

Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

**Surveillance phytosanitaire des cultures de pommes de terre à l'aide de la télédétection par
aéronef sans pilote**

Erwan Gavelle

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographiques (M.Sc.)
cheminement Géomatique

Avril 2015

© Erwan Gavelle, 2015

Identification du jury

Directeur de recherche :

Jérôme Théau, Professeur agrégé, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

Membres du jury :

Alain Royer, Professeur titulaire, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

Aubert Michaud, Chercheur, Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement.

Résumé

La pomme de terre est la culture agricole qui est victime du plus grand nombre de maladies et de ravageurs pouvant ainsi causer des dégâts de rendements relativement importants. La télédétection en agriculture permet de spatialiser ces stress par la correspondance entre les caractéristiques biophysiques de la végétation et les propriétés optiques des images. Les aéronefs sans pilote (ASP) constituent des plateformes de plus en plus répandues permettant l'acquisition d'imagerie aérienne à très hautes résolutions spatiale et temporelle.

L'objectif général du projet visait à développer un outil d'aide à la surveillance phytosanitaire de cultures de pomme de terre, économique, opérationnel sur le terrain et basé sur la télédétection, en appui aux méthodes traditionnelles de dépistage. Les objectifs spécifiques suivants étaient visés : automatiser une chaîne de traitement d'imagerie pour l'agriculture, acquise à partir d'un aéronef sans pilote ; appliquer des indices basés sur l'imagerie visible proche infrarouge et infrarouge thermique pour la détection de stress dans la culture de la pomme de terre ; développer un outil d'aide à la décision en appui aux méthodes de dépistage actuelles ; évaluer le potentiel des ASP pour le suivi des cultures de pommes de terre.

Le projet s'est déroulé en deux phases et sur deux sites d'études au Québec, en Montérégie et au Saguenay-Lac-Saint-Jean. La première année, des corrélations entre les mesures des paramètres biophysiques et les valeurs spectrales de l'imagerie ont permis d'établir une estimation de la biomasse humide à partir de l'indice de végétation MSAVI 2 avec un coefficient de détermination de 0,81. Une fois la relation végétation/imagerie établie, des cartes zonales de ravageurs, maladies et problèmes de développement pour les dépistages ont pu être réalisées la seconde année. Les classifications supervisées des zones de maladies ont été validées à 100 %, celles des ravageurs à 89,5 % et celles des problèmes de développement à 81 %.

Enfin, une analyse technico-économique a été effectuée pour évaluer l'utilisation des ASP dans le domaine agricole et comparer l'utilisation d'un tel outil d'aide à la décision par rapport à d'autres types d'imagerie multispectrale (satellite, aérienne). Les coûts de production de cartes de dépistage par ASP sont actuellement beaucoup plus importants que par les autres moyens d'acquisition. Cependant, la croissance du nombre d'entreprises d'opérations et de services par ASP aura

vraisemblablement comme conséquence de faire diminuer les coûts de vols dans les prochaines années. De plus, la très haute résolution spatiale et la rapidité de mise en place constituent des avantages techniques qui jouent en faveur de l'emploi des ASP en agriculture.

Un projet comme celui-ci illustre l'utilité des ASP en télédétection agricole mais également les nombreuses problématiques à résoudre pour obtenir un produit livrable à l'agriculteur en concordance avec ses besoins techniques et financiers dans une optique de préservation de l'environnement. Du vol de l'ASP jusqu'au traitement de l'imagerie, en passant par l'intégration des capteurs, les défis à relever sont nombreux. Cependant, la ferveur actuelle pour ces technologies est telle que les avancées technologiques dans le domaine sont très rapides. On peut imaginer qu'à l'échelle mondiale, l'utilisation des ASP en agriculture pourrait faire diminuer les quantités d'intrants agricoles tout en augmentant les rendements des cultures.

Citation : Gavelle, E. (2015) Surveillance phytosanitaire des cultures de pommes de terre à l'aide de la télédétection par aéronef sans pilote, Mémoire de maîtrise, Département de géomatique appliquée, Université de Sherbrooke, 79 p.

Mots clés : télédétection, aéronef sans pilote, agriculture de précision, pomme de terre, dépistage, surveillance phytosanitaire, indices de végétation, analyse technico-économique.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	v
Liste des annexes	vii
Liste des acronymes	viii
Remerciements	ix
1. Introduction	1
1.1. Problématique.....	1
1.2. Objectifs et hypothèse de recherche	3
2. Cadre théorique	3
2.1. L'agriculture de précision : la géomatique au service de l'exploitant agricole	3
2.2. La culture de la pomme de terre	6
2.3. Le comportement spectral de la végétation	10
2.4. Les aéronefs sans pilote	14
2.5. Les ASP en agriculture	15
3. Cadre expérimental	17
3.1. Description des zones d'études.....	17
3.2. Démarche méthodologique.....	18
3.3. Acquisition d'imagerie	20
3.4. Planification des vols.....	21
3.5. Prétraitements de l'imagerie	24
3.5.1. <i>Corrections radiométriques</i>	25
3.5.2. <i>Corrections géométriques</i>	27
3.6. Acquisition et traitements des données au champ	28
3.6.1. <i>Estimation des paramètres biophysiques (Année 1)</i>	28
3.6.2. <i>Production de cartes de dépistage (Année 2)</i>	31
3.7. Analyse technico-économique.....	33
4. Résultats	34
4.1. Prétraitements	34
4.1.1. <i>Corrections radiométriques</i>	34
4.1.2. <i>Corrections géométriques</i>	38

4.2.	Estimation des paramètres biophysiques (Année 1).....	42
4.2.1.	<i>Extraction des valeurs spectrales</i>	42
4.2.2.	<i>Régressions simples</i>	43
4.2.3.	<i>Régressions multiples</i>	45
4.3.	Production de cartes de dépistage (Année 2).....	49
4.3.1.	<i>Mise au point de la classification</i>	49
4.3.2.	<i>Validation de la classification</i>	52
4.3.3.	<i>Exemples de cartes de dépistage</i>	52
4.4.	Analyse technico-économique.....	55
5.	Discussion	56
5.1.	Prétraitements.....	56
5.1.1.	<i>Corrections radiométriques</i>	56
5.1.2.	<i>Corrections géométriques</i>	58
5.2.	Traitements.....	60
5.2.1.	<i>Extraction des valeurs spectrales</i>	60
5.2.2.	<i>Estimation des paramètres biophysiques</i>	60
5.2.3.	<i>Production de cartes de dépistage</i>	62
5.3.	Analyse technico-économique.....	64
5.4.	Limites méthodologiques.....	66
5.5.	Perspectives d'applications et recommandations.....	67
6.	Conclusion	67
7.	Références	69
8.	Annexes	80

Liste des figures

Figure 1 : Pourcentages des agriculteurs questionnés qui utilisent différents types de technologies agricoles à référence spatiale.....	5
Figure 2: Stades phénologiques de la pomme de terre.....	7
Figure 3 : Symptômes visibles de stress sur le feuillage de la pomme de terre.....	8
Figure 4 : Consommation des feuilles de pommes de terre par des larves de Doryphores.....	9
Figure 5 : Formulaire de dépistage des problèmes phytosanitaires des cultures de pommes de terre utilisé par l'entreprise Prisme Consortium.	11
Figure 6 : Signature spectrale de la végétation de 0,4 à 2,6 μm	12
Figure 7 : Mesures de réflectances sur une feuille verte, malade et desséchée.....	12
Figure 8 : Influence des stress sur les variables d'état de la plante.	13
Figure 9 : Applications de télédétection par aéronefs sans pilotes.....	15
Figure 10 : Localisation des deux sites d'études du projet de recherche.....	18
Figure 11 : Organigramme méthodologique du projet de recherche.....	19
Figure 12 : Matériel d'acquisition de l'imagerie utilisé dans le projet de recherche.	20
Figure 13 : Principe de localisation des cibles de géoréférencement sur une parcelle agricole.....	22
Figure 14 : Cibles de géoréférencement disposées au sol.....	22
Figure 15 : Définition des points de passage (carrés rouges) du trajet (lignes rouges) d'acquisition d'imagerie de l'ASP pour une parcelle de pomme de terre en Montérégie, à l'aide de l'interface du logiciel associé à l'autopilote (<i>APM Mission Planner</i>).....	23
Figure 16 : Schéma du principe de recouvrement des images par ligne de vol.	24
Figure 17 : Champ de vision circulaire de l'objectif et image conservée par le capteur.	25
Figure 18 : Réflectance bidirectionnelle où : R est le rayonnement réfléchi, I est le rayonnement incident, N indique le nord, S le sud, Z la direction verticale, ϕ_r est l'angle d'observation, ϕ_i est l'angle d'éclairement.	26
Figure 19 : Mesures sur le terrain et principe d'estimation du couvert végétal par l'utilisation d'un quadrat divisé en 25 sous-quadrats.....	29
Figure 20 : Prise de vue d'une surface homogène en laboratoire avant puis après correction du vignetage en composé fausses couleurs	35

Figure 21 : Histogrammes des valeurs de niveaux de gris pour la bande PIR de l'image originale et de l'image corrigée pour le vignetage	35
Figure 22 : Niveaux de gris par bande et par temps d'exposition pour une cible de réflectance de 100 %.....	36
Figure 23 : Moyennes des niveaux de gris par bande des images acquises avec l'ADC Lite en fonction de la réflectance des spectralons utilisés.....	37
Figure 24 : Présentation des étapes de la méthode de Lelong <i>et al.</i> (2008) de correction de la réflectance bidirectionnelle sur l'ensemble d'une mosaïque.	37
Figure 25 : Exemple d'une droite de régression pour transformation des niveaux de gris de l'imagerie issue de la caméra thermique en températures.....	38
Figure 26 : Exemple d'une mosaïque (composé fausses couleurs) d'images acquises au-dessus d'une parcelle de pomme de terre en Montérégie.	39
Figure 27: Exemple d'histogrammes pour l'image 1222 avant et après mosaïquage et pour l'image 1223 avant et après mosaïquage.....	40
Figure 28 : Droite de régression logarithmique de la biomasse humide avec l'indice MSAVI 2.....	44
Figure 29 : Nuage de points de la biomasse humide mesurée en fonction de la biomasse humide prédite par régression multiple GNDVI + MSAVI2 en utilisant les 180 points de mesure au sol.....	48
Figure 30 : Carte de la quantité de biomasse estimée (en grammes/m ²) sur la parcelle de pomme de terre.....	48
Figure 31 : Variation des valeurs pour les classes malade et non malade du MSAVI 2 sur l'ensemble des champs	51
Figure 32 : Classifications 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....	51
Figure 33 : Exemple d'une classification du MSAVI 2 pour identifier les zones affectées par une maladie dans une parcelle de pommes de terre en Montérégie.....	53
Figure 34 : Exemple d'une classification du TDVI pour identifier les zones affectées par des ravageurs dans une parcelle de pommes de terre en Montérégie.....	53
Figure 35 : Exemple d'une classification du TDVI pour identifier les zones affectées par des problèmes de développement dans une parcelle de pommes de terre en Montérégie.....	54
Figure 36 : Exemple d'une classification du MSAVI 2 pour identifier les zones affectées par des problèmes de stress généralisés dans une parcelle de pommes de terre en Montérégie.	54

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des principales maladies et principaux ravageurs de la pomme de terre au Québec.....	8
Tableau 2 : Classification des aéronefs sans pilote et leurs caractéristiques techniques.....	14
Tableau 3 : Sommaire des études de modélisation de paramètres biophysiques de cultures agricoles à l'aide d'aéronefs sans pilote.....	17
Tableau 4 : Récapitulatif des vols effectués au cours du projet de recherche.....	21
Tableau 5: Prétraitements de l'imagerie acquise par les deux capteurs utilisés.....	24
Tableau 6 : Transformation des observations du formulaire de dépistage en format binaire exploitable pour les classifications.....	32
Tableau 7 : Création d'une classe supplémentaire de stress généralisé.....	32
Tableau 8 : Récapitulatif des mosaïquages réalisés sur l'ensemble des champs survolés lors des 2 années.....	39
Tableau 9 : Comparaison des moyennes et écarts-type avant et après mosaïquage.....	40
Tableau 10 : Nombre de points de contrôle et RMSE du géoréférencement des mosaïques visibles proches infrarouges.....	41
Tableau 11 : Nombre de points de contrôle et RMSE du géoréférencement des mosaïques infrarouges thermiques.....	41
Tableau 12 : Exemples de coefficients de détermination de régressions logarithmiques simples entre les paramètres biophysiques mesurés et les indices de végétation en fonction des méthodes d'extraction.....	42
Tableau 13 : Coefficients de détermination des régressions linéaires simples entre les paramètres biophysiques mesurés et les indices de végétation agrégés à 1 mètre.....	43
Tableau 14 : Tests de régressions linéaire et logarithmique entre le poids de tubercules par quadrats en fonction des indices de végétation par date de vol.....	45
Tableau 15 : Matrice de corrélation du Coefficient de Pearson entre les différents indices de végétation sur l'ensemble des 180 sites mesurés.....	46
Tableau 16 : Résultats du Critère d'Information d'Akaike (AIC) pour le cas de la biomasse humide.....	46

Tableau 17 : Récapitulatif des moyennes et covariances ainsi que les distances de Fisher Kernel pour chaque classe de stress en fonction des indices de végétation testés.	50
Tableau 18 : Pourcentages des points du dépistage qui valident les classifications effectuées. Les valeurs en gras illustrent les meilleurs résultats obtenus pour chaque catégorie de stress.....	52
Tableau 19 : Comparatif des coûts d'acquisition d'imagerie satellitaire, aérienne et par ASP pour une campagne de vol d'une parcelle de pommes de terre de 10 hectares.....	55
Tableau 20 : Avantages et inconvénients des différentes plateformes d'acquisition.	65

Liste des annexes

Annexe 1 : Moyennes et écarts-type des classes de maladies issues du formulaire de dépistage.	80
Annexe 2 : Procédé de correction du vignetage avec le logiciel PixelWrench2	81

Liste des acronymes

ADC : Caméra numérique pour l'agriculture (*Agriculture Digital Camera*) ;

ASP : Aéronef sans pilote ;

AUVSI : Association internationale des aéronefs sans pilotes (*Association for Unmanned Vehicle Systems International*) ;

Cartel : Centre d'applications et de recherches en télédétection ;

CGQ : Centre de géomatique du Québec ;

CQFA : Centre québécois de formation aéronautique ;

GPS : Système de positionnement global (*Global Positioning System*) ;

INRA : Institut national de la recherche agronomique ;

MAPAQ : Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec ;

Pi : Pied (30,48 cm) ;

R² : Coefficient de détermination ;

RMSE : Erreur quadratique moyenne (*Root-Mean-Square Error*) ;

UVED : Université virtuelle en environnement et développement durable ;

VTOL : Décollage et atterrissage à la verticale (*Vertical Take Off / Landing*).

Remerciements

Ce mémoire est le fruit d'un travail de deux années qui n'aurait pu être réalisé seul. De nombreuses personnes m'ont guidé, accompagné, aidé et supporté! Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Agriculture et Agroalimentaire Canada. Merci également à Madame Line Aubert-Bonn et la Fondation de l'Université de Sherbrooke pour l'octroi de la bourse Ferdinand J. Bonn.

Cette maîtrise s'est déroulée au sein du centre d'applications et de recherches en télédétection (Cartel) de l'Université de Sherbrooke et j'aimerais donc saluer tous les membres de ce laboratoire, en espérant que les aéronefs sans pilote soient de plus en plus souvent utilisés comme plateformes de recherche ! Jérôme Théau, directeur de ce projet de recherche, m'a offert un suivi efficace tout au long de ma maîtrise et a toujours su trouver les bons mots pour me remettre dans le droit chemin alors que je lui présentais mes projets farfelus : « Concentre toi plutôt sur ta maîtrise... ». Je tiens également à remercier les stagiaires qui ont apporté leur aide tout au long du projet : Simon Côté Bourgoin, Claire Dupaquier et Élise Boisliveau. Un remerciement spécial pour mes collègues de travail, et plus particulièrement à Mozhdeh Shahbazi et Louis-Philippe Chrétien, pour leurs conseils tout au long du projet.

Cette recherche a été faite en partenariat avec le Centre de géomatique du Québec (CGQ), l'entreprise ING Aviation Robotisée, l'entreprise Consortium Prisme, le bureau Agrinova et également le Centre québécois de formation en aéronautique (CQFA) ; je les remercie donc pour leurs investissements et leurs apports de connaissances tout au long de ce processus.

Mes remerciements vont aussi à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin au projet : les professionnels de recherche, mes amis et ma famille. Mais ma plus grande pensée est pour ma québécoise préférée qui a dû supporter mes moments de désespoir et de découragement et qui m'a aidé à les surmonter.

1. Introduction

1.1. Problématique

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)

Avec seulement 2% de la superficie québécoise, localisée en majorité le long du fleuve Saint-Laurent, l'agriculture tient tout de même une place importante dans l'économie de la province : le bioalimentaire représente plus de 6% du PIB du Québec. Les recettes agricoles ont même augmenté de 50 % depuis 2002 (Institut de la statistique du Québec, 2013). Malheureusement, la population active agricole canadienne a diminué de 6,2 % depuis 2001 (Statistiques Canada, 2013). La main-d'œuvre agricole est donc de plus en plus difficile à recruter, il devient donc nécessaire de trouver des solutions pour en réduire les besoins.

Cultivée dans de nombreux pays et consommée quotidiennement dans quasiment tous les pays, la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est une culture courante. Produite à 322 millions de tonnes par an mondialement, la pomme de terre est une production horticole d'importance au Canada (4,28 millions de tonnes) (Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec, 2014). La pomme de terre est la culture agricole qui nécessite la surveillance phytosanitaire la plus accrue car elle est la cible de nombreux agents pathogènes et ravageurs qui obligent une gestion rapide et précise (Giroux et Sarrasin, 2011). Celle-ci est réalisée principalement par des dépisteurs formés et est très chronophage.

Le développement des nouvelles technologies dans le domaine agricole est une volonté affirmée du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ, 2013). 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

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.

1.2. Objectifs et hypothèse de recherche

L'objectif général du projet vise à développer un outil d'aide à la surveillance phytosanitaire de cultures de pomme de terre basé sur la télédétection, économique et opérationnel sur le terrain, en appui aux méthodes traditionnelles de dépistage. En complément à l'objectif principal, les objectifs spécifiques suivants sont visés :

- 1) Automatiser une chaîne de traitement d'imagerie, appliquée à l'agriculture, acquise à partir d'un aéronef sans pilote ;
- 2) Appliquer des indices basés sur l'imagerie visible proche infrarouge et infrarouge thermique pour la détection de stress dans la culture de la pomme de terre ;
- 3) Développer un outil d'aide à la décision en appui aux méthodes de dépistage actuelles ;
- 4) Evaluer le potentiel des ASP pour le suivi des cultures de pommes de terre.

L'hypothèse générale de ce projet repose sur le fait que la gestion des cultures agricoles peut être appuyée par des outils géomatiques d'aide à la décision basés sur les ASP (Berni *et al.*, 2009). Ce projet contribue au développement durable agricole en développant un outil qui permet de cibler et réduire les interventions de traitements phytosanitaires. Ce projet établit un outil géomatique d'aide à la décision pour le dépistage de problèmes phytosanitaires complémentaire aux dépistages classiques. L'utilisation combinée de l'imagerie visible proche infrarouge et infrarouge thermique permet de mettre en place un outil adapté à la détection des stress en milieu agricole.

