d'effectuer des prises de vues prédéterminées à des points précis. La direction, la distance entre les lignes de vol parallèles, la hauteur et la vitesse de vol sont paramétrables par l'opérateur afin d'acquérir des images de résolution spatiale connue. Pour cela, une station inertielle couplée est intégrée à la plateforme afin de mesurer les angles d'orientation de l'appareil, également appelés angles d'Euler, et ainsi stabiliser la nacelle de la caméra avec le maximum de précision. Pour chaque image acquise, les coordonnées GPS et les angles d'Euler sont intégrés aux métadonnées pour le géoréférencement. Afin de transporter le matériel d'acquisition de données, la capacité de charge utile de l'ASP doit être en lien avec les capteurs à transporter. Ces ASP sont des plateformes mobiles dont la configuration peut varier (Tableau 1), du modèle réduit d'avion à ailes fixes, d'hélicoptère, d'autogyre jusqu'au para moteur à aile souple, en passant par les multicoptères (Aber et al., 2010).

Tableau 2 : Classification des aéronefs sans pilote et leurs caractéristiques techniques.
Adapté de Gupta *et al.*, 2013

Catégorie d'ASP	Poids de l'ASP	Altitude de vol	Rayon de vol	Endurance	Altitude	Utilisations
Micro-drones (Micro Air Vehicule)	< 2 kg	> 200 pieds AGL	5 km	Quelques minutes ou heures	Très basse altitude	Reconnaissance, inspection, surveillance
Mini-drones	2 - 20 kg	> 3000 pieds AGL	25 km	> 2 jours	Basse altitude	Surveillance, collecte de données
Petits drones	20 - 150 kg	> 5000 pieds AGL	50 km	> 2 jours	Basse altitude	Surveillance, collecte de données
TUAV (Tactical Unmanned Air Vehicule)	150 - 600 kg	> 10 000 pieds AGL	200 km	> 2 jours	Basse altitude	Surveillance, collecte de données
MALE (Medium Altitude Long Endurance)	> 600 kg	> 45 000 pieds AGL	Illimité	plusieurs jours / semaines	Altitude moyenne	Surveillance, transport de fret
HALE (High Altitude Long Endurance)	> 600 kg	> 65 000 pieds AGL	Illimité	plusieurs jours / semaines	Haute altitude	Surveillance, collecte de données, relai de signaux
UCAV (Unmanned Combat Air Vehicule)	> 600 kg	> 65 000 pieds AGL	Illimité	plusieurs jours / semaines	Haute altitude	Surveillance, collecte de données, relai de signaux

AGL : altitude par rapport au niveau du sol

TABLEAU 01 : Classification des aéronefs sans pilote et leurs caractéristiques techniques

Chaque type d'ASP correspond à une ou plusieurs utilisations. Les multicoptères et hélicoptères sont des plateformes privilégiées pour l'observation des infrastructures industrielles. Les ailes fixes sont préférées pour parcourir de grandes distances comme par exemple pour la surveillance des feux de forêts ou pour l'agriculture⁷¹. C'est justement dans ce dernier secteur, l'agriculture, que la majorité des études de télédétection par ASP est effectuée (Figure 3.4).

Chapitre III :

Chapitre 3 : le comportement spectraux de la végétation

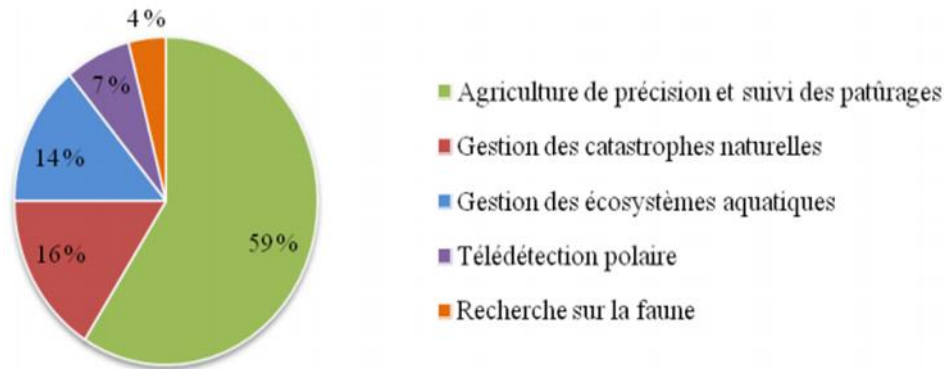


Figure 18 : Application de télédétection par aéronefs sans pilotes

Les ASP en agriculture :

Tel que présenté précédemment, la télédétection par satellite et par avion a déjà fait ses preuves pour l'étude de la végétation mais depuis plusieurs années, les ASP sont venus combler un vide entre les acquisitions au sol et les aéronefs pilotés (Nex et Remondino, 2014). L'arrivée des ASP en agriculture s'est faite progressivement en commençant par une utilisation comme plateforme pour épandre des produits phytosanitaires sur les parcelles agricoles à l'aide de rampes de pulvérisation intégrées sur des hélicoptères. Par exemple, le RMAX™ a été équipé d'un GPS différentiel afin d'effectuer de l'épandage en totale autonomie. Ensuite, les ASP sont devenus rapidement des supports pour embarquer des capteurs de télédétection. Le nombre de conférences données depuis 2002 et le nombre de publications parues depuis 2008 montrent un intérêt croissant de l'usage de la télédétection à l'aide des ASP. Aujourd'hui, les ASP sont majoritairement utilisés pour cartographier et classifier la couverture au sol, évaluer la santé des cultures et estimer les paramètres biophysiques de la végétation. En comparaison avec le satellite et l'avion, l'ASP permet de concentrer les analyses sur des zones plus réduites, à l'échelle de la parcelle, et cela avec beaucoup de précision. De plus, les agriculteurs ont le besoin de prendre des décisions rapides pour économiser du temps et de l'argent. Les problématiques présentes dans les parcelles doivent être connues rapidement et la télédétection par ASP permet d'obtenir des données

spatialisées dans un laps de temps réduit (Tanaka et al., 2011). La majorité des ASP utilisés en agriculture possède une capacité de charge utile relativement faible (< 1 kg) qui impose l'utilisation de capteurs légers et compacts. Les hélicoptères, utilisés auparavant pour la pulvérisation, ont été dotés de capteurs plus conséquents grâce à leurs charges utiles plus importantes que les ailes fixes. Par exemple, des capteurs multispectraux plus lourds comme les modèles MS2100 et MS4100 de Geospatial™ (presque 2 kg) ont pu être utilisés pour l'évaluation de la croissance végétale. Grâce à la possibilité d'augmenter la charge utile, des capteurs hyperspectraux ont également été intégrés afin, par exemple, d'évaluer le rendement du maïs. D'autres types de configuration d'ASP sont ensuite apparus comme les multicoptères à 4 moteurs. Ces systèmes ne nécessitent qu'une zone réduite pour décoller et atterrir qui permet d'opérer directement dans les parcelles visées (Huang et al., 2013). Les cultures étudiées à l'aide des ASP sont nombreuses et s'étagent de la strate herbacée, comme le blé par exemple (Torres-Sanchez et al., 2014), à la strate arbustive, comme la vigne (*Vitis sp.*) (Zarco-Tejada et al., 2013a) ou l'olivier (*Olea europaea*) (Berni et al., 2009) (Tableau 3). De plus, les paramètres biophysiques étudiés sont variés et des modèles de calcul d'estimation de rendements de production (Jensen et al., 2007), de quantité de biomasse (Swain, Thomson et Jayasuriya, 2010), ou de quantité d'eau contenue dans la plante (Baluja et al., 2012) ont été testés avec des coefficients de détermination compris entre 0,30 et 0,97. D'autres applications des ASP en agriculture existent comme l'identification des cultures illégales de cannabis (*Cannabis sativa*) dans les champs agricoles par la police régionale de l'Ontario (Aeryon, 2010). L'aspect temporel de la croissance de la végétation est également étudié, comme Lelong et al. (2008) qui ont mis en place un suivi temporel de fertilisation sur une parcelle de blé. Une seule étude scientifique traite de l'analyse des cultures de pommes de terre par ASP mais sans l'utilisation d'imagerie. Aylor et al. (2011) ont mesuré, grâce à des échantillonneurs de spores installés sous une aile fixe, la concentration de Mildiou (*Phytophthora infestans*) dans l'air à quelques mètres au-dessus de parcelles de pomme de terre dans l'état de Virginie (États-Unis).

Extraction des valeurs spectrales :

L'étape d'estimation des paramètres biophysiques des plants de pommes de terre a été effectuée par une mise en relation des mesures effectuées au sol avec l'imagerie acquise. Pour ce faire, les valeurs spectrales des images ont été extraites. Les erreurs liées au

géoréférencement des images et des points GPS ne rendent pas cohérente la méthode d'extraction de la valeur spectrale directement sous le point de mesure. Quatre méthodes d'extraction ont donc été testées : valeur directe, moyenne des pixels suivant le rééchantillonnage des images à 20 cm, à 50 cm et à 1 m de résolution. De plus, les mesures terrain des paramètres biophysiques ont été effectuées sur des quadrats d'1m², ce qui justifie l'agrégation à un maximum d'un mètre.

- Relations entre les indices de végétation et les paramètres biophysiques Afin d'estimer un ou des paramètres biophysiques pour en générer une carte, les meilleures corrélations entre les mesures terrain et les indices de végétation ont été sélectionnées. Des régressions linéaires simples, non linéaires simples et non linéaires multiples ont été testées. Néanmoins, l'accent a été mis sur la régression logarithmique, puisque la croissance du plant suit une courbe logarithme durant toute sa saison de développement (Jayanthi et al., 2007). Pour les régressions multiples, la méthode qui a été choisie est le critère d'information d'Akaike (AIC), aussi appelé inférence multimodèle. L'intérêt majeur de cette approche statistique relève de la possibilité de choisir les modèles candidats (indices de végétation) en fonction des hypothèses biologiques probables. L'AIC accorde un poids pour chaque variable en fonction de sa capacité à faire tendre la régression au plus près de la variable à estimer.

La première étape était d'évaluer la séparabilité des classes à l'aide des distances de Fisher Kernel. Cet indice est souvent appliqué dans la classification d'imagerie et dans les problématiques d'extraction spectrale (Perronnin et al., 2010; Sánchez et al., 2013). Il compare les moyennes et les variances de chaque classe pour estimer la séparabilité de ces dernières entre elles. Plus la distance est éloignée de 0, plus la séparabilité des classes est bonne. Ensuite, une classification par maximum de vraisemblance a permis de générer des cartes binaires de zones de maladies, de ravageurs, de problèmes de développement et de stress.

3.7. Analyse technico-économique :

Les plateformes utilisées pour l'acquisition d'imagerie en télédétection sont nombreuses : satellite automatique à défilement, avion à haute altitude, avion à basse altitude, aéronef sans pilote et plateforme d'acquisition au sol. Chacun de ces véhicules possède sa propre capacité de charge utile, d'emport de matériel. L'analyse technico-économique a été effectuée afin de comparer les coûts d'utilisation des ASP pour produire des cartes de dépistage par rapport à d'autres sources d'acquisition de données. Cette analyse permet de situer les coûts relatifs d'utilisation des ASP actuellement, parmi la technologie géomatique. Cette analyse se base sur les coûts d'acquisition des données et du temps-personne nécessaire à leur traitement pour produire des cartes de dépistage selon l'approche développée dans le cadre de ce projet. L'imagerie satellitaire, aérienne avec pilote et aérienne sans pilote ont ainsi servi de base à l'analyse comparative tout en tenant compte de l'échelle d'acquisition des observations aéroportées et satellitaires qui influence le coût spécifique (\$/ha). Pour chaque plateforme d'acquisition, la surface couverte par image, le temps de mise en place, les prétraitements et traitements nécessaires varient. Par exemple, la surface minimale lors de l'achat d'imagerie satellitaire Pleiades est de 50 km² alors que la surface d'une parcelle agricole est beaucoup moins importante. Un autre exemple, la location d'un drone à l'heure n'était pas possible dans le contexte du projet. Ainsi, la durée minimale de location était d'une journée, ce qui dépasse largement la durée nécessaire au survol d'une parcelle (même en incluant le temps de déplacement et de mise en place). Les résultats de l'analyse économique ont ensuite été discutés en lien avec les coûts actuels de dépistage selon la méthode au sol en considérant également la valeur ajoutée des 34 cartes de dépistage. De plus, la comparaison technique a été basée sur les études scientifiques réalisées en agriculture afin d'évaluer l'efficacité, la fiabilité, la flexibilité, la fréquence d'acquisition, les risques et les difficultés liées à la mise en œuvre et la facilité d'acquisition en fonction de la plateforme utilisée

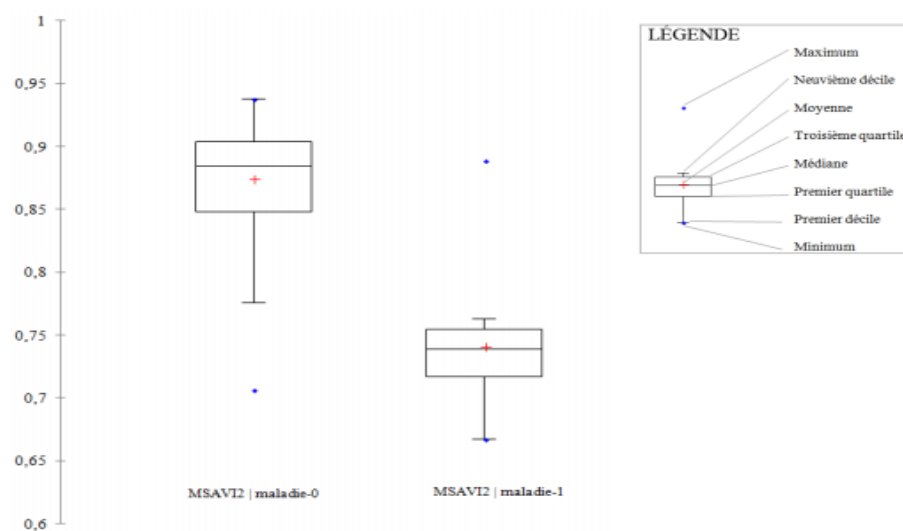


Figure 19 : Variation des valeurs pour les classes et non malade du MSAVI 2 sur l'ensemble des champs