2. Cadre théorique

2.1. L'agriculture de précision : la géomatique au service de l'exploitant agricole

L'évolution de l'agriculture a été marquée par de grandes étapes qui ont amélioré la qualité de travail du paysan. 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 agraires. 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 (De Montis, 1986). 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 des

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 champ (Tremblay *et al.*, 2013). 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 (Tremblay *et al.*, 2013). Cette approche a créé l'agriculture de précision (INRA, 2005). De plus, les réglementations et les attentes des exploitants agricoles visent à conserver voire augmenter la productivité tout en réduisant les impacts de l'agriculture sur l'environnement (Lamine *et al.*, 2009). Dans cet élan, le développement de la géomatique en agriculture est un outil efficace pour mettre en place une gestion optimale des parcelles agricoles (Tremblay *et al.*, 2013).

Entre 2011 et 2013, selon l'étude d'Erickson *et al.* (2013), 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 (Figure 1). Ces deux techniques améliorent la gestion des surfaces pulvérisées et visent à réduire les recouvrements de produits phytosanitaires ou de semis. Les augmentations significatives d'utilisation concernent le contrôle de la pulvérisation, l'imagerie (satellitaire et aérienne) et la télémétrie (consignation à distance des données de position, historique et état d'un matériel). De manière générale, seulement 15% des agriculteurs sondés 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 (Pinter *et al.*, 2003). 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. Atzberger *et al.* (2013) identifient quatre types d'applications différentes de la télédétection en agriculture :

- Estimation de la biomasse et du rendement ;
- Gestion de la vigueur de la végétation et des stress hydriques ;
- Évaluation du développement phénologique ;
- Cartographie des parcelles et du changement d'occupation du sol.

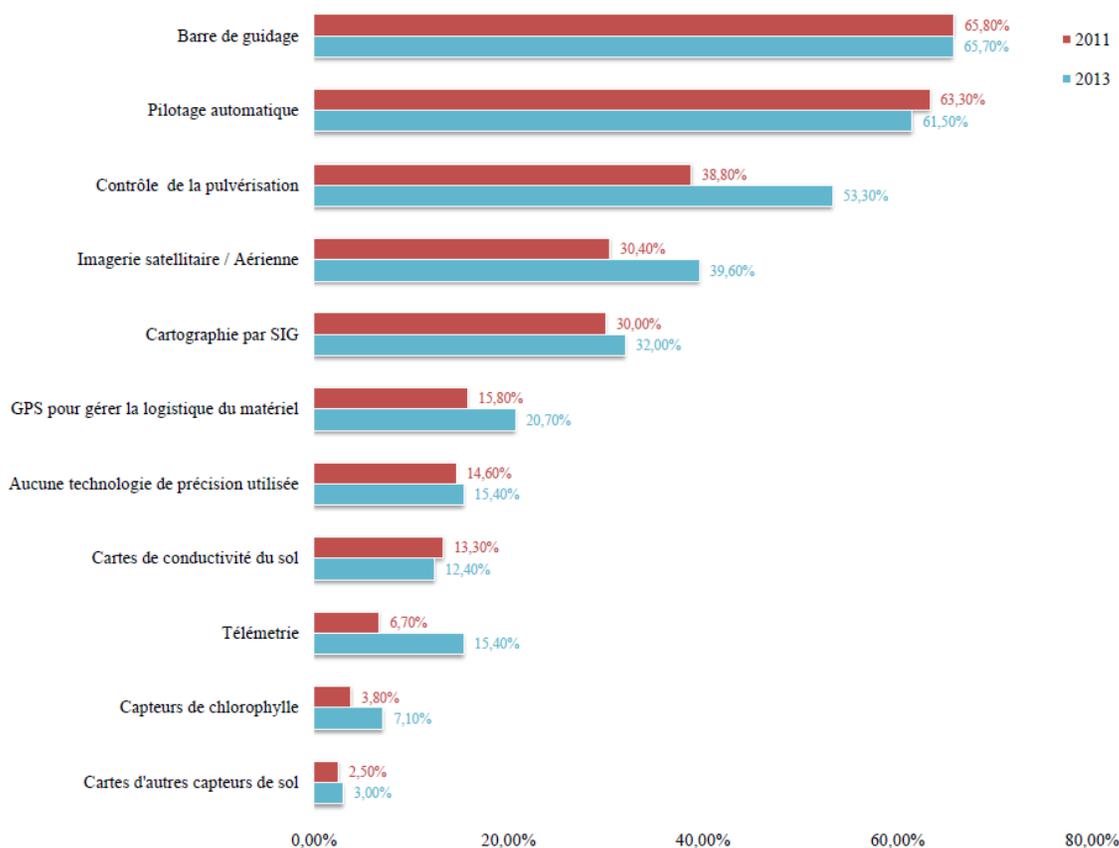


Figure 1 : Pourcentages des agriculteurs questionnés qui utilisent différents types de technologies agricoles à référence spatiale.

Adapté de Erickson *et al.*, 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 (Rembold *et al.*, 2013). Jensen *et al.* (2007) montrent qu'il est possible d'estimer le rendement du blé (*Triticum sp.*) grâce à une régression linéaire simple tout en obtenant une forte corrélation avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,91 à partir de l'indice de végétation DVI (Difference Vegetation Index - Tucker (1979)). Swain *et al.* (2010) utilisent également une régression linéaire simple avec de bons résultats pour estimer le rendement du riz (*Oryza sativa*) (R^2 : 0,76). À partir d'une fonction mathématique non-linéaire, Gusso *et al.* (2013) ont estimé le rendement du soja (*Glycine max*) avec un coefficient de détermination (R^2) de 0,95. Li *et al.* (2014) ont poussé l'analyse du développement du maïs par la mise en place d'un modèle de croissance qui génère un coefficient de variation de seulement 8,7% entre les rendements effectifs et estimés.

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.

2.2. La culture de la pomme de terre

La pomme de terre (*Solanum tuberosum*) est une plante herbacée de la famille des Solanacées (Larousse, 2014). En raison de sa richesse en amidon, la pomme de terre se positionne au 5^{ème} rang des cultures végétales au monde juste après la canne à sucre (*Saccharum sp.*), le maïs (*Zea mays*), le riz et le blé (Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec, 2014). Les États-Unis et le Canada font partie des deux plus gros exportateurs de produits congelés provenant de la pomme de

terre (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2013). Au niveau du Québec, la pomme de terre est la 3^{ème} production horticole et est destinée à la consommation (croustilles, frites surgelées,...) ou à la production de semences (Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec, 2014).

Le cycle de la pomme de terre s'étend sur 3 à 4 mois et comporte 9 stades de développement (Figure 2). La saison de croissance se divise en deux étapes, le développement de l'appareil végétatif puis de l'appareil racinaire.

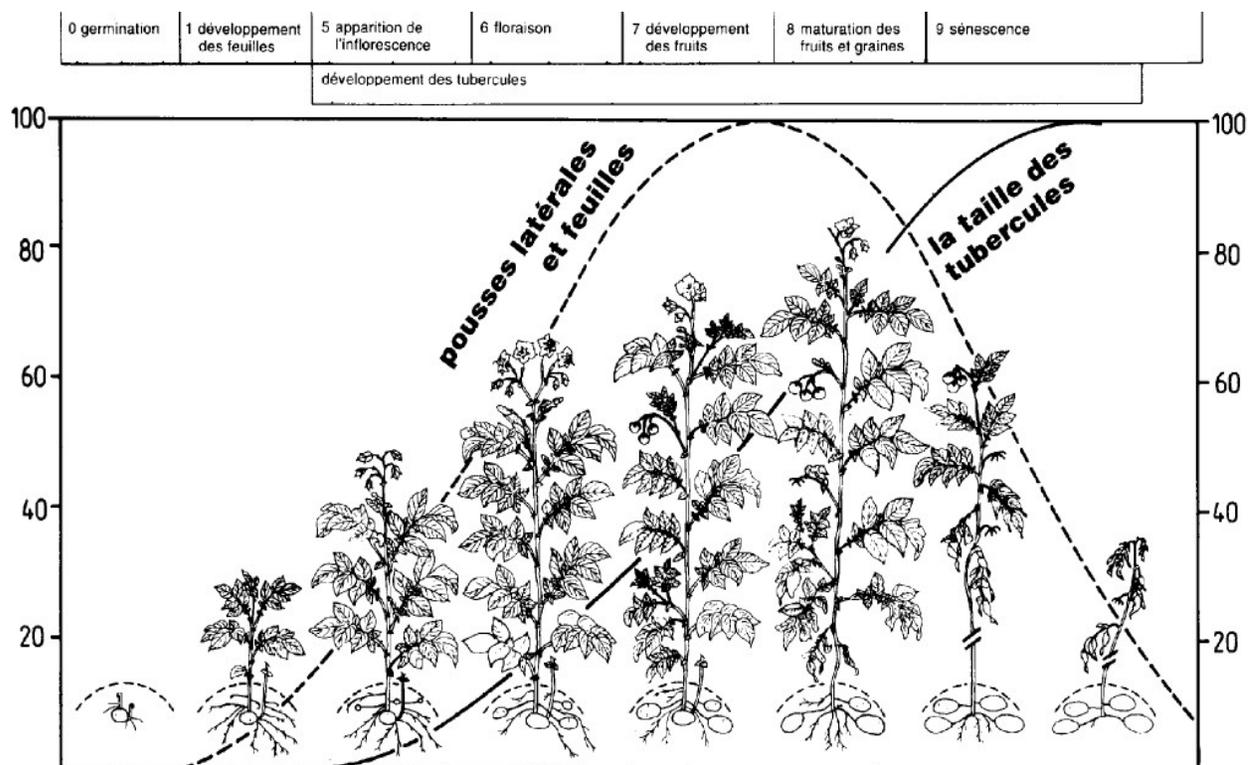


Figure 2: Stades phénologiques de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*).

Adapté de Hack *et al.*, 2001

Durant ces stades, et principalement au moment du développement des fleurs, la pomme de terre est sujette à un grand nombre de maladies et de ravageurs qui nuisent à son développement (Boudache, 2013). Les principales maladies et ravageurs présents au Québec sont définis dans le Tableau 1. Pour se défendre, la plante réagit par des symptômes visibles sur le feuillage (Figure 3) : taches circulaires (a), lésions brunes (b) ou trous dans les feuilles (c). Une infestation trop importante peut entraîner des pertes de rendements, comme la diminution du poids et de la qualité des tubercules, et peut engendrer, dans les cas extrêmes, la perte totale de la récolte (Jean, 2002).

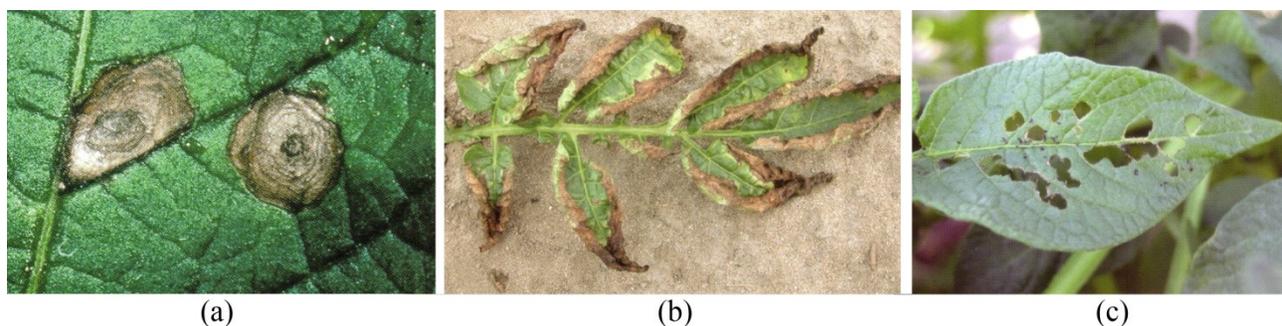


Figure 3 : Symptômes visibles de stress sur le feuillage de la pomme de terre (*Solanum tuberosum*) : taches circulaires causées par l'Alternaria (*Alternaria solani*) (a), lésions brunes causées par la Cicadelle de l'aster (*Macrosteles quadrilineatus*) (b) et consommation des feuilles par des Doryphores (*Leptinotarsa decemlineata*) (c).

Tiré de Prisme Consortium, 2013.

Tableau 1 : Description des principales maladies et principaux ravageurs de la pomme de terre au Québec.
Adapté de Jean, 2002.

MALADIES					
Nom	Nom latin	Parties infectées	Début d'activité	Fin d'activité	Moyens de dépistage
Gale commune	<i>Streptomyces scabies</i>	tubercules	début août	mi-octobre	Observation visuelle à la récolte
Alternariose	<i>Alternaria solani</i> <i>Sorauer</i>	feuillage et tubercules	fin juin	mi-octobre	Observation visuelle au champ et à la récolte
Mildiou	<i>Phytophthora infestans</i> (Mont.) de Bary	feuillage, tiges et tubercules	mi-juin	début octobre	Observation visuelle au champ et à la récolte
Pourriture rose	<i>Phytophthora erythroseptica</i> Pethybr	tubercules	début août	mi-octobre	Observation visuelle à la récolte
Rhizoctonie	<i>Rhizoctonia solani</i> Kühn	tiges, racines et tubercules	début mai	mi-octobre	Observation visuelle au champ et à la récolte
INSECTES					
Nom	Nom latin	Parties infectées	Début d'activité	Fin d'activité	Moyens de dépistage
Altise de la pomme de terre	<i>Epitrix cucumeris</i> (Harr.)	feuillage	mi-mai	mi-septembre	Observation visuelle au champ et par pièges
Cicadelle de la pomme de terre	<i>Empoasca fabae</i> (Harr.)	feuillage	début juillet	fin août	Observation visuelle au champ et par pièges
Doryphore de la pomme de terre	<i>Leptinotarsa decemlineata</i> Say	feuillage et tiges	mi-mai	fin septembre	Observation visuelle au champ

Afin de se défendre contre ces attaques, un programme de protection raisonnée doit être mis en place: mesures préventives pour réduire le risque d'installation des maladies et ravageurs, protection phytosanitaire et destruction des foyers (traitement local) (Comité responsable PHYTO, 2009). Par

exemple, la protection fongicide concerne principalement les attaques de mildiou (*Phytophthora infestans*) puisque les pommes de terre sont extrêmement vulnérables à ce champignon. Ce traitement doit se faire par une pulvérisation lente qui permet au produit de s'infiltrer dans le feuillage des pommes de terre au maximum. Trois types de produits peuvent être utilisés, les fongicides de contact (ne pénètrent pas dans la feuille), pénétrants (pénètrent mais ne se déplacent pas dans la plante) et systémiques (absorbés par la plante et cheminent par la sève) (Carisse, 2014).

Pour lutter contre le Doryphore de la pomme de terre (*Leptinotarsa decemlineata*), insecte pouvant défolier en totalité les plants de pomme de terre en causant des diminutions de rendements considérables (Figure 4), des produits phytosanitaires sont utilisés à plusieurs reprises au cours de la saison de production (Giroux et Sarrasin, 2011). Même si la gestion intégrée est priorisée, plusieurs nouvelles matières actives efficaces ont vu le jour récemment dans les produits disponibles : le spinosad (*Success®*, *Entrust®*), le spinétorame (*Delegate®*), le novaluron (*Rimon®*) et le chlorantraniliprole (*Coragen®*) (MAPAQ, 2013).



Figure 4 : Consommation des feuilles de pommes de terre par des larves de Doryphores (*Leptinotarsa decemlineata*).
Source : Gavelle, 2012

Afin de savoir quand appliquer ces produits phytosanitaires, des dépistages dans les parcelles de pommes de terre sont effectués. Des entreprises comme *Prisme Consortium* en Montérégie disposent de personnes qualifiées pour réaliser des dépistages deux fois par semaine pendant la saison. Ces dépisteurs sont formés et munis de formulaires (Figure 5) afin qu'ils puissent évaluer le développement des plants de pomme de terre et la présence ou non de maladies, ravageurs et stress hydriques. Vingt-cinq points de dépistage sont habituellement réalisés dans une parcelle de pommes de terre dont un tiers sont effectués dans les bordures du champ (environ une douzaine de rangs) et les deux tiers dans le centre (Boudache, 2013).

Durant le dépistage, le stress hydrique peut également être noté. Contrairement aux maladies et ravageurs, ce stress est lié à un manque en eau de la plante et non d'une attaque. Le déficit hydrique apparaît lorsque la quantité d'eau transpirée est supérieure à la quantité d'eau absorbée par la plante (INRA, 2005). Les symptômes qui résultent d'un stress hydrique sont la fermeture des stomates, la diminution de la photosynthèse, la diminution de la respiration, le processus de flétrissement et peut aller jusqu'à la sénescence (INRA, 2005). Le seul moyen de lutter contre ce manque en eau est l'irrigation. L'apport en eau aux périodes où la culture en a le plus besoin permet d'optimiser et d'améliorer les rendements de production (Landry *et al.*, 2014).

2.3. Le comportement spectral de la végétation

Selon Jacquemoud et Bousquet (2005), 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) (Gerber, 2011). La luminance est le rayonnement électromagnétique intercepté par le capteur utilisé et varie en fonction de la réflectance de la végétation visée. (Meyzonnette et Lépine, 2003).

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 6). Les propriétés optiques des feuilles sont associées à leurs caractéristiques biochimiques : teneur en pigments, structure cellulaire, teneur en eau et état physiologique (UVED, 2014). 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 7). 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).

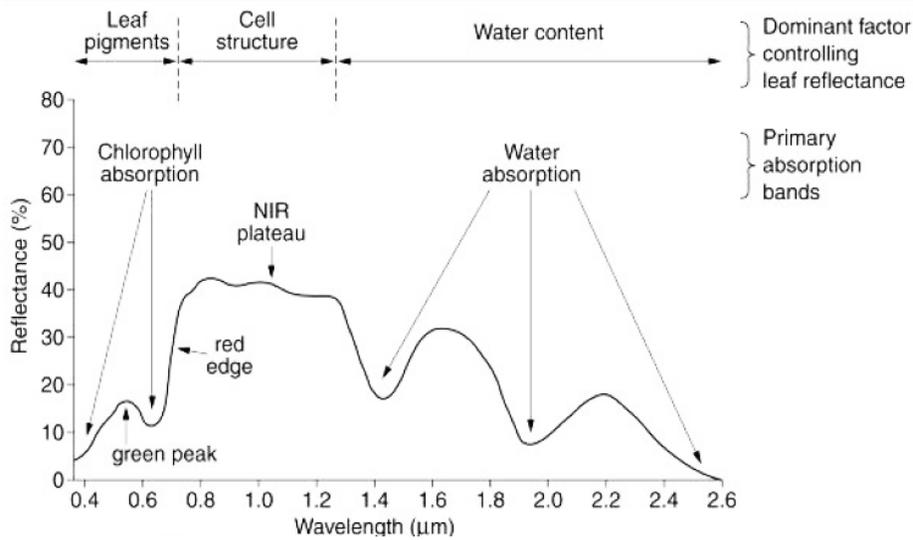


Figure 6 : Signature spectrale de la végétation de 0,4 à 2,6 µm.
Tiré de www.scotland.gov.uk.