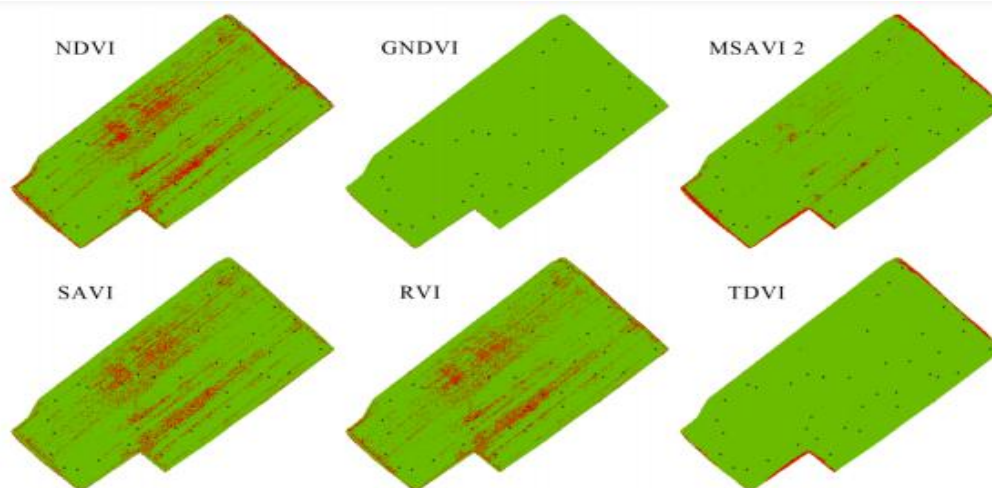
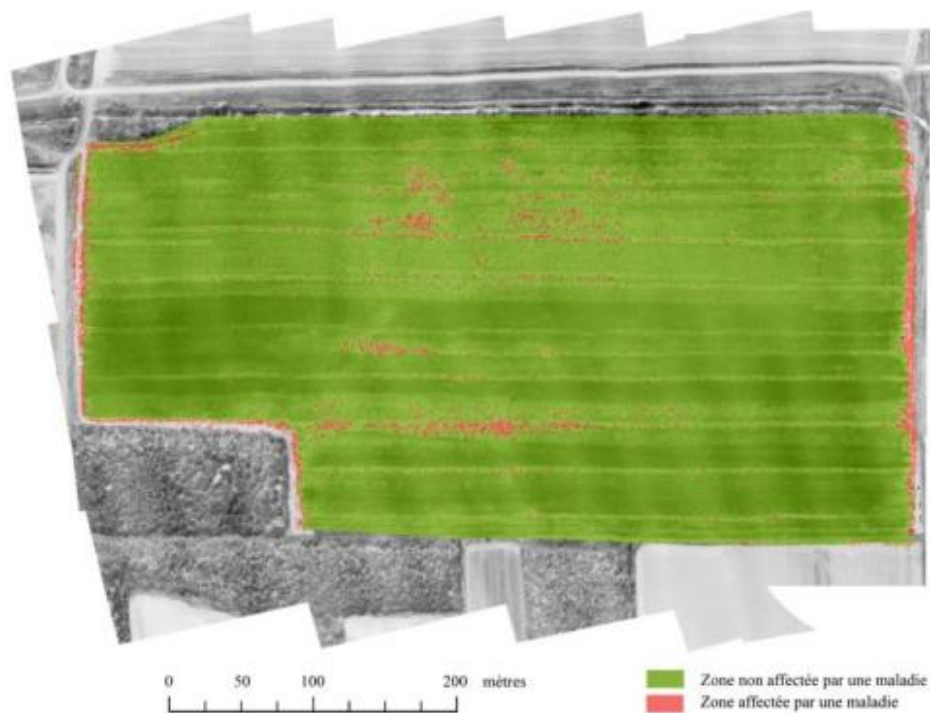


Figure 20 : Classification par maximum de vraisemblance des zones malades (en rouge) selon chaque indice de végétation sur une même parcelle de pomme de terre survolée en Montérégie.

4.3.3. Exemples de cartes de dépistage

Les cartes réalisées permettent d'identifier les zones touchées par les stress. La Figure 3.6 est un exemple des zones de maladies présentes dans une parcelle de pomme de terre en Montérégie. On observe une présence accrue de celles-ci sur les bordures du champ près des zones de sol nu (chemins d'accès). Les zones de maladies sont également regroupées au centre de la parcelle et permettent de s'interroger sur un facteur favorisant leur présence. La Figure 34 montre les zones de présence de ravageurs sur la même parcelle. Ici encore les bordures de la parcelle sont touchées. Les régions touchées par la présence de ravageurs sont très ponctuelles et regroupées. La Figure 20 et 21 en exergue les zones de problèmes de développement. Une fois de plus, les bordures ne sont pas épargnées, ainsi que la section centrale de la parcelle. Enfin, la Figure 21 illustre les zones touchées par 2 ou 3 stress avec la même tendance que les cartes précédentes



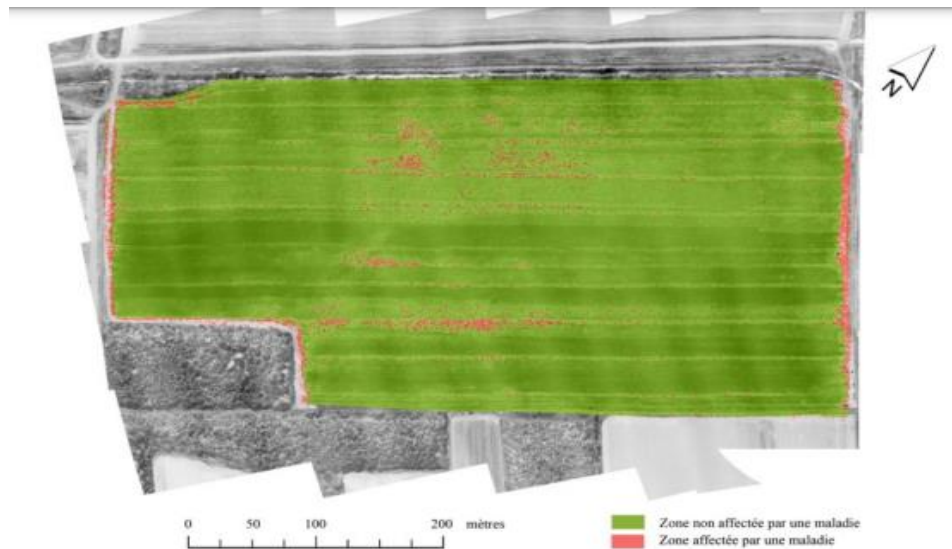


Figure 21 : Exemple d’une classification du MSAVI 2 pour identifier les zones affectées par une maladie dans une parcelle des pommes de terre en Montérégie.

2.4. Analyse technico-économique :

Les coûts de réalisation d’un tel projet sont en fonction du choix du matériel, du personnel réquisitionné et de la méthodologie utilisée. Les montants engagés dans le cadre de ce projet ont été mis en parallèles avec ceux des méthodes d’acquisition existantes, soit le satellitaire et l’aérien (par avion). Le Tableau 19 présente, pour chaque étape de l’acquisition de l’imagerie, les coûts pour la production de cartes de stress pour une parcelle de pommes de terre de 10 hectares. Deux étapes sont communes aux trois plateformes d’acquisition : les traitements et le dépistage. Les traitements consistent à la création des cartes zonales de maladies, ravageurs et problèmes de développement et le choix de la plateforme n’importe pas dans cette étape. Les dépistages sont également indépendants de la plateforme utilisée, ils sont réalisés selon le même principe. Le coût annuel pour un agriculteur est de 80 \$/acre dépisté (Roberge, 2014). En considérant deux dépistages par semaine pendant la saison de pommes de terre (29 semaines), le coût présenté est de 33 \$/heure pour une parcelle de 10 hectares. Concernant les plateformes utilisées, les coûts de l’acquisition par ASP sont propres aux coûts engagés dans le projet. Pour l’imagerie par avion, c’est également le cas puisque, comme exprimé dans la section 3.3, un aéronef habité a été utilisé durant la première année. Le satellite choisi pour la comparaison est le capteur multispectral Pléiades™ de résolution 0,5 m x 0,5 m avec une capacité de revisite de 2 jours. La surface minimale possible à l’achat est de 50 km² à 30 \$/km². Le taux horaire de 30\$ de prétraitements et traitements est le salaire moyen d’un

spécialiste en géomatique et télédétection. Les coûts totaux classent la plateforme aérienne comme la moins onéreuse des trois devant le satellite et l'ASP. Ce dernier est donc la plateforme la plus chère pour l'acquisition de petites surfaces.

5.2. Traitements

5.2.1. Extraction des valeurs spectrales :

Le choix de l'agrégation des valeurs spectrales dans une zone tampon d'1 m² a permis d'améliorer la relation entre les images et les mesures des paramètres biophysiques au sol. Les extractions des valeurs directes des pixels ne permettaient pas d'estimer assez précisément les paramètres mesurés. La méthode utilisée par Lelong et al. (2008) a donc été testée dans ce projet. Dans leur étude, ils démontrent que le choix de la méthode d'extraction des valeurs spectrales influence la qualité de la régression entre les images et les sites mesurés; ce que les résultats du projet confirment également. Dans leur étude sur des parcelles de blé (*Triticum sp.*), les valeurs spectrales sont moyennées dans une zone tampon de 50 cm, ce qui permet de limiter les erreurs possibles de géo référencement, de distorsions géométriques et de l'inclusion majoritaire des pixels de sol. Dans le cadre de ce projet, l'agrégation à un mètre est la méthode qui obtient les meilleurs résultats. De plus, elle est en concordance avec les mesures terrain des paramètres biophysiques puisque ces dernières ont été effectuées sur des quadrants d'1 m², ce qui correspond à la largeur d'un rang de pomme de terre.