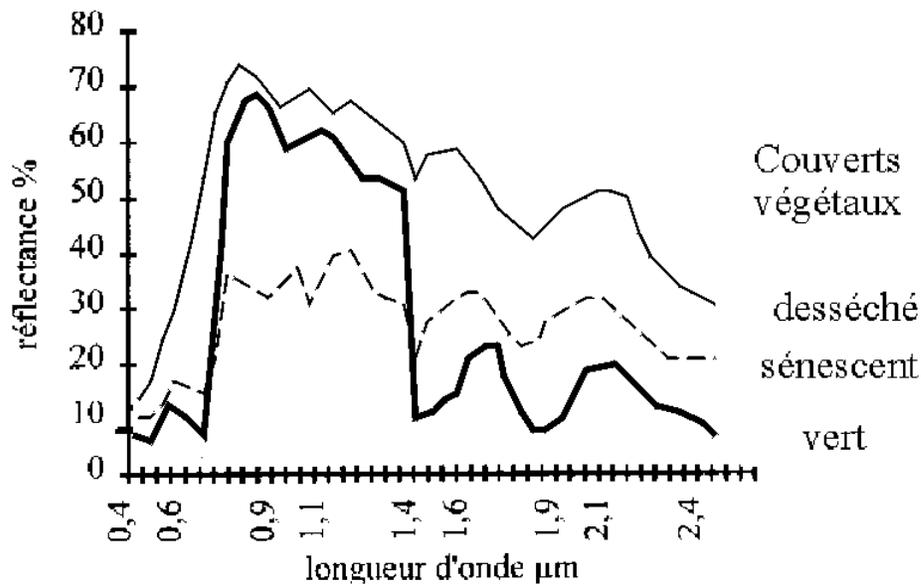


Figure 7 : Mesures de réflectances sur une feuille verte, malade et desséchée.
Tiré de Girard et Girard, 1999.

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 (UVED, 2014). 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 (Huete, 2012 ; Jacquemoud et Bousquet, 2005 ; Zarco-Tejada *et al.*, 2013b).

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 (Huete, 2012). 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 (Chaerle et Van Der Straeten, 2001). De nombreuses études scientifiques utilisent la télédétection infrarouge thermique pour mesurer l'état de déshydratation de la plante (Zarco-Tejada *et al.*, 2013b ; Berni *et al.*, 2009 ; Cohen *et al.*, 2005 ; Moller *et al.*, 2006 ; Mulla, 2012 ; Pandya *et al.*, 2013).

De plus, dans le cas de stress hydriques, maladies ou ravageurs, l'activité photosynthétique est également perturbée (Figure 8), 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 (Tardieu et Dreyer, 1997).

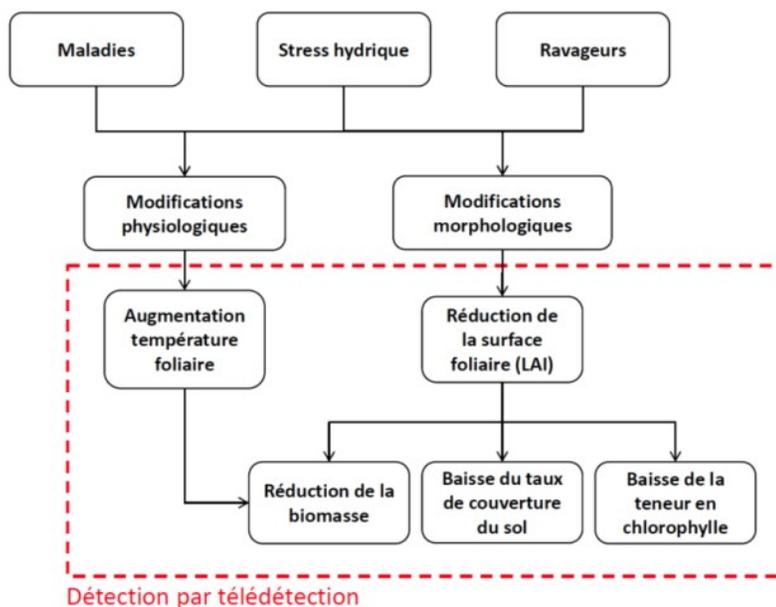


Figure 8 : Influence des stress sur les variables d'état de la plante.
Adapté de Tardieu et Dreyer, 1997.

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 (Aber *et al.*, 2010) 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 2), du modèle réduit d'avion à ailes fixes, d'hélicoptère, d'autogyre jusqu'au paramoteur 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

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'agriculture (Zhang et Kovacs, 2012). C'est justement dans ce dernier secteur, l'agriculture, que la majorité des études de télédétection par ASP est effectuée (Figure 9).

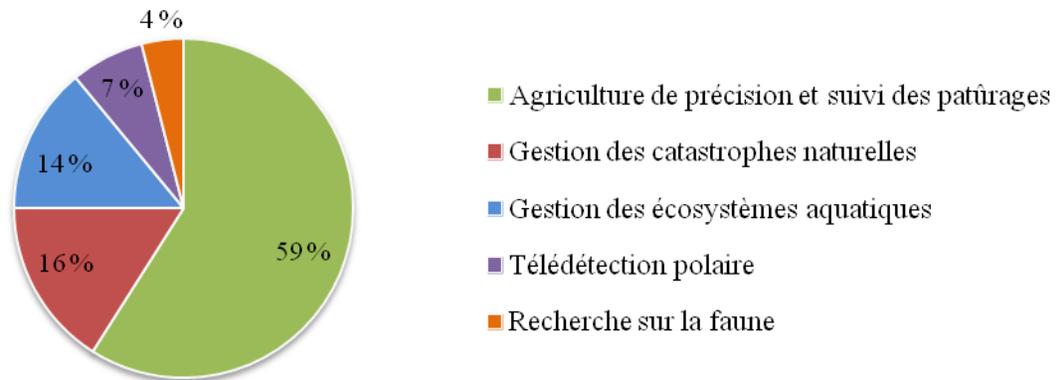


Figure 9 : Applications de télédétection par aéronefs sans pilotes.
Adapté de Shahbazi *et al.*, 2014.

2.5. 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 (Sato, 2003). Ensuite, les ASP sont devenus rapidement des supports pour embarquer des capteurs de télédétection (Huang *et al.*, 2013). 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 (Shahbazi *et al.*, 2014). 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 (Huang *et al.*, 2013). 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 (Nex et Remondino, 2014).

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 (Huang *et al.*, 2013). 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 (Sugiura *et al.*, 2002 ; Fukagawa *et al.*, 2003 ; Yokobori *et al.*, 2004). 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 (Tanaka *et al.*, 2011). D'autres types de configuration d'ASP sont ensuite apparues comme les multicoptères à 4 moteurs (Huang *et al.*, 2013). 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).

Tableau 3 : Sommaire des études de modélisation de paramètres biophysiques de cultures agricoles à l'aide d'aéronefs sans pilote.

Source : Shahbazi *et al.*, 2014

Modeled attribute	Airborne information	Crop	Result*	Reference
<i>Productivity</i>				
Yield, Chlorophyll fluorescence	NDVI, PRI	Vineyard	N/A	Turner, Lucieer, and Watson (2011)
Grain yield,	DVI	Wheat crop	$R^2 = 0.91$	Jensen <i>et al.</i> (2007)
Protein level			$R^2 = 0.66$	
Yield and total biomass	NDVI	Rice crop	$R^2 = 0.73$	Swain, Thomson, and Jayasuriya (2010)
			$R^2 = 0.76$	
Dry biomass	NGRDI	Soybean,	$R^2 = 0.39, p = 0.022$	Hunt <i>et al.</i> (2005)
		Alfalfa and	$R^2 = 0.47, p = 0.00034$	
		corn crop	$R^2 = 0.88, p = 0.00015$	
Yield	Color	Orange orchard	$R^2 = 0.3$	Schueller <i>et al.</i> (2006)
Canopy height	Color, topography	Buckwheat crop	$R^2 = 0.87, p < 0.001^a$	Murakami, Yui, and Amaha (2012)
Herbaceous biomass, Circllets phenomenon	Color	Semiarid farm	$R^2 = 0.47, p < 0.001$	Amon <i>et al.</i> (2007)
Ripe coffee yield	Color	Coffee field	Positive correlation ($p < 0.01$)	Herwitz <i>et al.</i> (2002)
Ripeness state of coffee cherries	Airborne reflectance at different wavelengths	Coffee field	Less than 18% difference between aerial prediction and parchement data	Furfaro <i>et al.</i> (2005)
Rate of cross-pollination	Topography, Color	Maize crop	$R = 0.14$ to $0.64, p < 0.01$	Vogler <i>et al.</i> (2009)
<i>Nutrients and LAI</i>				
Total nitrogen and yield	Color, vegetation indices	Wheat crop	$R^2 > 0.40$	Yunxia <i>et al.</i> (2005)
Leaf nitrogen level	CCCI _{700, 800}	Macadamia orchard	$R^2 = 0.29, p = 0.008$	Felderhof and Gillieson (2011)
Leaf nitrogen content	DGCI	Rice crop	$R^2 > 0.80$	Zhu <i>et al.</i> (2009)
Total nitrogen uptake per square meter,	GNDVI	Wheat crop	$R^2 = 0.92$	Lelong <i>et al.</i> (2008)
leaf area index (LAI)	NDVI		$R^2 = 0.82$	
LAI	GNDVI	Wheat crop	$R^2 = 0.85$ (for LAI between 0 to 2.7)	Hunt <i>et al.</i> (2010)
LAI	Canopy cover	Onion crop	$R^2 = 0.75$ to 0.84	Córcoles <i>et al.</i> (2013)
<i>Pigments</i>				
FIPAR	NDVI	Orchard	$R^2 > 0.97$	Guillen-Climent <i>et al.</i> (2012)
Chlorophyll content	NDVI	Soybean crop	$R^2 > 0.76$	Samseemoung <i>et al.</i> (2012)
Chlorophyll density	Red-edge, NIR chlorophyll indices (CIs)	Rice crop	Strong correlation of field readings and estimated CIs (up to $R^2 = 0.8$)	Uto <i>et al.</i> (2013)
Leaf carotenoid,	R ₅₁₅ /R ₅₇₀ ,	Vineyard	$R^2 = 0.75$ to $0.84, p < 0.01$	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2013)
Leaf chlorophyll content	TCARI/OSAVI		$R^2 = 0.51, p < 0.001$	
<i>Water</i>				
Stress status	Fluorescence emission	Orchard	$R^2 > 0.54$	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2009)
Moisture content	NDVI	Wheat crop	$R^2 = 0.37$ to 0.78	Han-Ya, Ishii, and Noguchi (2010)
Canopy stomatal conductance,	Temperature	Orchard	$R^2 = 0.78, p < 0.05$	Zarco-Tejada, Gonzalez-Dugo, and Berni (2012); Berni <i>et al.</i> (2009)
Leaf water potential, water stress index,			$R^2 = 0.34, p < 0.001$	
Leaf stomatal conductance,	Temperature	Vineyard	$R^2 = 0.68, p < 0.01$	Baluja <i>et al.</i> (2012)
Stem water potential (short-term response)			$R^2 = 0.50, p < 0.05$	
Leaf stomatal conductance,	TCARI/OSAVI	Vineyard	$R^2 = 0.84, p < 0.05$	Baluja <i>et al.</i> (2012)
Stem water potential (long-term response)	NDVI		$R^2 = 0.68, p < 0.05$	
Water stress indicators (fruit quality parameters, titratable acidity and total soluble solids)	PRI _{570, 515}	Citrus orchard	$R^2 = 0.58$ to 0.69	Stagakis <i>et al.</i> (2012)

3. Cadre expérimental

3.1. Description des zones d'études

Deux sites d'étude ont été sélectionnés parmi les principales régions de production de la pomme de terre au Québec (Figure 10): le Saguenay-Lac-Saint-Jean et la Montérégie qui représentent chacune 15 % de la production provinciale (Giroux et Sarrasin, 2011). La pomme de terre est cultivée de

préférence dans les sols sableux comme au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Malgré tout cultivée en Montérégie, où les textures des sols sont plus fines, les pommes de terre y sont plus touchées par les maladies et les problèmes hydriques (Giroux et Sarrasin, 2011).

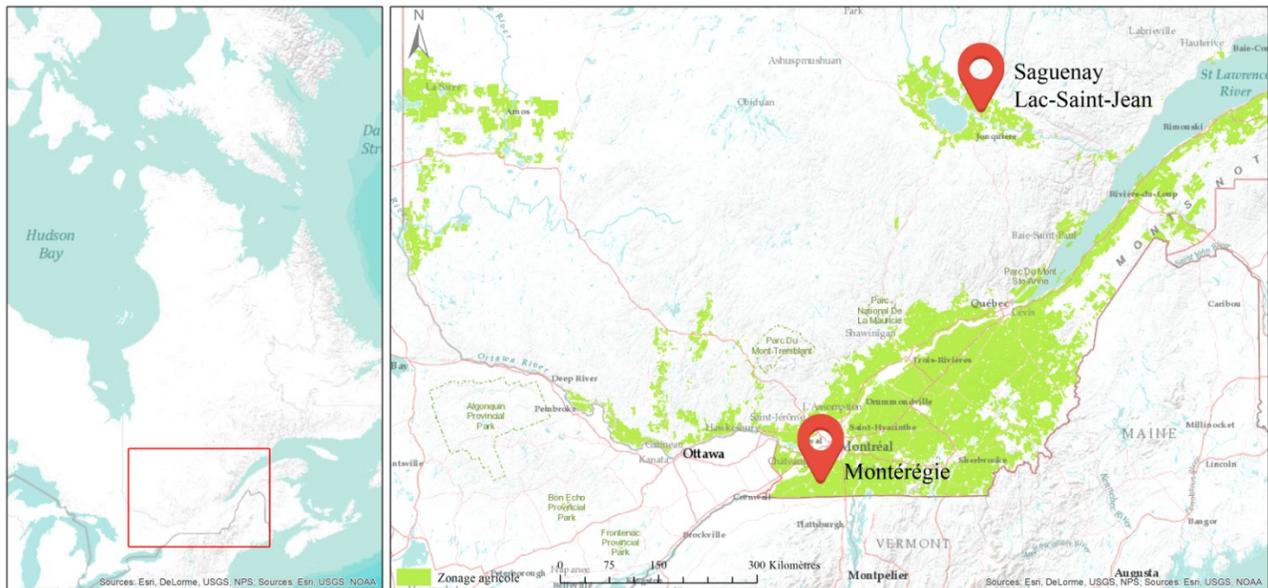


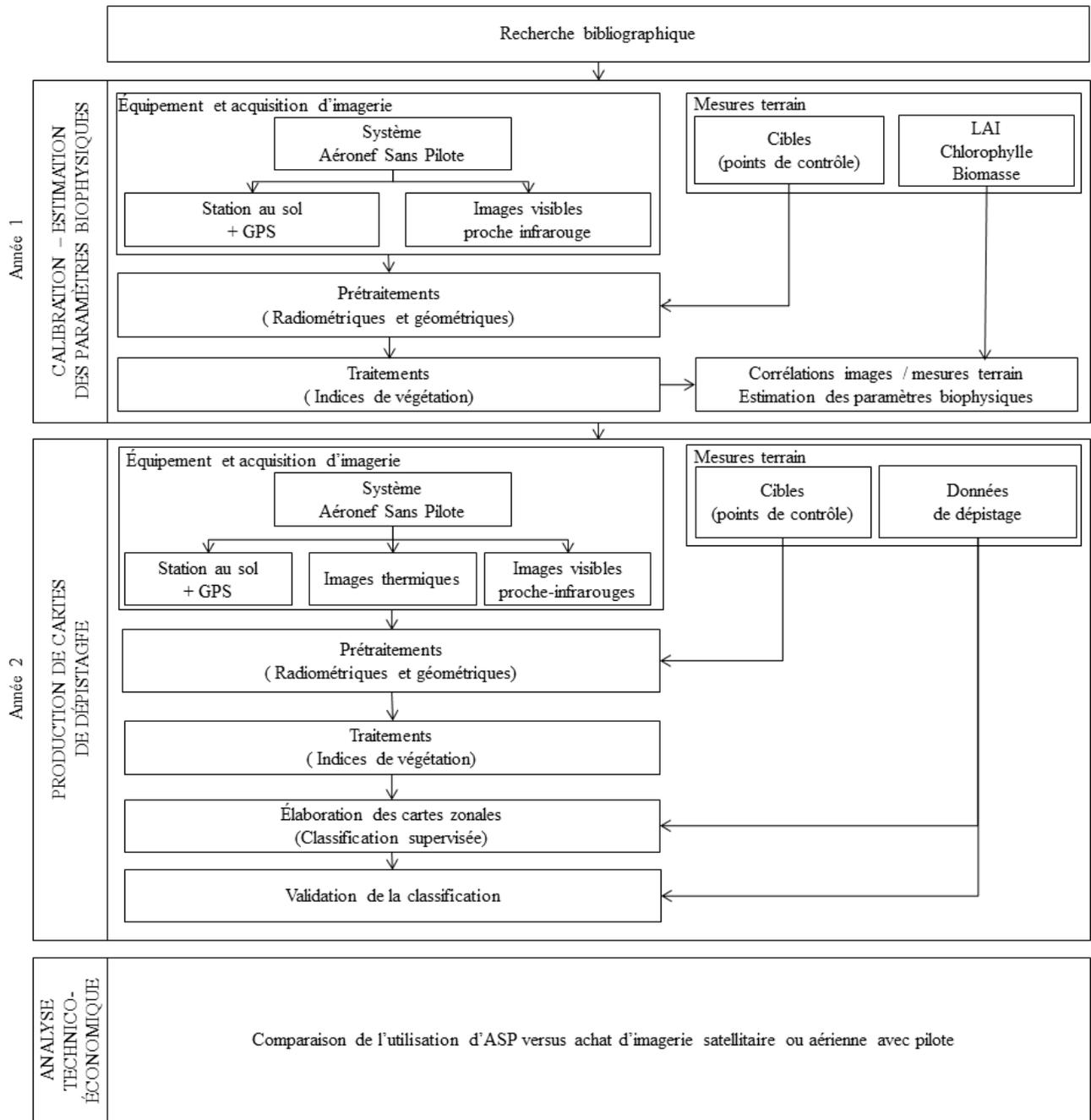
Figure 10 : Localisation des deux sites d'études du projet de recherche.

3.2. Démarche méthodologique

La démarche méthodologique comporte quatre grandes étapes (Figure 11) :

- 1) Estimation des paramètres biophysiques : les images acquises ont été corrélées aux mesures terrain des paramètres biophysiques;
- 2) Production de cartes de dépistage : les corrélations obtenues ont été utilisées pour générer des cartes zonales de stress;
- 3) Validation de l'outil : les cartes zonales de stress ont été validées par des données de dépistages sur le terrain;
- 4) Analyse technico-économique : l'utilisation des ASP a été comparée aux techniques existantes.

Les sections suivantes abordent et décrivent chacune des étapes méthodologiques. L'étape de calibration et estimation des paramètres biophysiques a été effectuée la première année du projet et les étapes de production de cartes de dépistage et de validation ont été réalisées durant la seconde année.



3.3. Acquisition d'imagerie

Les acquisitions d'images ont été effectuées grâce à un ASP : le *Responder* développé par ING Aviation Robotisée (Figure 12). Cet aéronef radio-télécommandé est un hélicoptère conçu pour transporter une charge utile jusqu'à 12 kg pendant une durée maximale de 20 minutes.

Le premier capteur utilisé se nomme l'ADC (*Agriculture Digital Camera*) Lite de Tetracam™ (Figure 12). Celui-ci dispose de trois bandes spectrales dans le domaine visible proche infrarouge (vert: 520 nm à 600 nm, rouge: 630 nm à 690 nm et proche infrarouge: 760 nm à 900 nm). L'ADC Lite est dotée de 3,2 mégapixels ; ce qui correspond à une résolution spatiale au sol de 0,04 m à 100 m d'altitude. La fréquence maximale d'acquisition s'élève à une image toutes les 3 secondes.

Un second capteur opérant dans le domaine de l'infrarouge thermique (de 7,5 μm à 13,5 μm) a été utilisé (Figure 12). Cette caméra, une TAU 640 de la compagnie FLIR™, possède une résolution de 0,3 mégapixel qui représente une résolution spatiale de 0,09 m à 100 m d'altitude. Elle génère un flux analogique (émission de température radiative) converti ensuite en flux numérique dans un format vidéo. L'extraction des images de la vidéo est possible par l'utilisation d'un logiciel spécialisé à des fréquences paramétrables en format TIFF 8 bits.



TAU 640, FLIR



Responder, ING Robotic Aviation



ADC Lite, Tetracam
Source : <http://fieldofviewllc.com/>

Figure 12 : Matériel d'acquisition de l'imagerie utilisé dans le projet de recherche.

La première année, les vols ont été réalisés au Saguenay-Lac-Saint-Jean. Une seule parcelle de pommes de terre (variété *Goldrush*) d'une surface de 10 hectares a été survolée, en 6 campagnes de vols, du 21 juin au 14 août 2012, en concordance avec les stades de développement de la végétation (Tableau 4). Pour des raisons liées aux autorisations de vols qui sont détaillées dans la section 5.3, les acquisitions d'imagerie au Saguenay, lors de la première année, n'ont pu être obtenues par ASP, mais par avion de type Cessna 172 dans des conditions les plus proches d'un vol par ASP.

La seconde année, les vols ont été effectués en Montérégie. Cinq champs, avec plusieurs variétés de pommes de terre (*GoldRush*, *Norland*, *Red Dark Chieftain*, *Harmony* et *Valor*), ont été survolés à trois dates différentes (18 juillet, 25 juillet et 1^{er} août 2013). Le choix des parcelles a été orienté par la présence suspectée de problématiques au sein des champs (maladies ou ravageurs). Le Tableau 4 présente les vols réalisés durant les deux années ainsi que le nombre de sites mesurés qui correspondent aux mesures des paramètres biophysiques la première année et aux points de dépistages la deuxième année.

Tableau 4 : Récapitulatif des vols effectués au cours du projet de recherche.

	Date de vol	Nombre de champs	Surface survolée	Altitude	Résolution ADC Lite	Résolution TAU 640	Nombre de sites mesurés
Année 1	21-06-2012	1	10 ha	800 pi (250 m)	0,12 m	0,30 m	32
	05-07-2012	1	10 ha	800 pi (250 m)	0,12 m	0,30 m	24
	13-07-2012	1	10 ha	800 pi (250 m)	0,12 m	0,30 m	33
	25-07-2012	1	10 ha	800 pi (250 m)	0,12 m	0,30 m	35
	07-08-2012	1	10 ha	800 pi (250 m)	0,12 m	0,30 m	35
	14-08-2012	1	10 ha	800 pi (250 m)	0,12 m	0,30 m	21
Année 2	18-07-2013	2	8 ha	400 pi (125 m)	0,06 m	0,15 m	50
	27-07-2013	2	7 ha	400 pi (125 m)	0,06 m	0,15 m	90
	01-08-2013	1	15 ha	400 pi (125 m)	0,06 m	0,15 m	60

3.4. Planification des vols

Pour chaque vol, la planification a été réalisée comme suit :

- *1^{er} jour* : contact avec l'agronome pour valider la parcelle survolée. Transmission de l'emprise de la parcelle pour l'établissement des lignes de vol. Préparation des cibles de géoréférencement et du plan de leurs dispositions ;
- *2^{ème} jour* : disposition des cibles de géoréférencement dans la parcelle et positionnement GPS. Observations météorologiques. Contact avec le propriétaire de la parcelle, et le pilote pour confirmation du vol ;
- *3^{ème} jour* : vol de l'ASP pour acquisition de l'imagerie. Mesures des données au sol (paramètres biophysiques ou dépistage) dès la fin du vol ;
- *4^{ème} jour* : ramassage des cibles de géoréférencement. Mesures de laboratoire (séchage de la biomasse). Saisies des données terrain obtenues.

- *Cibles de géoréférencement*

Puisque deux types de capteurs ont été employés dans ce projet, deux types de cibles de géoréférencement ont été disposés sur l'ensemble de la parcelle la veille du vol (Figure 13). Ces cibles ont été localisées à l'aide du GPS de haute précision GeoXH de Trimble™ dans le but de réaliser le géoréférencement des images. Une partie de ces points de contrôle ont été réalisés en polypropylène copolymère (Coroplaste™) de dimensions 0,40 x 0,40 m pour le géoréférencement des images visibles proche infrarouges (Figure 14a). Le quart restant des cibles ont été quant à elles réalisées en isolant réfléchissant d'aluminium de dimensions 1,22 x 1,22 m. Ces dernières permettent le géoréférencement des images infrarouges thermiques (Figure 14b). Ces cibles ont été disposées de façon à obtenir un géoréférencement optimal avec un nombre limité. Dans chaque champ (entre 6 à 15 hectares), entre 10 à 15 de ces points de référence ont été installés.

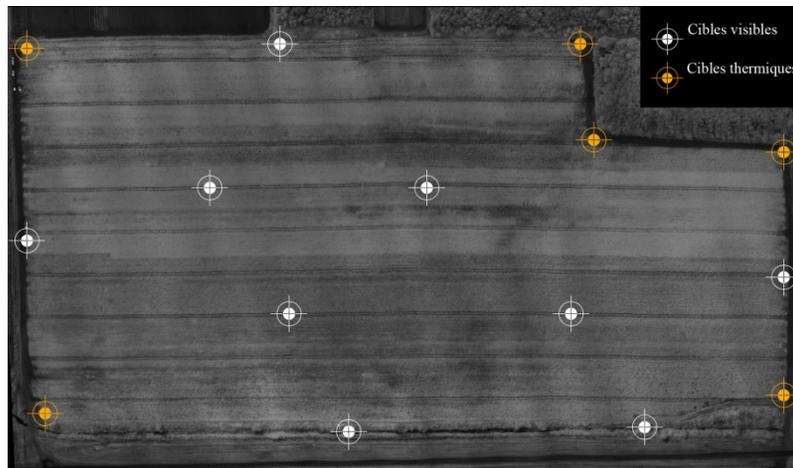


Figure 13 : Principe de localisation des cibles de géoréférencement sur une parcelle agricole.

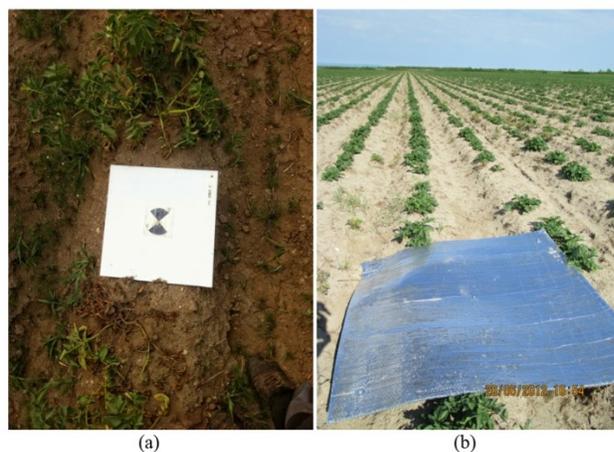


Figure 14 : Cibles de géoréférencement disposées au sol : cible visible (a) et cible thermique (b).

- *Lignes de vol*

Les champs visés pour l'acquisition de l'imagerie ont été couverts en totalité par les images. Afin de définir les lignes de vol à intégrer dans l'autopilote de l'ASP (Figure 15), l'emprise au sol des images résultantes des capteurs utilisés a été calculée. L'altitude de vol et la résolution spectrale des caméras définissent cette emprise spatiale. De plus, le recouvrement des images doit être assez important afin de permettre et faciliter le mosaïquage (Figure 16). Les recouvrements optimaux proposés par Aber *et al.* (2010) sont de 60 % de recouvrement longitudinal (permet également la stéréoscopie) et de 25 % de recouvrement entre lignes (latéral). Par exemple, pour un vol à 400 pieds (120 mètres), une image issue du capteur ADC Lite possèdera une emprise au sol de 95 x 71 mètres. Pour obtenir un recouvrement latéral de 25 %, il sera nécessaire de réaliser des lignes de vol espacées de 70 mètres environ.

Le recouvrement longitudinal visé est de 60 %. La cadence maximale de prise de vue de l'ADC Lite est d'une image toutes les 3 secondes. En volant à une vitesse de 18 nœuds (environ 9 m/s), on obtient un recouvrement entre les images d'une même ligne de 61 %. Donc si le champ à survoler mesure 400 mètres de long, il sera nécessaire d'acquérir 13 images par ligne de vol.



Figure 15 : Définition des points de passage (carrés rouges) du trajet (lignes rouges) d'acquisition d'imagerie de l'ASP pour une parcelle de pomme de terre en Montérégie, à l'aide de l'interface du logiciel associé à l'autopilote (*APM Mission Planner*).

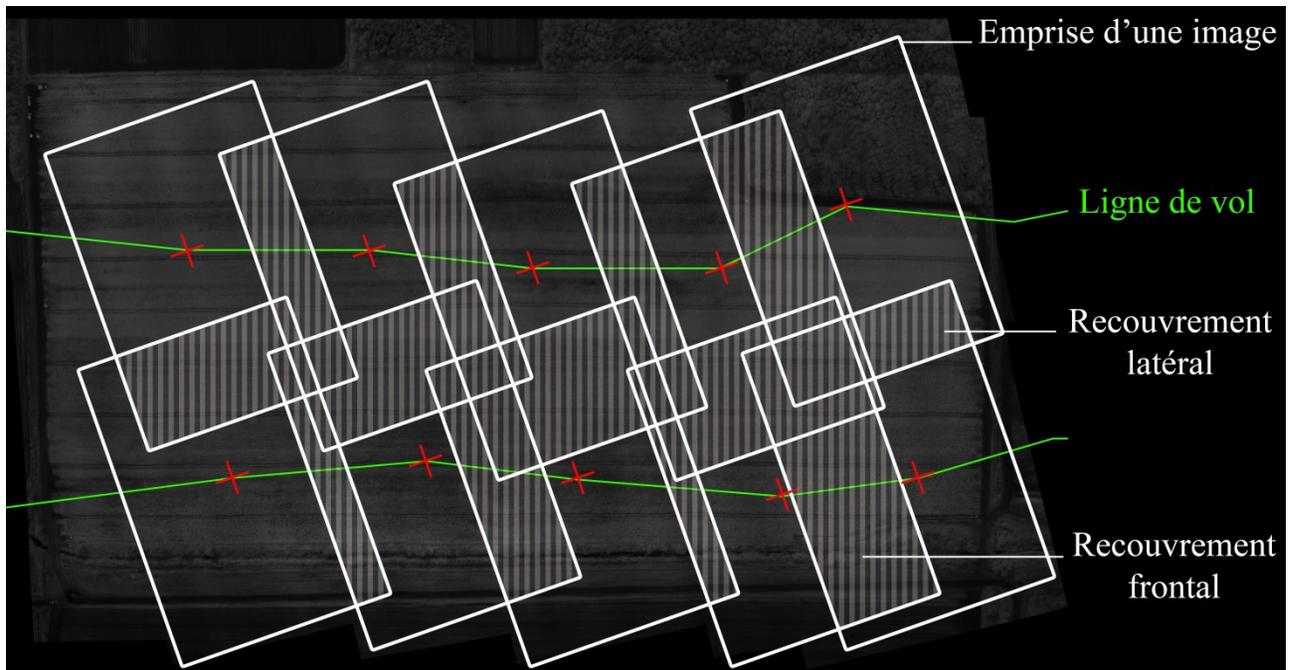


Figure 16 : Schéma du principe de recouvrement des images par ligne de vol¹.

3.5. Prétraitements de l'imagerie

Les prétraitements regroupent les corrections radiométriques et géométriques appliquées en fonction des capteurs utilisés. Ils sont présentés dans le Tableau 5. Les prétraitements des images issues de l'ADC Lite ont été effectués pour les deux années. Pour des raisons techniques, les images de la caméra thermique n'ont pu être utilisées lors de la première année. Leurs prétraitements n'ont donc été appliqués que lors de la seconde année.

Tableau 5: Prétraitements de l'imagerie acquise par les deux capteurs utilisés.

	TETRACAM™ ADC Lite	FLIR™ TAU 640
Corrections radiométriques	Vignelage Normalisation des bandes Correction BRDF	Transformation en températures
Corrections géométriques	Distorsion Mosaïquage Géoréférencement	Mosaïquage Géoréférencement

¹ Pour une meilleure lisibilité du schéma, les recouvrements longitudinaux sont inférieurs à 60%

3.5.1. Corrections radiométriques

- *Vignetage*

Le vignetage représente un défaut optique qui correspond à un assombrissement des angles d'une image (Figure 16). Celui-ci est dû à un éclairage hétérogène du plan focal d'un objectif (Zheng *et al.*, 2009). La correction de cet effet permet de retrouver les valeurs vraies des niveaux de gris. Plusieurs méthodes existent, mais celle utilisée dans ce projet est développée par Tetracam™, fabricant de l'ADC Lite (Annexe 2). Elle consiste à appliquer un facteur radial de correction qui correspond au rapport entre les valeurs spectrales au centre de l'image et celles situées dans les angles (Figure 17). L'image, qui permet d'obtenir ce facteur, doit être acquise en visant une surface homogène lambertienne.

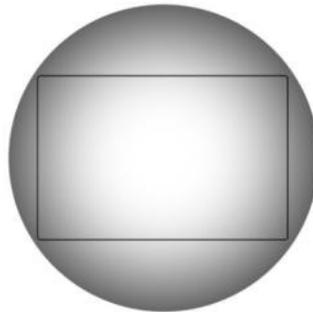


Figure 17 : Champ de vision circulaire de l'objectif et image conservée par le capteur.

- *Normalisation des bandes*

L'éclairage peut varier pour chaque image acquise durant le survol d'un champ. Un spectroradiomètre, appareil de mesure de l'éclairage installé à bord de la plateforme, permet de corriger les variations d'éclairage en convertissant les images obtenues en valeurs de réflectance. Dans le cas où ces données d'éclairage ne sont pas disponibles, il est nécessaire d'effectuer une normalisation des bandes entre elles. La normalisation des bandes de l'ADC Lite de Tetracam™ a été effectuée en acquérant plusieurs images, à des temps d'obturation différents, de cibles de référence Spectralon™ disposées au soleil et de réflectances connues (20, 40, 60, 80 et 100 %). Cette méthode a pour but de simuler les variations d'éclairages possibles durant un vol. Les niveaux de gris pour chaque bande et chaque spectralon sont notés afin de vérifier la constance des rapports entre les bandes malgré les variations des durées d'exposition. Si les rapports sont stables, les bandes peuvent être normalisées entre elles, et ainsi les indices de végétation peuvent être calculés en équivalence de réflectance.

- *Éclairage et réflectance bidirectionnelle*

La fonction de réflectance spectrale bidirectionnelle permet de caractériser la surface d'un objet. Elle est le rapport entre le rayonnement électromagnétique réfléchi par la surface et le rayonnement électromagnétique incident de celle-ci (Figure 18) (Caloz et Collet, 2001). Afin de normaliser les images entre elles, les valeurs du signal doivent être normalisées.

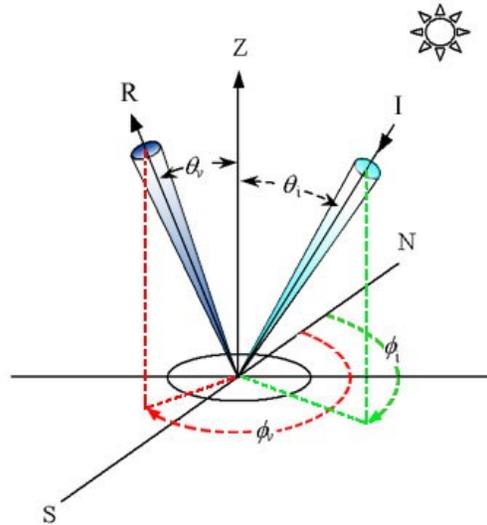


Figure 18 : Réflectance bidirectionnelle où : R est le rayonnement réfléchi, I est le rayonnement incident, N indique le nord, S le sud, Z la direction verticale, ϕ_r est l'angle d'observation, ϕ_s est l'angle d'éclairage.
Tiré de www.wxsatpicture.free.fr

Le rayonnement électromagnétique n'est pas réfléchi de manière homogène sur une surface au sol. Ces variations dépendent des longueurs d'onde, de la résolution, du type et de la géométrie⁽¹⁾ de l'occupation du sol, de l'éclairage, de l'angle de la prise de vue et de l'influence du sol (Seghiri *et al.*, 2010). Elles peuvent être modélisées grâce à la fonction de distribution de la réflectance bidirectionnelle (BRDF) (Nicodemus, 1922) :

$$f_r(\omega_i, \omega_r) = \frac{dL_r(\omega_r)}{dE_i(\omega_i)} = \frac{dL_r(\omega_r)}{L_i(\omega_i) \cos\theta_i d\omega_i}$$

L est la luminance (quantité de lumière incidente), E est l'éclairage, θ_i est l'angle entre ω_i et la normale à la surface \mathbf{n} . L'index i indique la lumière incidente et l'index r indique la lumière réfléchie.

Cette fonction de distribution est difficilement calculable si les informations concernant les angles d'Euler (roulis, tangage et lacet) durant le vol ne sont pas connues. De plus, le vol par ASP a été effectué à basse altitude avec des capteurs grands angles ; les variations radiométriques de réflectance sont donc importantes. Il est nécessaire de corriger les images afin d'obtenir la

réflectance apparente de la végétation visée même si les images ont été acquises aux mêmes heures pour chaque campagne de vol afin de limiter au maximum les différences d'éclairement.

La méthode d'homogénéisation, appelée *Local Range Modification* et utilisée par Lelong *et al.* (2008) permet de corriger les effets de réflectance bidirectionnelle selon les étapes suivantes :

- 1) Sous-échantillonnage de l'image par un facteur de 200 (ex: dégradation d'une image originale de 2000 x 2000 pixels en une image de 10 x 10 pixels) ;
- 2) Filtre gaussien 3 x 3 (au plus proche voisin) ;
- 3) Extraction par masque pour enlever les pixels à l'extérieur du filtre ;
- 4) Sur-échantillonnage à la taille originale (interpolation cubique) ;
- 5) Inversion de l'image en soustrayant à 255 ;
- 6) Soustraction du minimum pour retour à l'origine ;
- 7) Application du filtre à l'image.