5.2.2. Estimation des paramètres biophysiques

Les indices de végétation utilisés ont été choisis afin de déterminer lequel d'entre eux pouvait estimer au mieux certains paramètres biophysiques. L'indice NDVI, le plus souvent utilisé en agriculture, se positionne ici avec l'indice SAVI juste après l'indice MSAVI2 comme les meilleurs indices de végétation à utiliser. Effectivement, parmi le peu d'études portant sur la télédétection de la pomme de terre, Wu et al. (2007) ont appuyé le fait que l'indice MSAVI 2 est l'indice qui permet le mieux d'estimer les paramètres biophysiques de la pomme de terre. Cet indice a permis dans ce projet de modéliser la biomasse humide tout au long de la saison de croissance de la pomme de terre avec un minimum d'erreurs. Langley et Megonigal (2012) confirment que l'indice MSAVI 2 est également un prédicteur robuste pour quantifier les variations de croissance de la végétation. Les résultats obtenus grâce à la régression logarithmique sont relativement bons en comparaison des résultats de régression d'autres études en agriculture (par exemple, un R² de 0,76 pour l'estimation de la biomasse du riz par Swain, Thomson et Jayasuriya en 2010 ou un R² de 0,88 pour l'estimation 61 de la biomasse sèche du maïs par Hunt et al. en 2005). Dans le cas de la télédétection de cultures de pomme de terre par ASP, les recherches n'étant

qu'à leurs débuts, il est difficile de comparer les résultats obtenus dans ce projet avec d'autres études. Depuis seulement 2 à 3 ans, quelques projets de recherche sur l'utilisation des ASP pour la télédétection des cultures de pommes de terre sont mis en place mais aucune publication scientifique n'est disponible. Seulement quelques informations sont accessibles sur le web à propos des avancées de ces projets. Par exemple, une étude en cours tente de différencier par ASP les cultures de pommes de terre et les cultures de patates douces (International Potato Center, 2014). Une seconde équipe de recherche essaie de déterminer les zones de maladies, de problèmes de développement ainsi que les dégâts liés à la présence de Doryphores dans les parcelles de cultures de pommes de terre aux États-Unis (Oregon State University, 2014). Les ASP étant de plus en plus utilisés en télédétection agricole, les publications scientifiques sur les pommes de terre devraient apparaître d'ici peu et la comparaison des résultats sera donc rendue possible. Le choix des paramètres à estimer a été orienté grâce à plusieurs études scientifiques qui montrent que les paramètres biophysiques des cultures agricoles les plus efficacement estimables sont : la chlorophylle (Baluja et al., 2012; Berni et al., 2009), le LAI (par l'utilisation du PIR) et la concentration en azote de la canopée (Feng et al., 2014). La biomasse humide est également un des paramètres biophysiques fortement corrélés avec les indices de végétation (Lu, 2006). Dans ce projet, c'est la biomasse humide qui a été estimée avec le plus de précision. La régression nonlinéaire logarithmique est apparue comme la plus pertinente pour l'estimation des paramètres biophysiques de la pomme de terre. Même si dans le cas des cultures céréalières la régression linéaire simple est usuelle, Wu et al. (2007) confirment le choix d'utiliser la régression non-linéaire logarithmique dans leur étude pour l'estimation de la pomme de terre alors que les cultures de type céréalières sont concernées par des régressions linéaires simples. Ce procédé génère des cartes de quantité de biomasse humide au mètre carré. Au niveau commercial, les entreprises fournissent généralement des cartographies des parcelles agricoles exprimées en valeurs d'indices de végétation (l'entreprise ING Aviation robotisée par exemple). Une des plus-values du projet est de pouvoir créer des cartes de quantités de végétation qui peuvent être comparées au stade de végétation de la culture et ainsi déterminer les zones de végétation moins développées. Grâce à ces cartes, un conseiller agronome peut facilement établir un plan de gestion phytosanitaire ou de fertilisation en cohérence avec les variations intra-parcellaires.

5.2.3. Production de cartes de dépistage :

- Qualité de la classification La classification a été établie grâce à 139 points de dépistages avec une bonne représentativité de valeurs stress et non-stress. Pour chaque indice, l'analyse

des moyennes et écarts-types pour chaque classe a permis de mettre en relief le potentiel de chaque indice. L'utilisation des bandes visibles infrarouges (rouge, vert et PIR) permet de classer correctement les zones de maladies contrairement aux ravageurs et aux problèmes de développement. Cependant, l'utilisation de l'imagerie infrarouge thermique permet d'améliorer la classification des problèmes de développement dans les parcelles de pomme de terre par rapport à l'imagerie infrarouge. Même s'il est important de stipuler que seulement 60 points de validation répartis sur 5 parcelles agricoles ont été utilisés (soit 2 points/ha sur un total de 30 hectares), la qualité de la classification est illustrée par la bonne séparabilité des classes entre elles. Ce point est important car il permet de classer les valeurs des indices de végétation avec un minimum d'erreur.

- Détermination des stress L'agriculteur, afin d'appliquer une gestion appropriée, a besoin de connaître exactement la cause du stress présente dans ses cultures. Comme présenté dans ce projet, il est difficile de séparer les types de stress seulement à l'aide de la télédétection multi spectrale et Guertal et Shaw (2004) appuient ce point dans leur étude. L'imagerie multispectrale permet d'identifier les stress mais pas de déterminer leur typologie (Seelan et al., 2003). C'est pour cela que, dans de nombreuses études, des capteurs hyperspectraux sont utilisés puisqu'ils permettent de tester les bandes spectrales en fonction des besoins et des problématiques recherchées. Les bandes qui fonctionnent le mieux sont retenues pour ainsi créer des indices de végétation qui permettent de déterminer avec précision les typologies de stress comme par exemple les indices TCARI (Transformed Chlorophyll Absorbance Ratio) (chlorophylle) ou OSAVI (Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index) (structure de la plante) (ZarcoTejada et al., 2013a; Im et al., 2012; Lein, 2012; Brosinsky et al., 2014; Latorre-Carmona et al., 2014). Dans le cas de la pomme de terre, Ray et al. (2010) ont pu, à l'aide de l'imagerie hyperspectrale, déterminer 9 bandes spécifiques pour déterminer les différences de variétés, les zones irriguées et les cas de maladie de mildiou (*Phytophthora infestans*) dans les parcelles étudiées (520, 560, 660, 690, 730, 760, 780, 790 et 800 nm). Néanmoins, plusieurs facteurs freinent actuellement l'utilisation des capteurs hyperspectraux. Le réel défi technique est l'intégration d'un tel capteur sur un ASP. Les poids importants de ces capteurs (> 1 kg) font en sorte qu'ils sont encore peu utilisés sur les ASP. Ils sont également relativement chers comme par exemple les caméras hyperspectrales de Resonon™ et Rikola™ qui sont en vente à partir de 20 000 \$. De plus, la quantité de données fournie par un capteur hyperspectral étant largement supérieure à celle d'un capteur multispectral, une chaîne de traitements automatisés est plus complexe à mettre en place. La compagnie Tetracam™, par

exemple, propose une alternative avec la MiniMCA en donnant la possibilité de choisir ses propres bandes (4, 6 ou 12) à l'aide de filtres amovibles. La quantité de données à traiter est donc réduite tout en laissant à l'utilisateur le choix des bandes spectrales qu'il souhaite. Grâce à cela, l'automatisation des traitements puis la commercialisation de cartes de dépistage pourraient être grandement facilitées.

- Cartes de dépistage Cependant, les cartes zonales de maladies ne dispensent pas les dépisteurs de parcourir les parcelles car il est nécessaire de déterminer quelles sont les typologies des maladies présentes. Ces cartes permettent de cibler les zones touchées par une maladie, un ravageur ou un problème de développement et ainsi concentrer les dépistages dans ces zones. Cette méthode permet de réduire considérablement les temps de dépistages. Cependant, il ne faut pas omettre le temps d'acquisition et de traitement des images. Dans le cadre de ce projet, ces cartes zonales ont pu être générées en seulement 12 heures, une fois la chaîne de traitement établie. Ceci permet donc de fournir une carte de dépistage dès le lendemain aux dépisteurs. Afin de générer les cartes dans un délai plus court, (par exemple sur place), cartes de dépistage, il sera nécessaire de réaliser la chaîne de traitement en temps réel et notamment avec un logiciel de traitement embarqué. De plus, pour pouvoir appliquer cette approche à grande échelle, il faut tester sa généralisation sur des parcelles de sols, climats et variétés de pommes de terre différents.

64 5.3. Analyse technico-économique Tel qu'expliqué dans la section précédente, cet outil est destiné à appuyer les dépistages. Cependant, le gain de temps d'un dépistage à l'aide d'une carte vis-à-vis d'un dépistage conventionnel reste à estimer. Il est clair que le temps de réalisation des dépistages à l'aide des cartes est plus court. Il faudrait déterminer le temps-personne économisé pour chaque parcelle pour ensuite l'extrapoler à l'année et ainsi connaître la plus-value financière de cette approche. Mais les dépistages des champs à pied par des personnes spécialisées ne peuvent être supprimés par la cartographie des stress par ASP, mais réellement raccourcis en temps d'exécution, en modifiant la méthodologie utilisée (aléatoire) pour se concentrer seulement sur les zones problématiques. Le dépistage au sol, après détection des zones de stress par drone, permettrait de caractériser la typologie des maladies, ravageurs et problèmes de développement identifiés seulement sur les zones de stress détectées par ASP. Plus globalement, de nombreuses publications (Colomina et Molina, 2014; Gupta et al., 2013; Zhang et Kovacs, 2012) évaluent les ASP comme les plateformes les plus efficaces en agriculture en comparaison avec l'imagerie aérienne et satellitaire. Même si les coûts de

production des cartes par ASP présentés dans cette étude sont élevés, ceux-ci sont basés sur un contexte de recherche et développement et une compétition relativement faible dans le marché des fournisseurs de service (opérateurs d'ASP). Dans les prochaines années, une croissance du nombre d'entreprises d'opérations et de services par ASP peut vraisemblablement être envisagée, ce qui aura comme conséquence de faire diminuer les coûts de vols. Certains pays où ce marché est plus développé commercialisent déjà des produits cartographiques agricoles. Par exemple, l'entreprise Airinov (Airinov, 2015) offre un service de carte « conseil azote » par ASP pour la culture de colza au tarif de 21\$/ha et se base sur une analyse de gain financier pour vendre son produit. D'autre part, d'autres méthodes et outils bon marché sont disponibles et permettent d'effectuer des acquisitions d'imagerie à moindre coûts. Les logiciels libres en font partie, comme par exemple Qgis, logiciel de géomatique gratuit. L'association ConservationDrones (ConservationDrones, 2015) présente également des projets de conservation de l'environnement par ASP à coûts réduits. Les plateformes utilisées, principalement des plateformes de type aile fixe, sont construites entièrement en polystyrène à la main et sont donc peu coûteuses. L'autopilote est également libre et le boîtier ne coûte que 300\$. Il est donc possible de trouver des alternatives afin de réaliser des campagnes de prises de données avec un budget limité. Dans le cadre opérationnel, les coûts seront moins élevés que dans le cadre de projets de recherche comme celui-ci où le tarif fixe (1 journée) n'est pas avantageux pour couvrir de petites parcelles. Dans un modèle où ce type de plateforme est mutualisée (ex : achat de groupe), on peut anticiper une réduction des coûts d'utilisation par unité de surface lié à l'amortissement de l'équipement et à son utilisation sur de plus grandes superficies (ex : utilisation par des conseillers agricoles). Le défi de standardisation et d'expertise de traitements des données dans ce contexte reste cependant présent. La facilité de mise en place de l'ASP et la fréquence élevée possible des vols sont les principaux avantages de l'utilisation d'une telle technologie par rapport à l'acquisition des données par avion ou par satellite (Tableau 20). Effectivement, un espace limité au sol permet le décollage et l'atterrissage des ASP. Les motoplaneurs sont souvent utilisés en agriculture car lancés à la main, ils nécessitent seulement un espace d'atterrissage recouvert de végétation basse comme dans les parcelles agricoles survolées par exemple. Les ASP de type VTOL (Vertical Take Off / Landing) comme le Responder utilisé dans ce projet, décollent et atterrissent au même endroit, sur une emprise maximum de 9 m². De plus, le vol à basse altitude permet à l'ASP, contrairement au satellite, d'obtenir des données d'imagerie même en présence d'un couvert nuageux. Les images acquises ont également de meilleures résolutions spatiales que les deux autres plateformes. Cependant, les

superficies couvertes par les capteurs placés dans le satellite et l'avion sont largement plus importante que celles couvertes par l'ASP. Enfin, les ASP sont limités par une faible charge utile (inférieure à 15kg pour la majorité d'entre eux) et par la réglementation des vols.

Références

- Aber J.S., Marzloff I. et Ries J.B. (2010) Small-Format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications. Elsevier Science & Technology, 266p.
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2013) Information sur les marchés. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Ottawa, Ontario.
- <http://www.agr.gc.ca>. Airinov (2015) Préconisations de fertilisation azotée sur blé et colza. Paris, France. <http://www.airinov.fr> [Consulté le 03-02-2015]. Arnon, A.I., Ungar E.D., Svoray T., Shachak M., Blankman J. et Perevolotsky A. (2007) The application of remote sensing to study shrub-herbaceous relations at a high spatial resolution. Israel Journal of Plant Sciences. Vol. 55 (1). 73-82. Association for Unmanned Vehicle Systems International (2014) Robotic agriculture market emerges. Mission critical. Vol. 4 (2). 8-9.
- **Atzberger C. (2013)** Advances in remote sensing of agriculture: Context, description, existing operational monitoring systems and major information needs. Remote sensing. Vol. 5. 949- 981.
- **Aylor D.E., Schmale D.G., Shields E.J., Newcomb M. et Nappo C.J. (2011)** Tracking the potato late blight pathogen in the atmosphere using unmanned aerial vehicles and Lagrangian modeling. Agriculture and forest meteorology. Vol. 151. 251-260.
- **Bachmann F., Herbst R., Gebbers R. et Hafner V.V. (2013)** Micro UAV based georeferenced orthophoto generation in VIS+NIR for precision agriculture. International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Vol. 40 (2). 11-16.
- **Baluja J., Diago M.P., Balda P., Zorer R., Meggio F., Morales F. et Tardaguila J. (2012)** Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). Irrigation Science. Vol. 30. 511-522.

- **Bannari A., Asalhi H. et Teillet P.M. (2002)** Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. *IEEE transactions on geosciences and remote sensing*. 7803-7536.
- **Bendig J., Willkomm M., Tilly N., Gnyp M.L., Bennertz S., Qiang C., Miao Y., Lenz-Wiedemann V.I.S. et Bareth G. (2013)** Very high resolution crop surface models (CSMs) from UAV-based stereo images for rice growth monitoring in Northeast China. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*. Vol. 40 (1). 45-50.
- **Berni J.A.J., Zarco-Tejada P.J., Suárez L. et Fereres E. (2009)** Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *IEEE T. Geosciences Remote*. Vol. 47. 722-738.
- **McVey G.R. (1968)** Measuring color of growing turf with a reflectance spectrophotometer. *Agronomy Journal*. Vol. 60. 640-649.
- **Boudache M. (2013)** Communication personnelle. Prisme Consortium. mboudache@prisme.ca. Sherrington, Québec, Canada.
- **Brosinsky A., Lausch A., Doktor D., Salbach C., Merbach I., Gwilym-Margianto S., Pause M. (2014)** Analysis of Spectral Vegetation Signal Characteristics as a Function of Soil Moisture Conditions Using Hyperspectral Remote Sensing. *Journal Indian Society Remote Sensing*. Vol. 42(2). 311-324.
- **Caloz R. et Collet C. (2001)** Précis de télédétection. Volume 3. Traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'université du Québec, Québec. 386 p.
Carisse O. (2014) Comment bien utiliser ses fongicides – systémiques, translaminaires et cie – dans l'oignon. *Agriculture et agroalimentaire Canada*. Ville de Québec, Québec. 5 p.
- **Felderhof L. et Gillieson D. (2011)** Near-infrared imagery from unmanned aerial systems and satellites can be used to specify fertilizer application rates in tree crops. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 37 (4). 376-386.
- **Feng W., Guo B.B., Wang Z.J., He L., Song X., Wang Y.H. et Guo T.C. (2014)** Measuring leaf nitrogen concentration in winter wheat using double-peak spectral reflection remote sensing data. *Field crops Research*. Vol. 159. 43-52.