- *Transformation en températures*

Les images obtenues à l'aide de la caméra infrarouge thermique sont composées de pixels en niveaux de gris. Les niveaux de gris des images ont été transformés en températures (émissivité) par une régression linéaire basée sur des mesures au sol acquises simultanément aux vols à l'aide d'un thermomètre infrarouge (modèle Raynger ST de Raytek™). Les mesures ont été effectuées sur quatre types de couverts : le sol nu du chemin agricole, la partie supérieure du rang de pomme de terre, une bâche blanche et une bâche noire de réflectances quasi-lambertiennes.

3.5.2. *Corrections géométriques*

- *Mosaïquage*

La réalisation de plusieurs prises de vue est nécessaire afin d'obtenir l'imagerie complète d'une parcelle puisque l'emprise d'une image demeure inférieure à celle d'un champ. L'imagerie acquise par lignes de vol a donc été assemblée par le biais d'algorithmes de reconnaissance de points similaires entre images avec une gestion des points de vue multiples selon l'approche développée par Kolor (2011). De nombreux logiciels de mosaïquage existent ; et après une comparaison de qualité de chacun d'entre eux, le choix s'est tourné vers le logiciel développé par Kolor™. Ce dernier permet d'ajuster toutes les relations entre les images afin d'obtenir les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) les plus faibles.

- *Géoréférencement*

À partir des points de contrôle disposés dans les parcelles, le géoréférencement a pu être réalisé. Une transformation polynomiale du deuxième ordre a été appliquée et les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) du géoréférencement ont été calculées pour chaque campagne à l'aide des cibles au sol. Les mosaïques visible-proche infrarouge ont été géoréférencées avec les points de contrôle puis les mosaïques thermiques ont été superposées à l'imagerie visible pour être géoréférencées le plus précisément possible afin de pouvoir calculer l'indice de végétation qui combine les images des deux capteurs (section 3.5.1.).

3.6. Acquisition et traitements des données au champ

3.6.1. Estimation des paramètres biophysiques (Année 1)

- *Mesures des paramètres biophysiques*

La première année du projet a été consacrée à l'établissement et la calibration de la méthode d'estimation des paramètres biophysiques. Les six campagnes de vol sur le site du Saguenay-Lac-Saint-Jean ont permis d'acquérir des données du même champ tout au long de la période de croissance de la pomme de terre (Tableau 4). Entre 20 et 35 sites par campagne de vol ont été caractérisés sur le terrain. Ces sites dans lesquels plusieurs paramètres biophysiques ont été mesurés, ont été sélectionnés aléatoirement et correspondent à un quadrat d'un mètre carré (Figure 19).

Les mesures suivantes ont été effectuées pour chaque site:

- Indice foliaire (leaf area index) : calculé par découpage du quadrat en 25 sous-quadrats de 20 x 20 cm et estimé en pourcentage de recouvrement (Figure 19).
- Teneur en chlorophylle : mesurée à la surface de la quatrième feuille à l'aide d'un chlorophyllemètre de modèle CM 1000 de FieldScout™ ;
- Température à la surface de la quatrième feuille : mesurée à l'aide d'un thermomètre infrarouge de modèle Raynger ST de Raytek™ ;
- Biomasse : mesurée en récoltant les plants sur la totalité de la surface du quadrat (1m²). Celle-ci a été pesée avant et après séchage ;
- Photographie du quadrat : prise de vue verticale ;
- Point GPS : le positionnement géographique de chaque quadrat à l'aide du GPS de haute précision GeoXH de Trimble™ (0-15 cm de précision).

Lors d'une dernière campagne de terrain, en fin de saison et avant l'arrachage, les tubercules ont été prélevés et pesés sur 32 sites dans la parcelle. À l'emplacement de ces points de mesures, les tubercules présents dans les quadrats d'un mètre carré ont été pesés.



Figure 19 : Mesures sur le terrain et principe d'estimation du couvert végétal par l'utilisation d'un quadrat divisé en 25 sous-quadrats.

- *Indices de végétation*

Tel qu'exprimé dans la section 2.3., les indices de végétation, basés sur des bandes spectrales des domaines visible proche infrarouge et infrarouge thermique, peuvent être calculés. Dans le cadre de ce projet, les indices qui ont été testés sont les suivants (l'indice TDVI a été testé seulement la seconde année):

- NDVI : *Normalized Difference Vegetation Index* (Rouse et al., 1973)² (2)

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

- SAVI : *Soil-Adjusted Vegetation Index* (Huete, 1988)² (3)

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + L)} * (1 + L)$$

- MSAVI 2 : *Modified Soil Vegetation Index* (Qi et al., 1994b)² (4)

$$MSAVI2 = \frac{(2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * NIR + 1)^2 - 8 * (NIR - RED)})}{2}$$

² NIR : proche infrarouge ; RED : rouge ; GREEN : vert ; L : 0,5 ; Ts : température de surface ; Ts min : température de surface minimum ; a : ordonnée à l'origine ; b : pente de la droite reliant température de surface au NDVI maximum. À noter que cet indice n'a pu être testé qu'à l'année 2.

- GNDVI : *Green Normalized Difference Vegetation Index* (Buschmann et Nagel, 1993)² (5)

$$GNDVI = \frac{(NIR - GREEN)}{(NIR + GREEN)}$$

- RVI : *Ratio Vegetation Index* (Birth et McVey, 1968)² (6)

$$RVI = \frac{NIR}{RED}$$

- TVDI : *Temperature - Vegetation Dryness Index* (Sandholt *et al.*, 2002)² (7)

$$TVDI = \frac{Ts - T_{smin}}{a + bNDVI - T_{smin}}$$

- *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.

3.6.2. *Production de cartes de dépistage (Année 2)*

La production de cartes de dépistage, élaborée durant la deuxième année, consiste à réaliser des cartes ponctuelles des zones de stress des parcelles survolées, en s'appuyant sur la méthodologie de prétraitement et traitement de l'imagerie de l'année 1. L'acquisition d'imagerie de la première année a permis d'établir les étapes de traitements d'imagerie pour la seconde année même si la plateforme a changée (avion, année 1 et ASP, année 2) afin d'accélérer le processus de traitement.

Le choix des champs a été orienté par la recherche de parcelles avec une problématique connue : présence de ravageurs, maladies ou problèmes de développement. La détermination des stress a été réalisée par le biais d'une classification supervisée en transformant les valeurs des indices de végétation en valeurs correspondantes aux catégories du formulaire de dépistage. Les dépistages ont été effectués les mêmes jours que les vols (les dates des vols sont présentées dans le Tableau 4). Pour chaque vol, un premier dépistage a permis d'obtenir un jeu de données pour l'élaboration de la classification supervisée et un deuxième, pour la validation de cette classification.

- *Mise au point de la classification*

La classification supervisée des indices de végétation a été réalisée grâce aux dépistages de l'entreprise Prisme Consortium (méthode présentée dans la section 2.2.) dont les sites mesurés ont été utilisés comme sites d'entraînement. Pour chacun des sites, les observations issues du formulaire ont été transformées en format binaire (Tableau 6). Le choix de ce format a été fait suite à la réalisation de tests préliminaires. La volonté première était de différencier l'intensité des attaques sur les zones touchées par les maladies, les ravageurs et les problèmes de développement. Le nombre d'observations n'était cependant pas assez important pour refléter la variabilité des intensités et types de stress présents dans le formulaire de dépistage (Figure 5), il a donc été nécessaire de reclassifier les observations en réduisant le nombre de catégories. Une classe supplémentaire de stress généralisé a également été créée : les sites qui possèdent 1 stress ou moins ont été classés comme généralement non stressés et les sites qui possèdent 2 stress et plus ont été considérés comme généralement stressés (Tableau 7). Des classifications indépendantes correspondant à chaque type de stress ont été effectuées (ravageurs, maladies, développement et stress général). La classification supervisée à 6 classes simultanées (maladie, non maladie, ravageur, non ravageur, problème de développement et absence de problème de développement) n'a pu être

réalisée à cause de la mauvaise séparabilité des classes entre elles. Une même valeur d'indice étant généralement catégorisée dans plusieurs classes de stress.

Tableau 6 : Transformation des observations du formulaire de dépistage en format binaire exploitable pour les classifications

Stress	Observations	Code stress
Ravageurs	0 - 2 adultes	0
	3 - 4 adultes	1
	0 - 2 larves	0
	3 - 5 larves	1
	0 - 2 foyers	0
	3 - 5 foyers	1
	Dégâts Cicadelle	1
	Dégâts Altise	1
Maladies	Aucune maladie	0
	Intensité 1	0
	Intensité 2	1
	Intensité 3	1
Développement	Plant couché	0
	Manque plant	1
	Développement inégal	1
	Plants jaunes	1
	Plants petits	1
	Baïssière	1
	Rigole	1
	Carence	1

Tableau 7 : Création d'une classe supplémentaire de stress généralisé

Stress général	
Pas de stress	0
1 stress	0
2 stress	1
3 stress	1

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.

- *Validation de la classification*

Un deuxième jeu de données a été prélevé pour obtenir des données supplémentaires par le biais d'un dépistage indépendant afin de valider les classifications. Préalablement, 60 sites ont été sélectionnés en utilisant une approche stratifiée à partir d'une carte NDVI classifiée par seuils naturels pour chaque champ en deux classes (cet indice a été choisi par défaut car les analyses de l'année 1 n'étaient pas complétées). Cette approche a permis de concentrer ce deuxième dépistage dans les zones à fort potentiel de stress pour y obtenir une majorité de sites de validation (en partant de l'hypothèse qu'un faible NDVI indiquait une meilleure probabilité de stress qu'un NDVI élevé). Ce dépistage a été effectué par le personnel du projet de recherche selon la méthode utilisée par l'entreprise spécialisée en dépistage. Les données obtenues ont été mises en relation avec les valeurs de la classification supervisée afin de valider ou non les classes générées.

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

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.

4. Résultats

Les résultats seront présentés dans le même ordre que dans le cadre expérimental en commençant par les prétraitements et traitements propres aux deux années du projet. Ensuite, les résultats portant sur l'estimation des paramètres biophysiques et la production des cartes de dépistage seront présentés. Finalement cette section sera complétée par les résultats de l'analyse technico-économique.

4.1. Prétraitements

4.1.1. Corrections radiométriques

- *Vignelage*

La correction du vignelage consiste à appliquer un facteur radial pour retrouver les valeurs vraies de niveaux de gris des pixels situés en bordure des images. La valeur de correction du vignelage appliquée est la moyenne des valeurs des deux images (nombre entier le plus proche) ; ici elle est égale à 37 %. Ce facteur fonctionne comme un filtre de distribution radiale. Le facteur de 37 % s'applique à 100% dans les angles puis diminue au fur et à mesure jusqu'au centre.

Le facteur est calculé comme ci-après :

$$\text{Valeurs luminance angles} = 36 - 32 - 32 - 36 / \text{Moyenne} = 34$$

$$\text{Valeur luminance centre} = 54$$

$$\text{Valeur de correction vignelage} = 1 - (34/54) = 1 - 0,6296 = 0,3704 = 37,04\%$$

La Figure 20, en composé fausses couleurs, illustre bien l'efficacité du procédé sur une image d'une surface homogène. Les différences de luminance entre les pixels situés au nadir et les pixels situés vers l'extérieur de l'image sont de l'ordre de 14 à 16 %. Dans le cas d'une image acquise au-dessus d'un champ (Figure 21), la différence entre les images originales et les images corrigées n'est pas discernable à l'œil nu. Cependant, la comparaison des histogrammes des deux images (Figure 21)

montre que l'effet de correction rehausse les valeurs de niveaux de gris des pixels situés à l'extérieur de l'image.

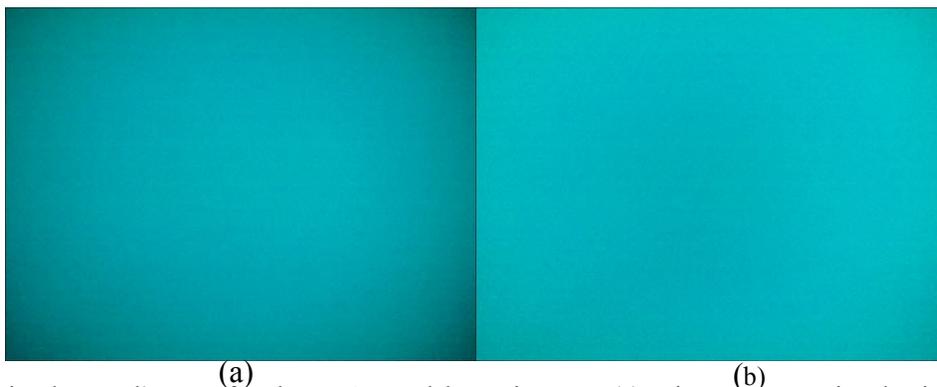


Figure 20 : Prise de vue d'une surface homogène en laboratoire avant (a) puis après correction du vignetage³ (b) en composé fausses couleurs³

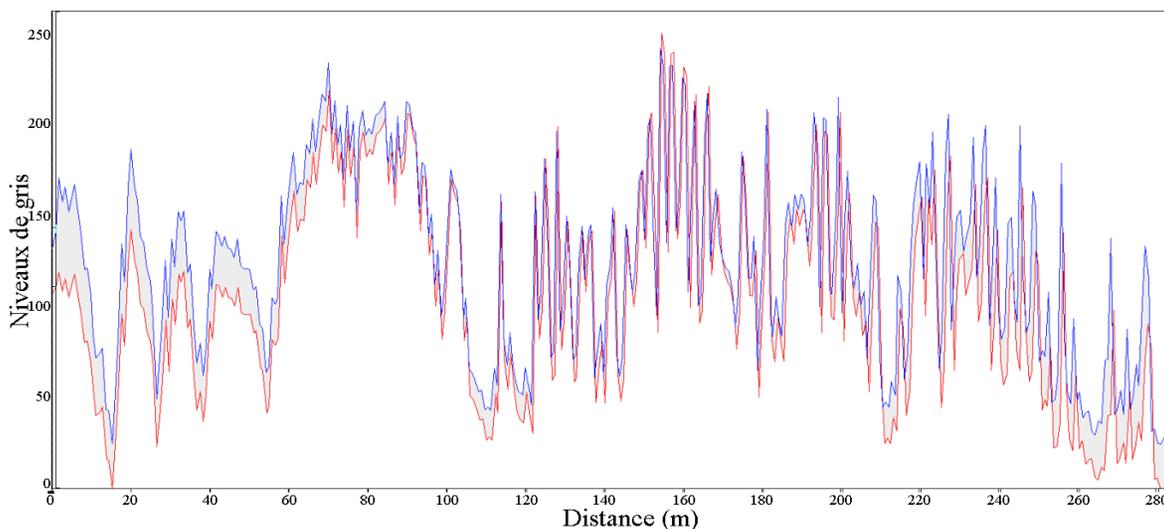
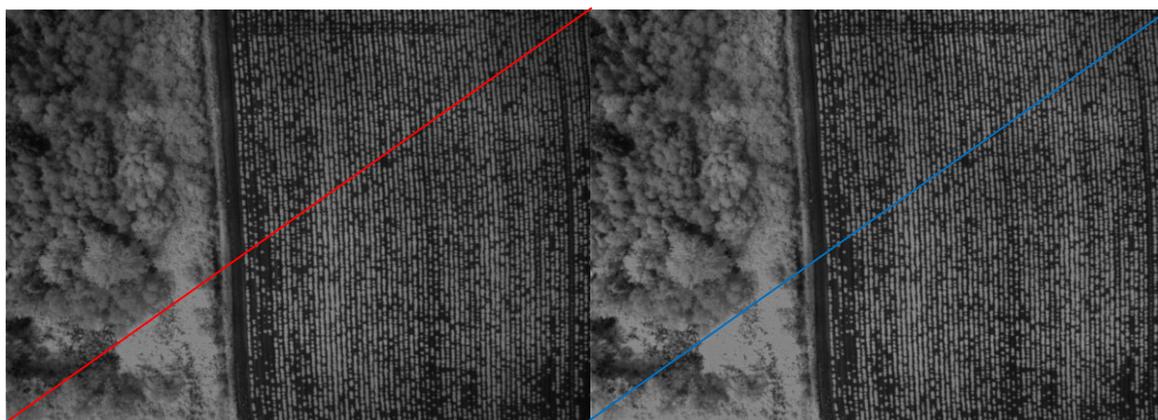


Figure 21 : Histogrammes des valeurs de niveaux de gris pour la bande PIR de l'image originale (transect rouge) et de l'image corrigée pour le vignetage (transect bleu). La différence est illustrée en grisé.

³ +40% contraste, +40% luminosité

- *Normalisation des bandes pour le capteur Tetracam™ ADC Lite*

Les analyses montrent que les niveaux de gris des 3 bandes (proche infrarouge, rouge et verte) pour une cible de réflectance de 100 % demeurent relativement stables malgré la variation du temps d'exposition (Figure 22). Les rapports entre les bandes proche infrarouge et rouge (PIR/R) et les bandes proche infrarouge et verte (PIR/V) sont également relativement stables malgré les variations de réflectances (Figure 23).

Le rapport moyen PIR/R est de 0,84 et celui PIR/V est de 0,69. Ces valeurs ont donc été appliquées pour effectuer une normalisation avec la bande PIR ; ce qui permet, pour une cible de réflectance de 100 %, d'obtenir des niveaux de gris équivalents pour chaque bande. Après cette opération, les niveaux de gris sont considérés comme équivalents à la réflectance apparente. Bien que cette méthode possède des limites, elle a permis, par la comparaison des résultats finaux avec normalisation et sans normalisation, d'améliorer les coefficients de détermination des relations entre les paramètres biophysiques et les indices de végétation.

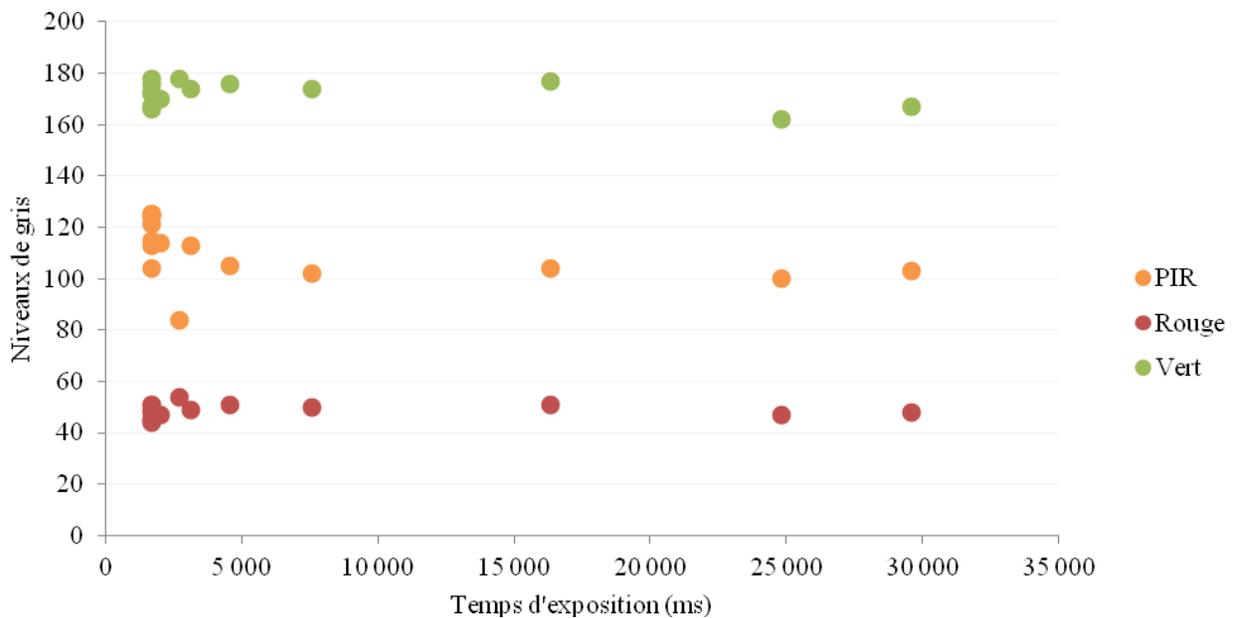


Figure 22 : Niveaux de gris par bande (PIR/R/V) et par temps d'exposition (ms) pour une cible de réflectance de 100 %.