- **Fukagawa T., Ishii K., Noguchi N. et Terao H. (2003)** Detecting crop growth by a multispectral imaging sensor. American Society of Agricultural Engineers. N°033125.
- **St. Joseph. Furfaro R., Ganapol B.D., Johnson L.F., et Herwitz S. (2005)** Model-based neural network algorithm for coffee ripeness prediction using helios UAV aerial images. International Society for Optics and photonics. Proceedings of Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems and Hydrology. 1- 11.
- **Galford G.L., Mustard J.F., Melillo J., Gendrin A., Cerri C.C. et Cerri C.E.P. (2008)** Wavelet analysis of MODIS time series to detect expansion and intensification of row-crop agriculture in Brazil. Remote sensing of environment. Vol. 112. 576-587.
- **Gerber F. (2011)** Estimation du contenu en eau de la végétation par télédétection hyperspectrale dans le moyen infrarouge. Thèse de doctorat, École doctorale des Sciences de la Terre. Paris. 149 p.
- **Girard M.C. et Girard C.M. (1999)** Traitement des données de télédétection, Éditions Dunod, Paris, 530 p.
- **Giroux I. et Sarrasin B. (2011)** Pesticides et nitrates dans l'eau souterraine près de cultures de pommes de terre - Échantillonnage dans quelques régions du Québec en 2008 et 2009, ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Québec, 31 p.
- **Grenzdörffer G.J., Engel A. et Teichert B. (2008)** The photogrammetric potential of low-cost UAVs in forestry and agriculture. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Vol. 37. Part. B1. 1207-1213.
- **Grimaudo J. (2009)** Factors that influence the adoption of precision agriculture technologies with Quebec farmers. Mémoire de maîtrise, Science de la gestion, HEC Montréal, 107 p.
- **Guertal E.A., et Shaw J.N. (2004)** Multispectral radiometer signatures for stress evaluation in compacted bermudagrass turf. HortScience. Vol. 39 (2). 403-407.
- **Guillen-Climent M.L., Zarco-Tejada P.J., Berni J.A.J., North P.R.J. et Villalobos F.J. (2012)** Mapping radiation interception in row-structured orchards

using 3D simulation and highresolution airborne imagery acquired from a UAV. Precision Agriculture Vol. 13 (4). 473-500.

- **Gupta S.G., Ghonge M.M., Jawandhiya P.M. (2013)** Review of Unmanned Aircraft System (UAS). International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology. Vol. 2. 13 p.
- **Gusso A., Ducati J.R., Veronez M.R., Arvor D. et Da Silveira L.G. (2013)** Spectral model for soybean yield estimate using MODIS/EVI data. International Journal of Geosciences. Vol. 4. 1233-1241.
- **Hack H., Bleiholder H., Weber E., Feller C., Hess M., Wicke H., Meier U., Van Den Boom T., Lancashire P.D., Buhr L., Klose F.R. et Strauss R. (2001)** Stades phénologiques des mono-et dicotylédones cultivées. BBCH monographie. Centre fédéral de recherches biologiques pour l'agriculture et les forêts. 166 p.
- **Han-Ya I., Ishii K. et Noguchi N. (2010)** Satellite and aerial remote sensing for production estimates and crop assessment. Environment Control in Biology. Vol. 48 (2). 51-58.
- **Herwitz S.R., Johnson L.F., Arvesen J., Higgins R., Leung J., et Dunagan S. (2002)** Precision agriculture as a commercial application for solar-powered unmanned aerial vehicles. Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics UAV Conference. Portsmouth, Virginia, USA. 1-7.
- **Honkavaara E., Saari H., Kaivosoja J., Pölönen I., Hakala T., Litkey P., Mäkynen J. et Pesonen L. (2013)** Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight uav spectral camera for precision agriculture. Remote Sensing. Vol. 5. 5006-5039.
- **Huang Y., Thomson S.J., Hoffman W.C., Lan Y. et Fritz B.K. (2013)** Development and prospect of unmanned aerial vehicle technologies for agricultural production management. International Journal of Agricultural & Biological Engineering. Vol. 6 (3). 1-10.
- **Huete A.R. (1988)** A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment. Vol. 25. 295-309.

- **Huete A.R. (2012)** Vegetation indices, remote sensing and forest monitoring. *Geography Compass*. Vol. 6 (9). 513-532.
- **Hunt J.E.R., Cavigelli M., Daughtry C.S.T., McMurtrey J.E., et Walthall C.L. (2005)** Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*. Vol. 6 (4). 359-378.
- **Hunt Jr J.E.R., Hively W.D., Fujikawa S.J., Linden D.S., Daughtry C.S.T., et G. W. McCarty (2010)** Acquisition of NIR-Green-Blue digital photographs from unmanned aircraft for Crop monitoring. *Remote Sensing*. Vol. 2 (1). 290-305.
- **Im J., Jensen J.R., Jensen R.R., Gladden J., Waugh J. et Serrato M. (2012)** Vegetation Cover Analysis of Hazardous Waste Sites in Utah and Arizona Using Hyperspectral Remote Sensing. *Remote Sensing*. Vol. 4. 327-353.
- **73 INRA (2005)** La réponse des plantes aux stress environnementaux. Le stress hydrique ou osmotique. Support de présentation. Institut national de la recherche agronomique.
- **<https://www.bordeaux.inra.fr/umr619/telechargement/cours2-2005-VL.pdf>** Institut de la statistique du Québec (2013) Institut de la statistique du Québec. Superficie du territoire zoné agricole. Québec.
- **<http://www.stat.gouv.qc.ca> [Consulté le 09-09-2013]**. International Potato Center (2014) Invasion of the Potato Drones.
- **<http://cipotato.org/pressroom/blogs/invasion-of-the-potato-drones> [Consulté le 15-09-2014]**.
- **Jacquemoud S. et Bousquet L. (2005)** Modélisation des propriétés optiques des feuilles : état de l'art, perspectives et applications en télédétection. Actes du 12ème Congrès de l'Association Québécoise de Télédétection, "La relève : une télédétection en évolution", 10-12 mai 2005, Ville de Saguenay, Québec, Canada. 8 p.
- **Jayanthi H., Neale C.M.U. et Wright J.L. (2007)** Development and validation of canopy reflectance based crop coefficient for potato. *Agricultural water management*. Vol. 88. 235-246. Jean C. (2002) Maladies, insectes nuisibles et utiles de la pomme de

terre. Guide d'identification. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), Sainte-Foy, Québec, Canada. 60 p.