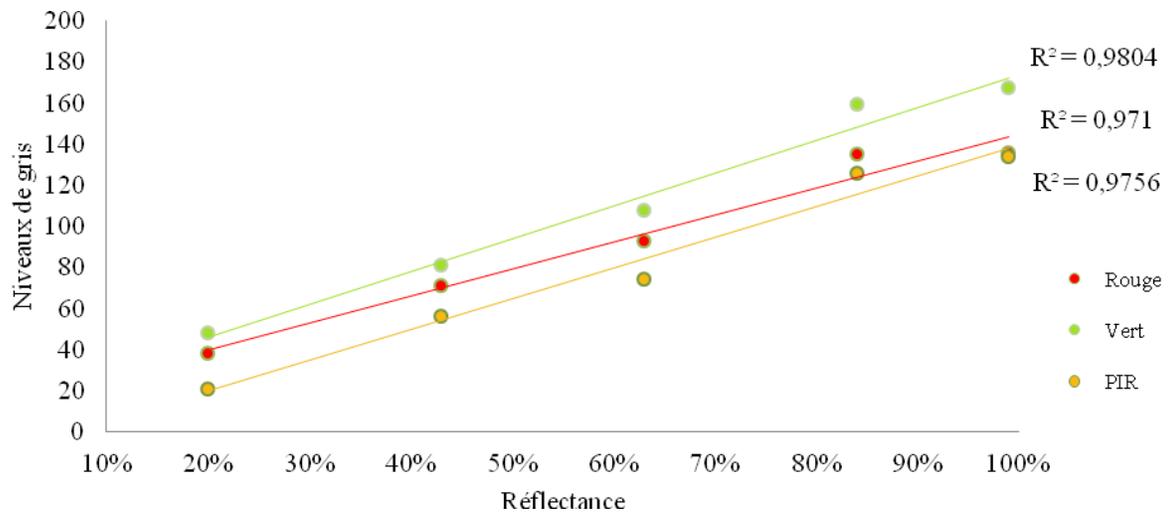


Figure 23 : Moyennes des niveaux de gris par bande des images acquises avec l'ADC Lite en fonction de la réflectance des spectrals utilisés.

- *Réflectance bidirectionnelle*

Grâce à la méthode d'homogénéisation *Local Range Modification*, les mosaïques ont pu être corrigées. La Figure 24 présente les étapes d'application du filtre de correction. Sur l'image originale, on observe nettement un changement d'éclaircissement durant la dernière ligne de vol et qui a pu être corrigé par l'application du masque. L'histogramme des valeurs spectrales de l'image corrigée est plus proche d'une loi normale que celui de l'image originale.

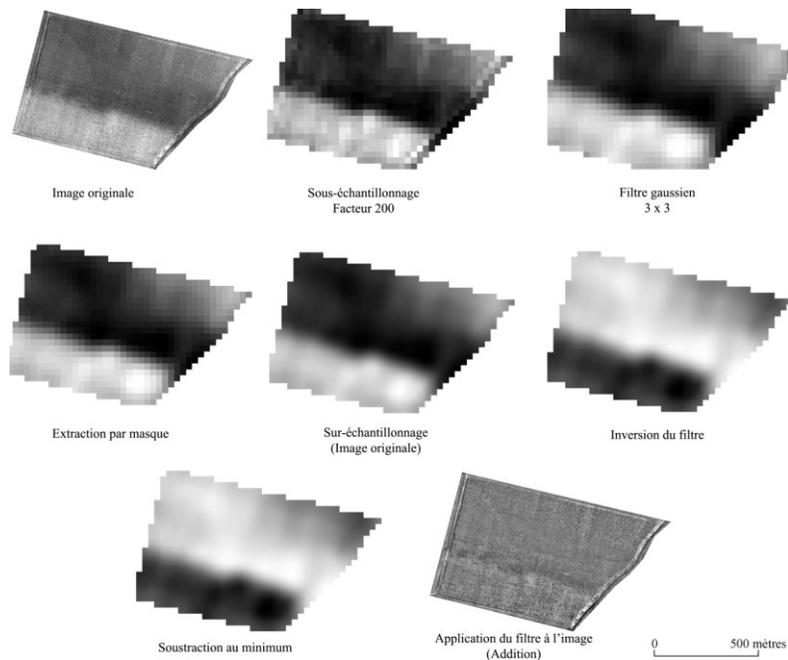


Figure 24 : Présentation des étapes de la méthode de Lelong *et al.* (2008) de correction de la réflectance bidirectionnelle sur l'ensemble d'une mosaïque.

- *Transformation en température émissive*

Les mesures effectuées au sol à l'aide du thermomètre infrarouge ont été moyennées par type de couvert et mises en relation avec les valeurs de niveaux de gris de la caméra infrarouge thermique correspondantes. Une régression linéaire a permis de transformer les niveaux de gris en températures émissives avec un minimum d'erreur, les coefficients de détermination s'échelonnant entre 0,99 et 1. Un exemple de régression est illustré par la Figure 25.

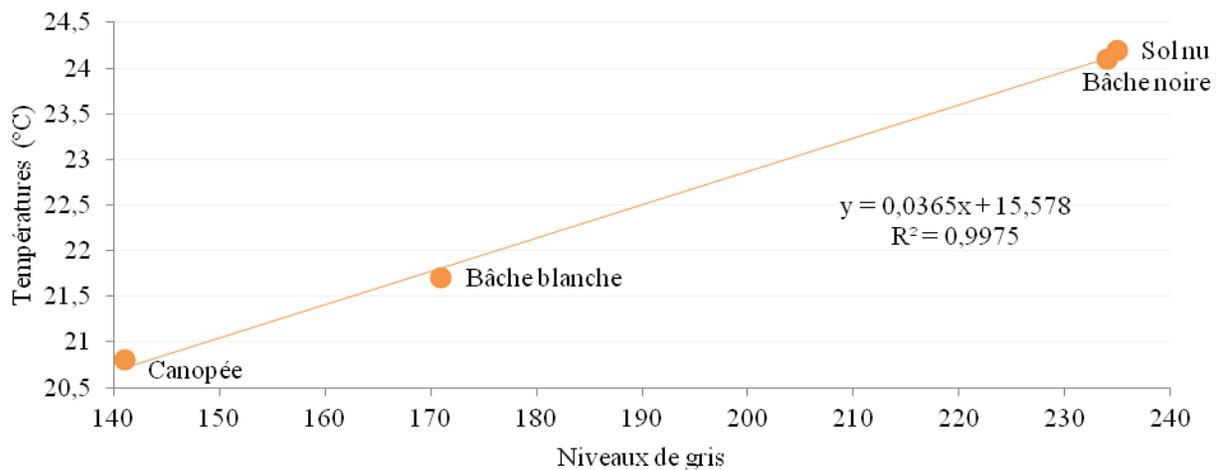


Figure 25 : Exemple d'une droite de régression pour transformation des niveaux de gris de l'imagerie issue de la caméra thermique en températures.

4.1.2. *Corrections géométriques*

- *Mosaïquage*

L'erreur quadratique moyenne (RMSE) de l'algorithme utilisé à l'étape du mosaïquage a été calculée pour tous les champs. La RMSE moyenne du mosaïquage est de 2,94 pixels; soit 12 centimètres lors d'un vol à 120 mètres d'altitude. Onze parcelles agricoles ont été mosaïquées à l'aide de ce logiciel avec, en moyenne, 21,5 images et plus de 6800 points de concordance par champ. Suite au mosaïquage, le recouvrement moyen des images entre elles de toutes les mosaïques se chiffre à 86,3 %. Un exemple de mosaïque réalisée est présenté à la Figure 26. Les 11 mosaïques réalisées sont présentées dans le Tableau 8 ci-après.

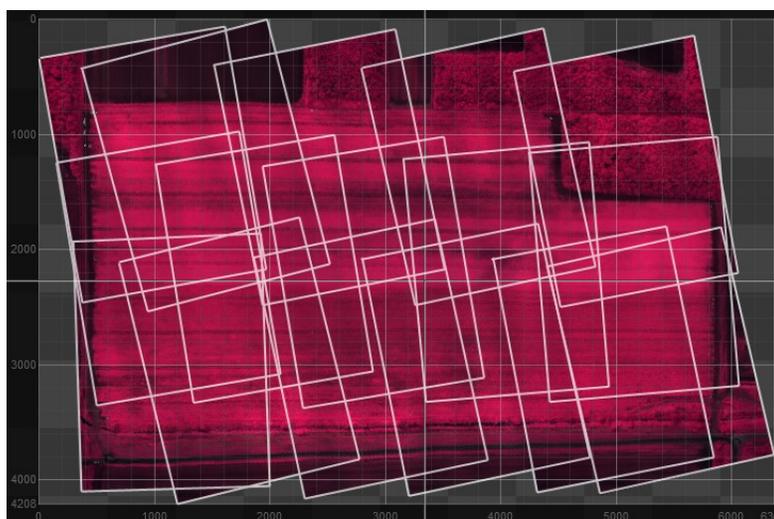


Figure 26 : Exemple d'une mosaïque (composé fausses couleurs) d'images acquises au-dessus d'une parcelle de pomme de terre en Montérégie.

Tableau 8 : Récapitulatif des mosaïquages réalisés sur l'ensemble des champs survolés lors des 2 années.

Date	Nombre d'images	Points de contrôle	Recouvrement (%)	RMSE (en pixels)
21-06-2012	34	13 666	91,2	2,70
05-07-2012	19	4 595	70,9	2,28
13-07-2012	27	7 860	94,1	2,35
25-07-2012	22	7 587	85,1	2,44
07-08-2012	22	6 932	79,2	2,16
14-08-2012	20	5 764	78,4	2,17
18-07-2013	7	2 184	70,6	3,16
18-07-2013	25	3 336	98,5	2,71
27-07-2013	19	3 318	94,6	3,25
27-07-2013	26	13 564	97,0	4,63
01-08-2013	16	6 781	90,0	4,56

Afin de vérifier si le mosaïquage affecte les valeurs radiométriques des pixels, les moyennes et écarts-types ont été calculés avant et après le mosaïquage. Le Tableau 9 présente les moyennes et écarts-types de quatre images issues d'une même mosaïque. L'observation de ces valeurs ainsi que leurs histogrammes (Figure 27), montre que cette étape influence relativement peu les valeurs radiométriques des images.

Tableau 9 : Comparaison des moyennes et écarts-type avant et après mosaïquage.

	BANDE 1		BANDE 2		BANDE 3	
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type
Image 1225	101,12	13,00	56,34	8,44	66,90	6,54
Mosaïque	100,53	12,76	55,42	8,40	66,13	6,49
Écart (%)	0,58	--	1,63	--	1,15	--
Image 1226	118,43	25,00	60,70	11,86	73,92	8,91
Mosaïque	117,48	24,93	59,69	11,86	72,96	8,92
Écart (%)	0,8	--	1,66	--	1,3	--
Image 1284	56,41	7,16	37,09	5,09	45,66	4,23
Mosaïque	60,98	9,16	34,64	4,95	42,70	3,56
Écart (%)	7,49	--	6,61	--	6,48	--
Image 1287	66,08	9,80	41,73	5,46	48,68	4,45
Mosaïque	64,78	10,10	40,42	5,10	47,53	4,34
Écart (%)	1,97	--	3,14	--	2,37	--

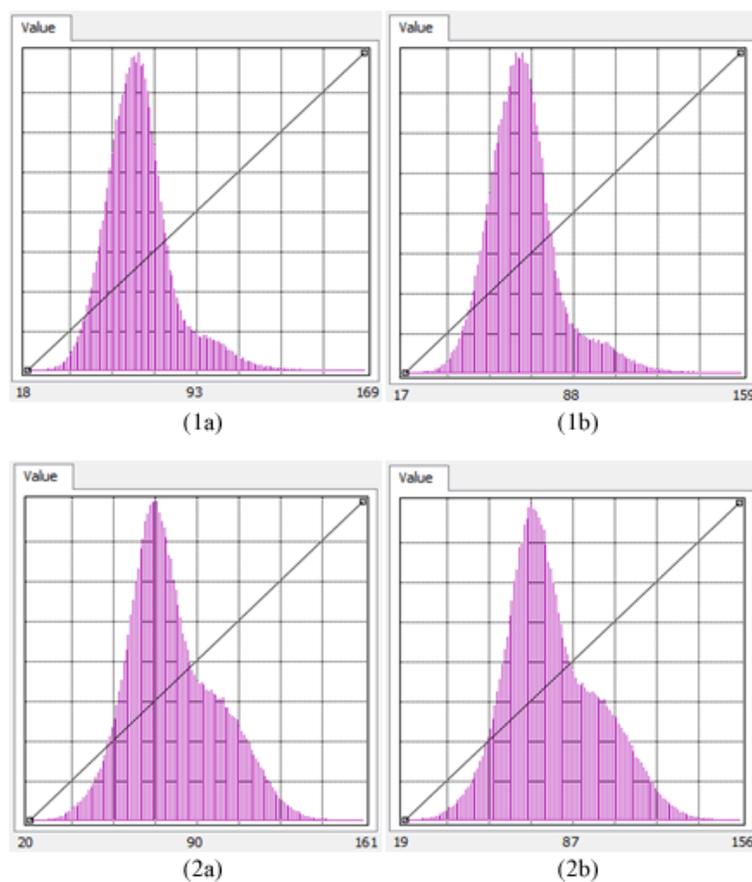


Figure 27: Exemple d'histogrammes pour l'image 1222 avant (1a) et après mosaïquage (1b) et pour l'image 1223 avant (2a) et après mosaïquage (2b)

- *Géoréférencement*

Une fois les mosaïques générées, les images de l'ADC Lite ont été géoréférencées à l'aide des points de contrôle au sol et les images de la caméra thermique ont été géoréférencées par superposition. La RMSE moyenne du géoréférencement de l'ensemble des champs pour l'imagerie issue de l'ADC Lite atteint 0,33 m (Tableau 10). Pour les mosaïques thermiques, la RMSE moyenne est de 0,05 m (Tableau 11). Néanmoins, les erreurs, lors du positionnement par GPS des points de contrôle au sol, doivent être considérées. Ces dernières, après corrections différentielles, sont estimées entre 0 et 0,15 m pour 90 % d'entre elles. L'erreur moyenne cumulée maximale reste donc inférieure à un mètre pour cette étape.

Tableau 10 : Nombre de points de contrôle et RMSE du géoréférencement des mosaïques visibles infrarouges.

Date	Points de contrôle	RMSE (en m)
21-06-2012	44	0,26
05-07-2012	42	0,41
13-07-2012	31	0,66
25-07-2012	28	0,06
07-08-2012	27	0,19
14-08-2012	27	0,12
18-07-2013	16	0,15
18-07-2013	11	0,44
27-07-2013	14	0,55
27-07-2013	14	0,26
01-08-2013	22	0,61

Tableau 11 : Nombre de points de contrôle et RMSE du géoréférencement des mosaïques infrarouges thermiques.

Date	Points de contrôle	RMSE (en m)
18-07-2013	9	0,03
18-07-2013	8	0,02
27-07-2013	7	0,06
27-07-2013	7	0,05
01-08-2013	11	0,08

4.2. Estimation des paramètres biophysiques (Année 1)

4.2.1. Extraction des valeurs spectrales

Tel que vu précédemment, quatre méthodes d'extraction des valeurs spectrales ont été testées. Dans 83,33 % des cas (25/30), la méthode d'extraction à un mètre obtient le meilleur coefficient de détermination par rapport aux trois autres approches soit la valeur directe du pixel, la moyenne échantillonnée à 20 cm et à 50 cm (Tableau 12). Dans le cas de la biomasse humide et sèche, on observe une augmentation du coefficient de détermination proportionnelle à la surface agrégée de la méthode d'extraction. Pour les autres paramètres, les différences de valeurs des coefficients de détermination ne sont pas importantes. Cette méthode permet de prioriser l'extraction des valeurs spectrales à un mètre afin de réaliser les analyses subséquentes; seuls les résultats de cette méthode seront présentés.

Tableau 12 : Exemples de coefficients de détermination de régressions logarithmiques simples entre les paramètres biophysiques mesurés et les indices de végétation en fonction des méthodes d'extraction (les valeurs maximales sont exprimées en gras).

Indices	Méthodes	Biomasse humide	Biomasse sèche	Température	Chlorophylle	Luminance	Couverture
NDVI	Valeur directe	0,64	0,17	0,03	0,23	0,12	0,03
	Agrégation à 20 cm	0,71	0,25	0,06	0,25	0,13	0,03
	Agrégation à 50 cm	0,75	0,28	0,05	0,24	0,13	0,05
	Agrégation à 1 m	0,78	0,32	0,06	0,25	0,14	0,05
MSAVI 2	Valeur directe	0,68	0,19	0,03	0,25	0,12	0,03
	Agrégation à 20 cm	0,75	0,28	0,06	0,27	0,12	0,03
	Agrégation à 50 cm	0,78	0,31	0,05	0,26	0,13	0,05
	Agrégation à 1 m	0,81	0,34	0,06	0,26	0,13	0,04
GNDVI	Valeur directe	0,47	0,56	0,10	0,06	0,09	0,00
	Agrégation à 20 cm	0,51	0,61	0,12	0,06	0,11	0,00
	Agrégation à 50 cm	0,53	0,64	0,13	0,05	0,12	0,00
	Agrégation à 1 m	0,53	0,64	0,12	0,05	0,12	0,00
SAVI	Valeur directe	0,64	0,17	0,03	0,23	0,12	0,03
	Agrégation à 20 cm	0,71	0,25	0,06	0,25	0,13	0,03
	Agrégation à 50 cm	0,75	0,28	0,05	0,24	0,13	0,05
	Agrégation à 1 m	0,78	0,31	0,06	0,25	0,14	0,05
RVI	Valeur directe	0,42	0,09	0,02	0,13	0,12	0,01
	Agrégation à 20 cm	0,48	0,14	0,05	0,15	0,13	0,02
	Agrégation à 50 cm	0,56	0,18	0,05	0,16	0,15	0,05
	Agrégation à 1 m	0,61	0,20	0,06	0,19	0,17	0,04

4.2.2. Régressions simples

Tel qu'exprimé précédemment, même si la régression linéaire simple a été également testée, la régression logarithmique simple a été priorisée puisque la distribution des observations tend à saturer à partir d'une certaine valeur. La régression linéaire, ne permet d'obtenir qu'un coefficient de détermination maximum de 0,55 pour la relation GNDVI / biomasse humide (Tableau 13). La régression simple permet néanmoins d'illustrer que la biomasse humide possède les meilleurs résultats en comparaison des autres paramètres. Les indices utilisés ne permettent pas d'estimer la température mesurée puisque les coefficients de détermination sont inférieurs à 0,08. Les autres paramètres (chlorophylle, luminance, couverture et biomasse sèche) possèdent également des coefficients de détermination relativement faibles entre 0,08 et 0,19. L'indice GNDVI obtient néanmoins un coefficient largement supérieur aux autres indices dans l'estimation de la biomasse sèche avec un coefficient de détermination de 0,48.