- **Jensen T., Apan A., Young F. et Zeller L. (2007)** Detecting the attributes of a wheat crop using digital imagery acquired from a low-altitude platform. *Computers and electronics in agriculture*. Vol. 59. 66-77.
- **Kolor (2011)** Autopano Giga 2.5 - User manual. 69 p. Francin. France.
<http://www.kolor.com/> [Consulté le 07-06-2014].
- **Laliberté A.S. et Rango A. (2009)** Texture and scale in object-based analysis of subdecimeter resolution unmanned aerial vehicle imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 47 (3). 761-770.
- **Lamine C., Meynard J.M., Perrot N. et Bellon S. (2009)** Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques: les cas de l'agriculture biologique et de la protection intégrée. *Innovations Agronomiques*. Vol. 4. 483-493.
- **Landry C., Boivin C. et Vallée J. (2014)** Relations entre le statut hydrique du sol et les stades de développement de la pomme de terre irriguée. Rapport final remis au CDAQ. Institut de recherche et de développement en Agroenvironnement. 58 p.
- **Langley J.A. et Megonigal J.P. (2012)** Field-Based Radiometry to estimate tidal marsh plant growth in response to elevated CO₂ and nitrogen addition. *Wetlands*. Vol. 32. 571-578.
- **Larousse (2014)** Pomme de terre in *Encyclopédie Larousse*.
http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/pomme_de_terre/81355. [Consulté le 06-10-2014].
- **Latorre-Carmona P., Knyazikhin Y., Alonso L., Moreno J.F., Pla F. et Yan Y. (2014)** On Hyperspectral Remote Sensing of Leaf Biophysical Constituents: Decoupling Vegetation 74 Structure and Leaf Optics Using CHRIS-PROBA Data Over Crops in Barrax. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*. Vol. 11 (9). 1579-1583.
- **Lein J.K. (2012)** Environmental sensing. *Analytical Techniques for Earth Observation. Hyperspectral sensing*. Springer New York. 334 p.

- **Lelong C.C.D., Burger P., Jubelin G., Roux B., Labbé S. et Baret F. (2008)** Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots. *Sensors*. Vol 8. 3557-3585.
- **Li Y., Zhou Q., Zhou J., Zhang G., Chen C., Wang J. (2014)** Assimilating remote sensing information into a coupled hydrology-crop growth model to estimate regional maize yield in arid regions. *Ecological modelling*. Vol. 291. 15-27.
- **Meyzonnette J.L. et Lepine T. (2003)** Bases de la radiométrie optique. Éditions Cépadués. Paris, France. 252 p. MAPAQ (2013) La lutte intégrée contre le Doryphore de la pomme de terre. Ministère de l'Agriculture, Pêcheries et Alimentation. Sainte-Foy, Québec, Canada. 2 p.
- **Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt (2006)** L'agriculture dans le monde. *Bimagri*. HS. Vol. 18. 4-5.
- **Mishra V., Cruise J.F., Mecikalski J.R., Hain C.R. et Anderson M.C. (2013)** A remote-sensing driven tool for estimating crop stress and yields. *Remote Sensing*. Vol. 5. 3331-3356.
- **Moller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky V., Sprintsin M. et Cohen S. (2006)** Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Journal of Experimental Botany*. 58 p.
- **Mulla D.J. (2012)** Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems engineering*. Vol. 114. 358-371.
- **Murakami T., Yui M., and Amaha K. (2012)** Canopy height measurement by photogrammetric analysis of aerial images: application to buckwheat (*Fagopyrum*

Esculentum Moench) lodging evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 89. 70-75.

- **Nex F. et Remondino F. (2014)** UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*. Vol. 6. 1-15.

- **Oregon State University (2014)** Remote-controlled aircraft to fly near Hermiston for potato research. <http://oregonstate.edu/> [Consulté le 15-09-2014].

- **Pandya M.R., Shah D.B., Trivedi H.J., Lunagaría M.M., Pandey V., Panigrahy S. et Parihar J.S. (2013)** Field Measurements of Plant Emissivity Spectra: An Experimental Study on Remote Sensing of Vegetation in the Thermal Infrared Region. *Journal of Indian Social Remote Sensing*. Vol. 41 (2). 787-796.

- **Patel N.R., Anapashsha R., Kumar S., Saha S.K. et Dadhwal V.K. (2009)** Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation index (TVDI) to infer soil moisture status. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 30 (1). 23-39.

- **75 Pena J.M., Torres-Sanchez J., De Castro I.A., Kelly M., Lopez-Granados F. (2013)** Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *Plos One*. Vol 8 (10). 1-11.

- **Perronnin F., Sánchez J. et Mensink T. (2010)** Improving the Fisher Kernel for large-scale image classification. *ECCV 2010. Part 4. Lecture Notes in CS 6314*. 143-156.

- **Pinter P.J., Hatfield J.L., Schepers J.S., Barnes E.M., Moran M.S., Daughtry C.S.T., et Upchurch D.R. (2003) Remote sensing for Crop Management. 18 p. Prisme Consortium (2013) Pomme de terre. Document de formation de dépistage. Sherrington, Québec, Canada. 93 p.**

- **Qi J., Chehbouni A., Huete A. R. et Kerr Y. H. (1994) A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. Remote Sensing of Environment. Vol.48. 119-126.**

- **Rango A., Laliberte A., Steele C., Herrick J.E., Bestelmeyer T.S., Schmugge T., Roanhorse A. et Jenkins V. (2006) Using Unmanned Aerial Vehicles for rangelands: current applications and future potentials. Environmental Practice. Vol. 8. 159-168.**

- **Ray S.S., Singh J.P. et Panigrahy S. (2010) Use of hyperspectral remote sensing data for crop stress detection: ground-based studies. International archives of the photogrammetry. Remote sensing and spatial information science. Vol. 38. Part 8. 562-567.**

- **Ray S.S., Jain N., Arora R.K., Chavan S. et Panigrahy S. (2011) Utility of hyperspectral data for potato late blight disease. J Indian Soc Remote Sens. Vol. 39 (2). 161-169.**

- **Rembold F., Atzberger C., Savin I. et Rojas O. (2013) Using low resolution satellite imagery for yield prediction and yield anomaly detection. Remote Sensing. Vol. 5. 1704-1733.**

- **Roberge L. (2014) Communication personnelle. Prisme Consortium.**

- lroberge@prisme.ca. Sherrington, Québec, Canada.

- **Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. et Deering D.W. (1973)** Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA. 309-317.

- **Sakamoto T., Yokozawa M., Toritani H., Shibayama M., Ishitsuka N., Ohno H. (2005)** A crop phenology detection method using time-series MODIS data. Remote sensing of environment. Vol. 96. 366-374.

- **Samseemoung G., Soni P., Jayasuriya H.P., et Salokhe V.M. (2012)** Application of low altitude remote sensing (LARS) platform for monitoring crop growth and weed infestation in a soybean plantation. Precision Agriculture. Vol. 13 (6). 611-627.

- **Sánchez J., Perronnin F., Mensink T. et Verbeek J. (2013)** Image classification with the fisher vector: theory and practice. Int J Comput Vis. Vol. 105. 222-245.

- **Sandholt I., Rasmussen K. et Andersen J. (2002)** A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. Remote Sensing of Environment. Vol. 79. 213-224.

- **Sato A. (2003)** The RMAX helicopter UAV. Rapport public. Aeronautic Operations Yamaha Motor Co., Ltd., Shizuoka, Japan. 25 p.

- **Schueller J.K., Lee W.S., Crane C.D. et Parson L.R. (2006)** Remotely-piloted helicopter citrus yield map estimation. Proceedings of ASABE Annual International Meeting. Portland, Oregon. 1- 11.
- **Seelan S., Laguette S., Casady G. et Seielstad G. (2003).** Remote sensing applications for precision agriculture: a learning community approach. Remote sensing of environment. Vol. 88. 157- 169.
- **Seghiri S., Mokhnache A. et Tourta S. (2010)** Calcul du coefficient de réflectance bidirectionnelle du sol à partir de deux modèles. Revue des Énergies Renouvelables. Vol 13 (3). 445-454.
- **Shahbazi M., Théau J. et Ménard P. (2014)** Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. GIScience & Remote Sensing. Vol. 51 (4). 339-365.
- **Sheng H., Chao H., Coopmans C., Han J., Mckee M. et Chen Y. (2010)** Low-cost UAV-based thermal infrared remote sensing: Platform, Calibration and Applications. IEEE transactions on geosciences and remote sensing. Vol. 978. n°1. 4244-7101.
- **Stagakis S., González-Dugo V., Cid P., Guillén-Climent M.L., et Zarco-Tejada P.J. (2012)** Monitoring water stress and fruit quality in an orange orchard under regulated deficit irrigation using narrow-band structural and physiological remote sensing indices. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 71. 47-61.
- **Statistiques Canada (2013)** <http://www.statcan.gc.ca>. Statistiques Canada. Ottawa, Ontario, Canada.
- **Sugiura R., Noguchi N., Ishii K. et Terao H. (2002)** The development of remote sensing system using unmanned helicopter. Proceedings of Automation Technology for Off-road Equipment. Chicago. 1-9.
- **Sugiura R., Noguchi N. et Ishii K. (2005)** Remote-sensing technology for vegetation monitoring using an unmanned helicopter. Biosystems Engineering. Vol. 90 (4). 369-379.

- **Swain K.C., Thomson S.J. et Jayasuriya H.P.W. (2010)** Adoption of an unmanned helicopter for low-altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop. American society of agricultural and biological engineers. Vol. 53. 21-27.
- **Tanaka K., Nakatsubo A., Sugiura T., Minagawa H. et Shimada H. (2011)** Application of the hyperspectral remote sensing by an unmanned helicopter in maize (Zee mays L.) production. American Society of Agricultural and Biological Engineers. N°1110621. St.
- **Joseph. Tardieu F. et Dreyer, E. (1997)** L'eau dans l'espace rural. Production végétale et qualité de l'eau. INRA-Éditions. Institut National de Recherche Agronomique. 424 p.
- **Torres-Sanchez J., Pena J.M., De Castro A.I. et Lopez-Granados F. (2014)** Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 103. 104-113.
- **Transports Canada (2014)** Permission et exigences en matière de sécurité. in Utiliser un aéronef sans pilote. Transports Canada.Ottawa.
- http://www.tc.gc.ca/fra/aviationcivile/normes/generaleaviationloisir-uav-2265.htm?WT.mc_id=lj18t
- **Tremblay F., Desmeules X., St-Pierre N., Claveau S. et Morissette S. (2013)** Guide de vulgarisation : agriculture de précision, autoguidage et gaz à effet de serre. Agrinova. Alma, Québec, Canada. 14 p.
- **Turner D., Lucieer A., et Watson C. (2011)** Development of an unmanned aerial vehicle (UAV) for hyper resolution vineyard mapping based on visible, multispectral, and thermal imagery. Proceedings of 34th International symposium on remote sensing of environment, 4-7.
- **Turner D., Lucieer A., ET Watson C. (2012)** An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (sfm) points clouds. Remote sensing. Vol. 4. 1392-1410.

- **Tucker, C.J. (1979)** Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 8 (2). 127-150.
- **Université Virtuelle Environnement et Développement durable (UVED) (2014)** Les caractéristiques spectrales de la végétation in ENVCAL - Suivi de l'environnement par télédétection. <http://ecours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/vegetation/caracteristique-vegetation/proprietes.html> [Consulté le 08-10-2014].
- **Uto K., Seki H., Saito G., et Kosugi Y. (2013)** Characterization of rice paddies by a uav-mounted miniature hyperspectral sensor system. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. Vol. 6 (2). 851-860.
- **Vannier C. (2011)** Observation et modélisation spatiale de pratiques agricoles territorialisées à partir de données de télédétection: application au paysage bocager. Rennes: Université de Rennes 2, thèse de géographie, 307 p.
- **Vogler A., Eisenbeiss H., Aulinger-Leipner I., et Stamp P. (2009)** Impact of topography on crosspollination in maize (*Zea Mays L.*). *European Journal of Agronomy*. Vol. 31 (2). 99-102.
- **Wang C., Qi S., Niu Z. et Wang J. (2004)** Evaluating soil moisture status in China using the temperature-vegetation dryness index (TVDI). *Canadian Journal Remote Sensing*. Vol. 30 (5). 671-679.
- **Wang L., Zhang F.C., Jing Y.S., Jiang X.D., Yang S.B. et Han X.M. (2014)** Multi-temporal detection of rice phenological stages using canopy spectrum. *Rice Science*. Vol. 21 (2). 108-115.
- **Wang Y.P., Chen S.H., Chang, K.W. et Shen Y. (2012)** Identify and characterizing yield limiting factors in paddy rice using remote sensing yields maps. *Precision agriculture*. Vol. 13. 553- 567.
- **Wu J., Wang D. et Bauer M.E. (2007)** Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies. *Field Crops Research*. Vol. 102. 33-42.

- **Xiang H. et Tian L. (2011)** Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform. *Biosystems Engineering*, Vol. 108. 104-113.
- **Xu W., Ren X. et Smith A. (2011)** Remote sensing, crop yield estimation and agricultural vulnerability assessment : a case of southern Alberta. 19th International Conference on Geoinformatics. Shanghai. 7 p.
- **Yokobori J, Niwa K, Sugiura R, Noguchi N, Chiba Y. (2004)** Variable management for uniform potato yield using remote sensing images with unmanned helicopter. *Proceedings of Automation Technology for Off-road Equipment*. Kyoto. 447-454.
- **Yu W. (2004)** Practical anti-vignetting methods for digital cameras. *IEEE Transactions on consumer electronics*. Vol. 50 (4). 975-983.
- **Yunxia H., Minzan L., Xijie Z., Liangliang J., Xingping C. et Fusuo Z. (2005)** Precision management of winter wheat based on aerial images and hyperspectral data obtained by unmanned aircraft. *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Seoul. 3109-3112.
- **Zarco-Tejada P.J., Berni J., Suárez L., Sepulcre-Cantó G., Morales F. et Miller J.R. (2009)** Imaging chlorophyll fluorescence with an airborne narrow-band multispectral camera for vegetation stress detection. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 113 (6). 1262-1275.
- **Zarco-Tejada P.J., Gonzalez-Dugo V. et Berni J. (2012)** Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 117. 322-337.
- **Zarco-Tejada P.J., Guillén-Climent M.L., Hernández-Clemente R., Catalina A., González M.R. et Martin P. (2013)** Estimating leaf carotenoid content in vineyards using high resolution hyperspectral imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 171. 281-294.
- **Zarco-Tejada P.J., Gonzalez-Dugo V., Williams L.E., Suárez L., Berni J.A.J., Goldhamer D. Et Fereres E. (2013)** A PRI-based water stress index combining

structural and chlorophyll effects : Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. Remote sensing of environment. Vol. 138. 38-50.

- **Zarco-Tejada P.J., Diaz-Varela R., Angileri V. et Loudjani P. (2014)** Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstitution methods. European journal of agronomy. Vol. 55. 89-99.
- **Zhang C. et Kovacs J.M. (2012)** The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture : a review. Precision Agric. Vol. 13. 693-712.
- **Zhang X., Friedl M.A., Schaaf C.B., Strahler A.H., Hodges J.C.F., Gao F., Reed B.C. et Huete A. (2003)** Monitoring vegetation phenology using MODIS. Remote Sensing of Environment. Vol. 84. 471-475.
- **Zheng Y., Lin S., Kambhamettu C., Yu J. et Kang S.B. (2009)** Single-image vignetting correction. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. Vol. 31. n°12. 2243-2256.
- **Zhou G. (2009)** Near real-time orthorectification and mosaic small uav video flow for time-critical event response. IEEE transactions on geosciences and remote sensing. Vol. 47. n°3. 739-747.
- **Zhu J., Wang K., Deng J., et Harmon T. (2009)** Quantifying nitrogen status of rice using low altitude uav-mounted system and object-oriented segmentation methodology. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. San Diego, California, USA. 1-7.

Résumer :

L'évolution de l'agriculture a été marquée par de grandes étapes qui ont amélioré la qualité de travail des agriculteurs. Par cette étude La télédétection est une technique en pleine phase d'adoption en agriculture, que ce soit en Algérie ou dans les autres pays du monde. Si l'on s'intéresse uniquement aux services d'aide au pilotage des cultures. La télédétection offre une méthode sûre et efficace de cueillette d'information dans le but de cartographier le type et de calculer la superficie des cultures