Tableau 13 : Coefficients de détermination des régressions linéaires simples entre les paramètres biophysiques mesurés et les indices de végétation agrégés à 1 mètre (la valeur maximale est exprimée en gras).

Indices	Biomasse humide	Biomasse sèche	Température	Chlorophylle	Luminance	Couverture
NDVI	0,48	0,17	0,03	0,17	0,10	0,13
MSAVI 2	0,49	0,19	0,03	0,18	0,09	0,13
GNDVI	0,55	0,48	0,07	0,03	0,08	0,07
SAVI	0,48	0,17	0,03	0,17	0,10	0,13
RVI	0,41	0,10	0,03	0,12	0,11	0,11

Dans le cas de la régression logarithmique des valeurs agrégées à 1 mètre, les coefficients apparaissent réellement supérieurs (Tableau 14). Parmi ces paramètres, seule la biomasse humide se démarque avec des coefficients de détermination de 0,78 et 0,81. La biomasse sèche et la chlorophylle suivent ensuite avec des coefficients entre 0,64 et 0,19. La luminance, la température et la couverture sont, ici encore, les moins bien estimés. Le MSAVI 2, le NDVI et le SAVI sont les indices qui permettent d'obtenir les meilleurs résultats pour l'estimation de la biomasse humide. L'indice RVI permet de mieux estimer la luminance même si le coefficient de détermination est seulement de 0,17. Enfin, l'indice GNDVI permet d'obtenir un coefficient relativement élevé pour estimer la biomasse sèche.

La meilleure relation observée est donc l'estimation de la biomasse humide à l'aide de l'indice de végétation MSAVI 2 avec un R^2 de 0,81 (Figure 28). La formule suivante permet donc de transformer les images en quantité de biomasse humide :

$$\text{Biomasse humide} = 0,2059 * e^{11,952 * \text{MSAVI} 2} \quad (8)$$

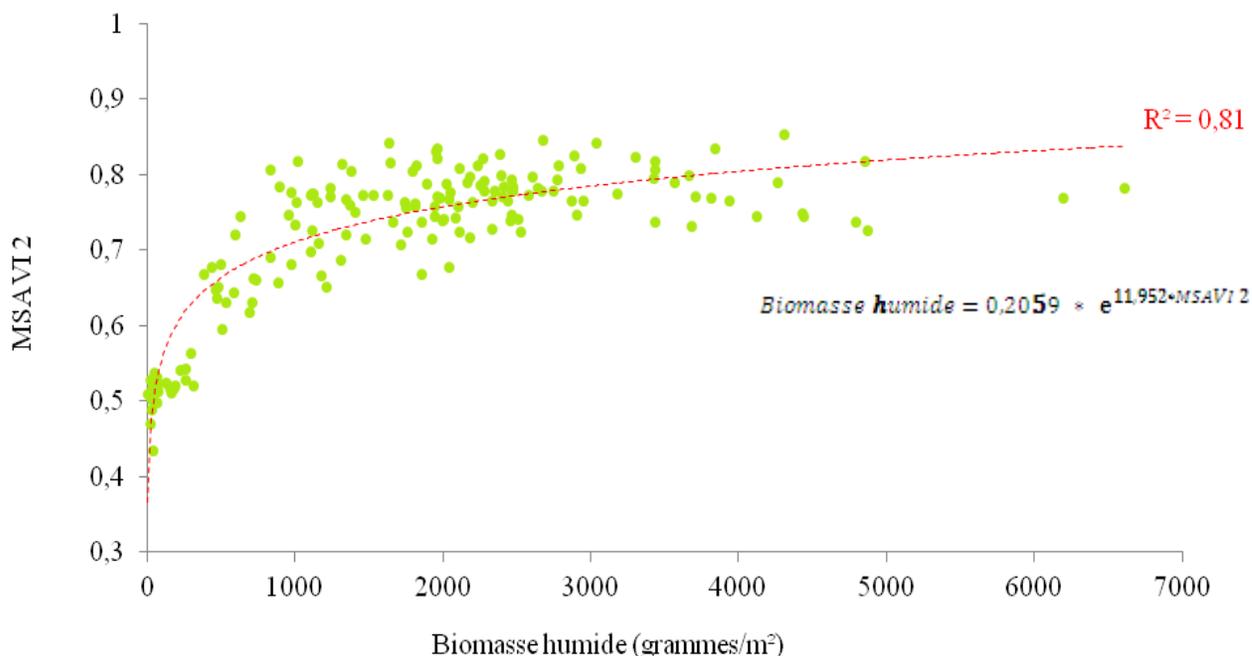


Figure 28 : Droite de régression logarithmique de la biomasse humide avec l'indice MSAVI 2.

Les mesures des poids des tubercules ont été effectuées avant l'arrachage des plants de pomme de terre afin d'estimer le rendement de la culture. Ces points ont été mis en relation avec les valeurs des indices de végétation agrégés à un mètre et ceci pour chaque campagne de vol (Tableau 14). La performance du modèle selon la méthode de régression linéaire est ici encore inférieure à celle du modèle selon la régression logarithmique. Cette dernière génère des coefficients de détermination entre 0,13 et 0,33 ; ce qui reste relativement faible. Cependant, aucun indice de végétation ne se démarque. Les meilleurs coefficients de détermination concernent les dates du 13 et 25 juillet. Les plus faibles correspondent aux dates du début de la croissance des pommes de terre.

Tableau 14 : Tests de régressions linéaire et logarithmique entre le poids de tubercules par quadrats en fonction des indices de végétation par date de vol (les valeurs maximales sont exprimées en gras).

Dates	Indices	Régression linéaire	Régression logarithmique
21 juin 2012	NDVI	0,00	0,13
05 juillet 2012		0,00	0,22
13 juillet 2012		0,05	0,30
25 juillet 2012		0,01	0,31
07 aout 2012		0,01	0,26
14 aout 2012		0,00	0,28
21 juin 2012		GNDVI	0,00
05 juillet 2012	0,01		0,24
13 juillet 2012	0,05		0,31
25 juillet 2012	0,00		0,32
07 aout 2012	0,01		0,26
14 aout 2012	0,05		0,29
21 juin 2012	MSAVI 2		0,00
05 juillet 2012		0,00	0,24
13 juillet 2012		0,05	0,30
25 juillet 2012		0,02	0,30
07 aout 2012		0,01	0,28
14 aout 2012		0,00	0,29
21 juin 2012		SAVI	0,00
05 juillet 2012	0,00		0,22
13 juillet 2012	0,05		0,30
25 juillet 2012	0,01		0,31
07 aout 2012	0,01		0,26
14 aout 2012	0,00		0,28
21 juin 2012	RVI		0,00
05 juillet 2012		0,00	0,19
13 juillet 2012		0,04	0,29
25 juillet 2012		0,00	0,33
07 aout 2012		0,01	0,24
14 aout 2012		0,08	0,21

4.2.3. Régressions multiples

L'AIC nécessite de générer les modèles candidats pour la régression multiple. Il a été réalisé sur l'ensemble des 6 mosaïques de la première année soit les 180 sites terrain mesurés tout au long de la saison de croissance de la pomme de terre. L'observation de la matrice de corrélation (coefficient de Pearson) des indices de végétation entre eux permet de sélectionner les variables les moins corrélées entre elles pour définir les modèles (Tableau 15).

Tableau 15 : Matrice de corrélation du Coefficient de Pearson entre les différents indices de végétation sur l'ensemble des 180 sites mesurés (les valeurs minimales sont exprimées en gras).

	GNDVI	MSAVI 2	NDVI	RVI	SAVI
GNDVI	1,00	0,76	0,76	0,73	0,76
MSAVI 2	0,76	1,00	1,00	0,98	1,00
NDVI	0,76	1,00	1,00	0,98	1,00
RVI	0,73	0,98	0,98	1,00	0,98
SAVI	0,76	1,00	1,00	0,98	1,00

L'indice de végétation GNDVI se dégage comme étant le moins corrélé avec les autres indices avec des coefficients de Pearson inférieurs à 0,80. Le GNDVI reste le seul indice de végétation qui utilise la bande verte de l'imagerie dans son calcul ce qui peut expliquer la plus faible corrélation avec les autres indices.

Les modèles candidats suivants ont donc été testés:

- Modèle candidat n° 1 : GNDVI + MSAVI 2
- Modèle candidat n° 2 : GNDVI + NDVI
- Modèle candidat n° 3 : GNDVI + SAVI
- Modèle candidat n° 4 : GNDVI + RVI

Les modèles candidats ont été testés pour tous les paramètres biophysiques. Une fois encore, la quantité de biomasse humide constitue le paramètre qui semble le plus efficacement estimable, ce qui confirme les résultats précédents. Pour une meilleure compréhension, seuls les résultats de ce dernier sont présentés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Résultats du Critère d'Information d'Akaike (AIC) pour le cas de la biomasse humide (la valeur maximale est exprimée en gras).

Paramètre biophysique	Modèle	Indices sélectionnés	R² ajusté	AICc	Delta AICc	Poids AIC	Poids cumulés	Ratio
Biomasse humide	1	GNDVI + MSAVI 2	0,83	18,02	0	0,94	0,94	32,1
Biomasse humide	2	GNDVI + NDVI	0,82	24,95	6,94	0,03	0,97	32,1
Biomasse humide	4	GNDVI + SAVI	0,82	25,20	7,18	0,03	1	
Biomasse humide	3	GNDVI + RVI	0,75	81,97	63,95	0	1	

L'indice AICc indique la vraisemblance du modèle à tendre vers la variable « Biomasse humide ». Plus l'AICc est faible, plus le modèle est efficace. Le Delta AIC permet également de comparer les modèles entre eux. Plus facile à lire, il exprime la distance avec le meilleur modèle (ici le modèle 1). Un poids AICc est donc accordé à chaque modèle en fonction de sa qualité de régression. Dans le cas du paramètre de biomasse humide, deux modèles sont retenus. Le modèle 1 possède un poids de 0,94; ce qui illustre 94 % de chance que ce modèle soit meilleur que les autres. Le modèle 2 ne possède pas un poids significatif, mais son potentiel d'amélioration du premier modèle demeure suffisant pour l'intégrer à la régression.

L'intégration des modèles 1 et 2, à partir de l'inférence multimodèle AIC, améliore la relation entre la biomasse humide mesurée et la biomasse humide estimée (Figure 29). Le coefficient de détermination obtenu totalise 0,83. Cela montre que la régression multiple n'améliore que de très peu le résultat par rapport à une régression simple dans le cas de la biomasse humide (de 0,81 à 0,83).

Par l'observation des résultats, une meilleure qualité de régression avec l'approche multiple AIC est possible. Cependant, la simplicité ainsi que la qualité de la régression simple représentent deux atouts non négligeables lorsqu'un des objectifs du projet est d'automatiser et de développer un outil rapide d'aide à la décision. La Figure 30 présente la quantité de biomasse humide estimée suite à la régression logarithme simple. L'effet positif de l'irrigation circulaire sur la partie sud-ouest du champ se perçoit relativement bien et se transpose par une quantité de biomasse humide estimée plus importante. La végétation présente sur les bordures de la parcelle possède une quantité de biomasse moins importante qu'au centre, Deux rangs et une tâche rouges sont visibles au centre de la parcelle et correspondent à des problèmes mécaniques lors de la plantation; les plants n'ont pas levés.

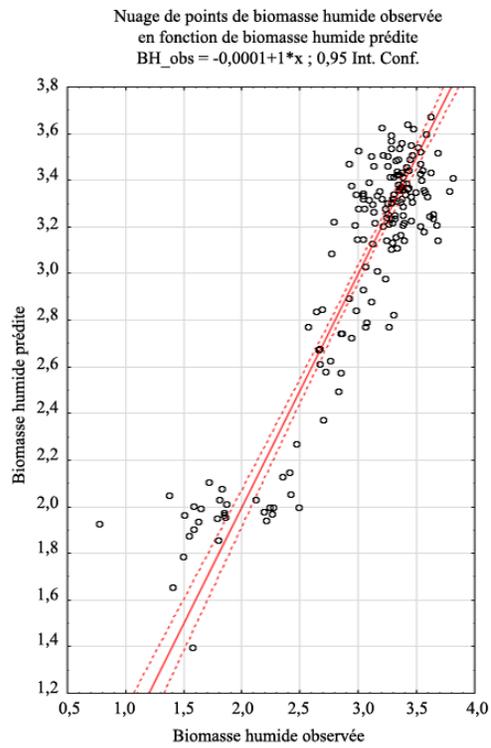


Figure 29 : Nuage de points de la biomasse humide mesurée en fonction de la biomasse humide prédite par régression multiple GNDVI + MSAVI2 en utilisant les 180 points de mesure au sol.



Figure 30 : Carte de la quantité de biomasse estimée (en grammes/m²) sur la parcelle de pomme de terre survolée le 07 août 2012 au Saguenay-Lac-Saint-Jean.

4.3. Production de cartes de dépistage (Année 2)

4.3.1. *Mise au point de la classification*

La mise au point de la classification a été effectuée en utilisant 139 sites de dépistage. Parmi ceux-ci, 25 présentent des cas de maladies, 18 présentent des cas de ravageurs, 81 des problèmes de développement. 46 sites ne présentent aucun stress, 66 présentent un stress, 23 cumulent 2 stress et 4 cumulent les 3 stress. Le tableau 18 présente les moyennes de valeurs de chaque indice de végétation en fonction du stress présent ou non. Les covariances et les distances de Fisher Kernel sont aussi présentées afin d'illustrer la qualité de séparabilité des classes entre elles. Plus la covariance est proche de 0, plus la séparabilité est bonne et inversement pour la distance de Fisher Kernel; si la distance est supérieure à 2, elle illustre une bonne séparabilité entre les classes. L'indice MSAVI 2 est l'indice de végétation qui obtient la meilleure séparabilité des valeurs spectrales entre les dépistages qui identifient une maladie et ceux qui ne le font pas avec une distance de Fisher Kernel de 3,34 (Tableau 17). La représentation des valeurs de l'indice MSAVI 2 en fonction du critère de maladie (Figure 31) confirme la potentialité de celui-ci à être classifié avec un minimum d'erreur (3,6 %). Le TDVI possède également de bonnes distances de Fisher Kernel pour les classes de maladie ainsi que pour la classification du stress général. Autre élément, la présence de ravageurs et les problèmes de développement présentent une faible séparabilité, même à l'aide de l'imagerie thermique. Pour chaque classification testée, le Tableau 17 présente les moyennes et les covariances des classes. La covariance exprime le degré de liaison des 2 classes entre elles. Donc plus la covariance est faible, plus les classes sont indépendantes. Les indices NDVI, MSAVI 2, SAVI et TVDI obtiennent les meilleures covariances (proches de 0).

Pour classifier et cartographier les zones touchées par la maladie, l'indice MSAVI 2 combine la meilleure covariance et la plus grande distance de Fisher Kernel. Dans le cas de la classification des zones de ravageurs, aucun indice ne se démarque. Pour les problèmes de développement, le TVDI est l'indice qui réunit la meilleure covariance et distance de Fisher Kernel. Enfin, pour la classification de stress général, l'indice TDVI semble le plus efficace selon les covariances et les distances de Fisher Kernel observées.

Néanmoins, afin de vérifier les covariances et les distances de Fisher Kernel, tous les indices ont été classifiés par maximum de vraisemblance en utilisant les sites d'entraînement. La Figure 32 présente les zones touchées par les maladies et celles qui ne le sont pas selon les résultats de chaque

classification. Visuellement, les zones malades diffèrent d'un indice à l'autre. Les classifications des indices NDVI, MSAVI 2, SAVI et RVI génèrent beaucoup de zones touchées contrairement aux indices GNDVI et TDVI qui n'en comptent que très peu. Les indices NDVI, MSAVI 2 et TDVI ont en commun de mettre en relief les extrémités de la parcelle. Certaines classifications montrent des zones de maladie au centre de la parcelle, comme le NDVI, le SAVI et le RVI. L'indice MSAVI 2 illustre également ce phénomène mais de manière plus discrète. La classification de l'indice GNDVI ne permet pas d'illustrer la présence de maladie dans ce champ.

Tableau 17 : Récapitulatif des moyennes et covariances ainsi que les distances de Fisher Kernel pour chaque classe de stress en fonction des indices de végétation testés.

		Nombre de sites	NDVI	GNDVI	MSAVI 2	SAVI	RVI	TVDI
Maladie	Non malade	114	0,81	0,14	0,87	1,21	13,47	0,03
	Malade	25	0,74	0,57	0,74	1,10	7,96	0,10
	<i>Covariance</i>		<i>0,00</i>	<i>0,12</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>24,77</i>	<i>0,00</i>
	<i>Distance de Fisher Kernel</i>		<i>2,26</i>	<i>0,42</i>	<i>4,34</i>	<i>2,23</i>	<i>1</i>	<i>3,90</i>
Ravageur	Non ravageur	121	0,80	0,18	0,85	1,19	12,56	0,04
	Ravageur	18	0,79	0,16	0,85	1,18	11,10	0,05
	<i>Covariance</i>		<i>0,00</i>	<i>0,11</i>	<i>0,00</i>	<i>0,01</i>	<i>28,89</i>	<i>0,00</i>
	<i>Distance de Fisher Kernel</i>		<i>0,03</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0,03</i>	<i>0,09</i>	<i>0,03</i>
Développement	Bon développement	58	0,82	0,14	0,89	1,22	14,09	0,03
	Mauvais développement	81	0,77	0,23	0,80	1,14	10,05	0,07
	<i>Covariance</i>		<i>0,00</i>	<i>0,09</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>28,00</i>	<i>0,00</i>
	<i>Distance de Fisher Kernel</i>		<i>0,14</i>	<i>0,30</i>	<i>0,35</i>	<i>0,14</i>	<i>0</i>	<i>0,63</i>
Stress général	Non stressé	112	0,81	0,20	0,87	1,22	14,06	0,03
	Stressé	27	0,77	0,12	0,80	1,13	9,07	0,07
	<i>Covariance</i>		<i>0,00</i>	<i>0,07</i>	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	<i>26,44</i>	<i>0,00</i>
	<i>Distance de Fisher Kernel</i>		<i>1,49</i>	<i>0,44</i>	<i>2,11</i>	<i>1,48</i>	<i>0,77</i>	<i>2,97</i>

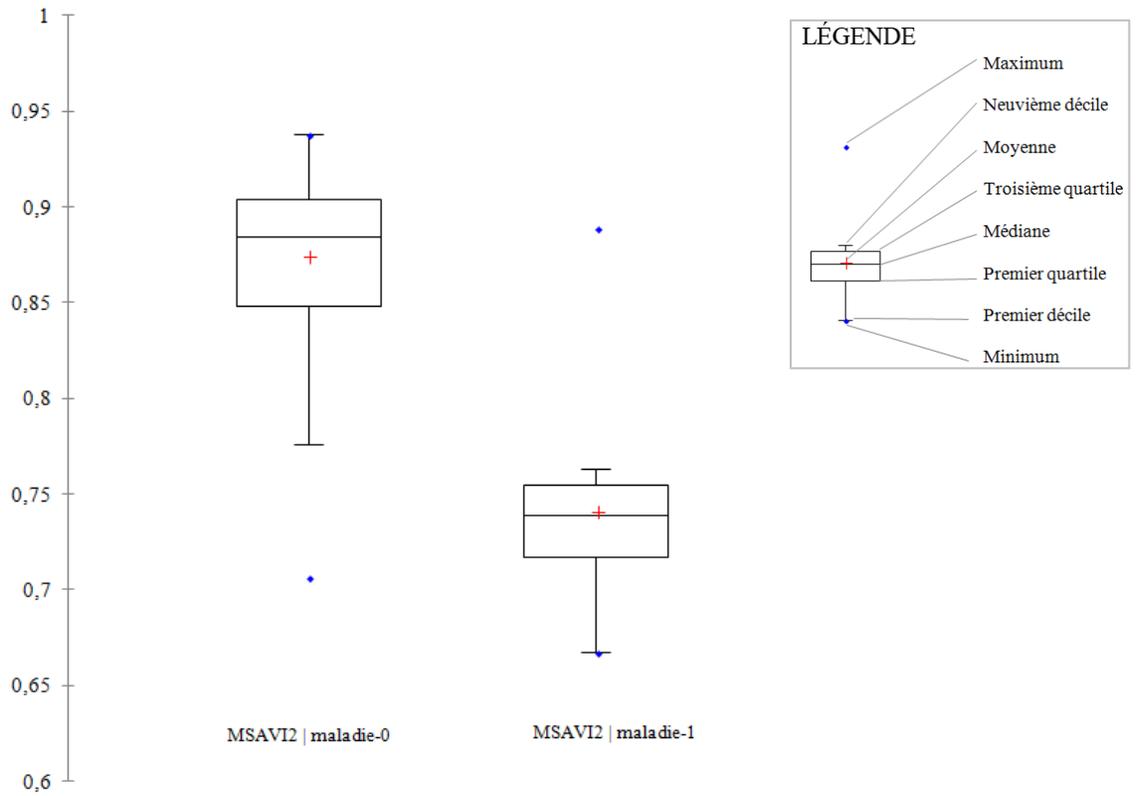


Figure 31 : Variation des valeurs pour les classes malade et non malade du MSAVI 2 sur l'ensemble des champs

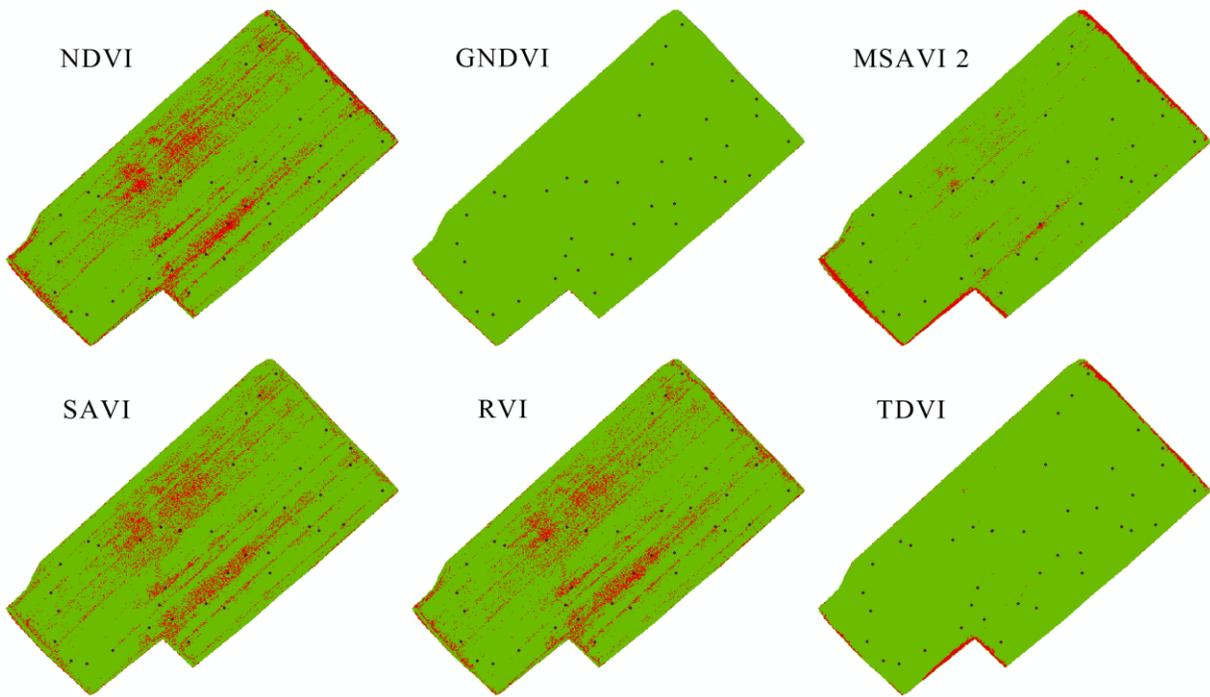


Figure 32 : Classifications par maximum de vraisemblance des zones malades (en rouge) selon chaque indice de végétation sur une même parcelle de pomme de terre survolée en Montérégie

4.3.2. Validation de la classification

Les classifications testées avec les indices de végétation ont été validées par 60 sites de dépistage (Tableau 18). Les maladies apparaissent comme les perturbations les mieux classifiées avec des pourcentages de validation supérieurs à 50 %. L'indice MSAVI 2 apparaît comme l'indice le plus efficace pour déterminer les maladies; le deuxième dépistage valide à 100 % cette classification même si les indices NDVI et SAVI possèdent de bons pourcentages. Concernant la classification de la présence ou non des ravageurs, l'indice TVDI présente une classification moyenne efficace à près de 90 %. Enfin, l'indice MSAVI 2 permet de déterminer à 97,5 % la présence d'un stress général (2 ou 3 perturbations cumulées) et l'indice TDVI à 94 %.

Cette approche permet de réaliser des cartes zonales de présence de maladies, de ravageurs, de problèmes de développement et de stress général. Le jour même du vol, une carte peut donc être livrée aux dépisteurs. Ces cartes permettent de concentrer les analyses dans les zones à risques.

Tableau 18 : Pourcentages des points du dépistage qui valident les classifications effectuées. Les valeurs en gras illustrent les meilleurs résultats obtenus pour chaque catégorie de stress.

	Nombre de sites	NDVI	GNDVI	MSAVI 2	SAVI	RVI	TVDI
Maladie	20	100 %	100 %	100 %	100 %	80 %	95 %
Non-maladie	40	95 %	50 %	100 %	95 %	88 %	10 %
Ravageur	19	100 %	95 %	5 %	100 %	100 %	84 %
Non-ravageur	41	68 %	46 %	10 %	54 %	51 %	95 %
Mauvais développement	51	59 %	90 %	80 %	75 %	61 %	73 %
Bon développement	9	89 %	0 %	78 %	11 %	78 %	89 %
Stress	20	100 %	100 %	100 %	100 %	0 %	90 %
Non-stress	40	83 %	50 %	95 %	70 %	55 %	98 %

4.3.3. Exemples de cartes de dépistage

Les cartes réalisées permettent d'identifier les zones touchées par les stress. La Figure 33 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 35 met

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 36 illustre les zones touchées par 2 ou 3 stress avec la même tendance que les cartes précédentes.

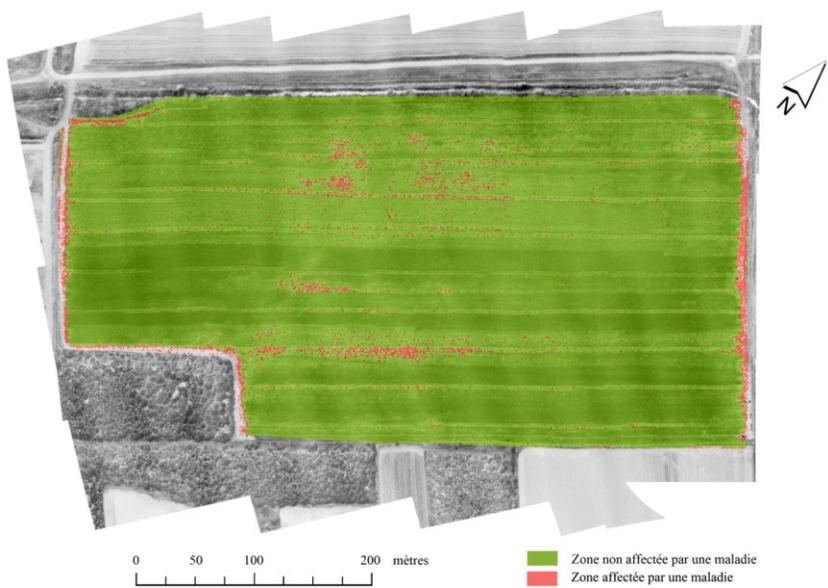


Figure 33 : Exemple d'une classification du MSAVI 2 pour identifier les zones affectées par une maladie dans une parcelle de pommes de terre en Montérégie.

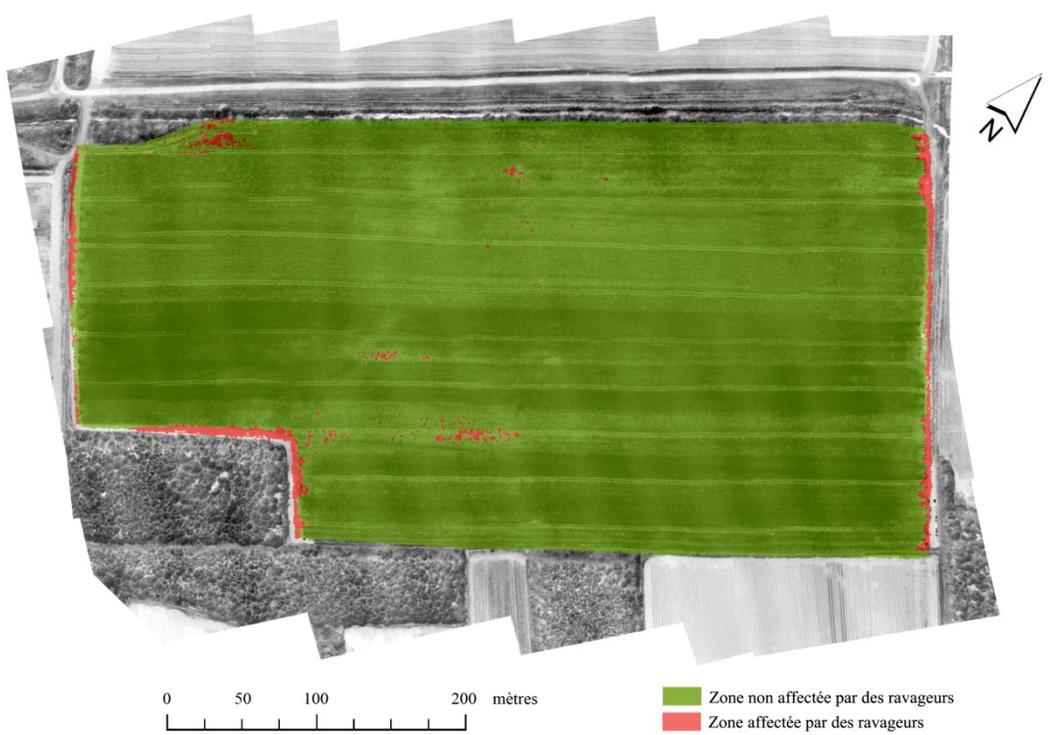


Figure 34 : Exemple d'une classification du TDVI pour identifier les zones affectées par des ravageurs dans une parcelle de pommes de terre en Montérégie.

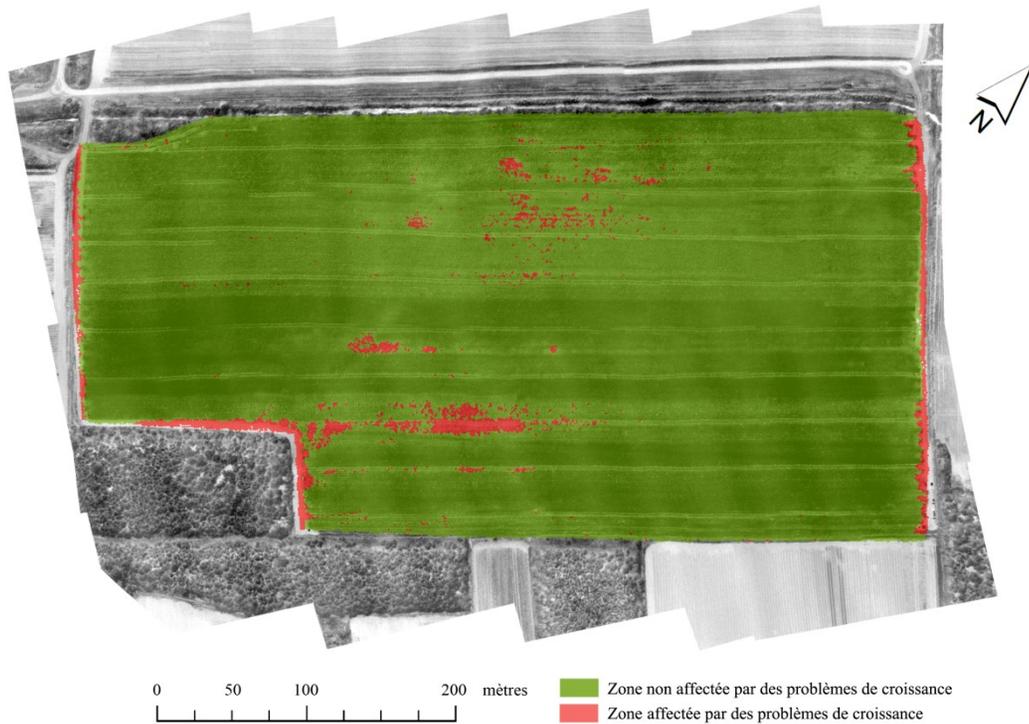


Figure 35 : Exemple d'une classification du TDVI pour identifier les zones affectées par des problèmes de développement dans une parcelle de pommes de terre en Montérégie.

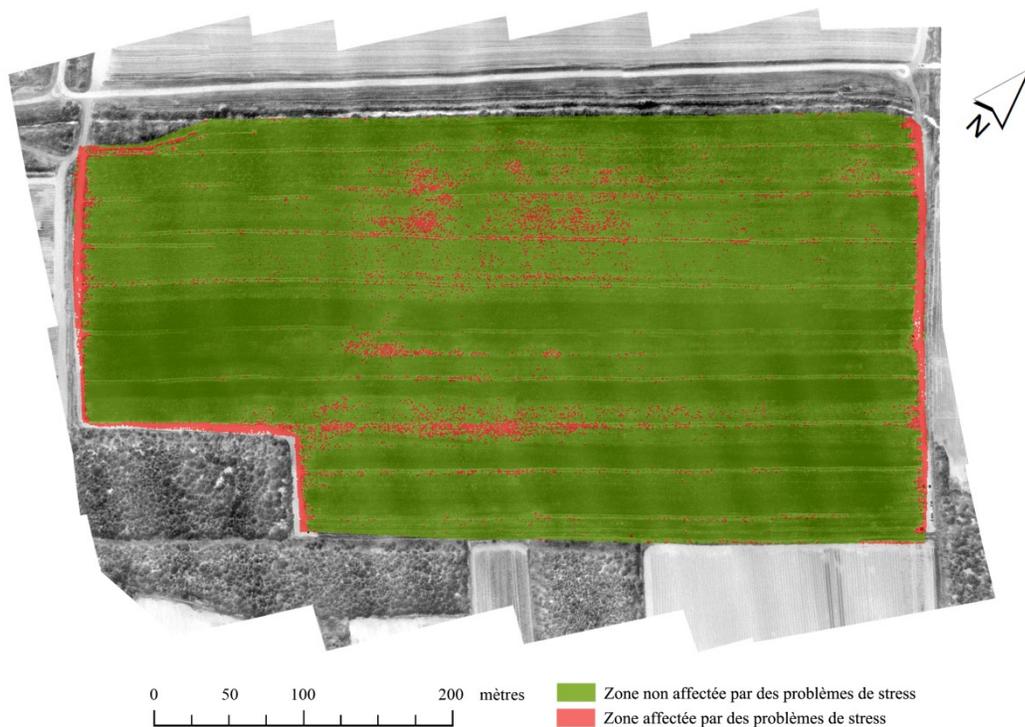


Figure 36 : Exemple d'une classification du MSAVI 2 pour identifier les zones affectées par des problèmes de stress généralisés dans une parcelle de pommes de terre en Montérégie.

4.4. 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 mais cette conclusion sera discutée dans la section 5.3.

Tableau 19 : Comparatif des coûts d'acquisition d'imagerie satellitaire, aérienne et par ASP pour une campagne de vol d'une parcelle de pommes de terre de 10 hectares.

		Satellite		Aérien		ASP			
	Description	Temps (h)	Coût (\$CA)	Description	Temps (h)	Coût (\$CA)	Description	Temps (h)	Coût (\$CA)
Acquisition imagerie	Achat imagerie corrigée*	0	1 500 \$	Location avion +	--	800 \$	Location ASP (avec pilote)	--	3 500 \$
				Prise de vue avec pilote			Prise de vue (1 personne)		

Prétraitements				Corrections géométriques	2	60 \$	Corrections géométriques	2	60 \$
				Corrections radiométriques	2	60 \$	Corrections radiométriques	2	60 \$
				Géoréférencement	2	60 \$	Géoréférencement	2	60 \$
Traitements	Découpage de la parcelle	1	30 \$	Découpage de la parcelle	1	30 \$	Découpage de la parcelle	1	30 \$
	Indices de végétation	1	30 \$	indices de végétation	1	30 \$	indices de végétation	1	30 \$
	Classifications des stress	1	30 \$	Classifications des stress	1	30 \$	Classifications des stress	1	30 \$
Terrain**				Installation cibles (2 personnes avec GPS)	2	180 \$	Installation cibles (2 personnes avec GPS)	2	180 \$
	Dépistage	1	33 \$	Dépistage	1	33 \$	Dépistage	1	33 \$
				Désinstallation cibles	1	60 \$	Désinstallation cibles	1	60 \$
TOTAUX			1 623 \$			1 343 \$			4 103 \$

*Imagerie Pleiades (0,50m), minimum 50km² à 30\$/km². ** pour une parcelle de 10ha

5. Discussion

5.1. Prétraitements

5.1.1. Corrections radiométriques

- *Vignelage*

L'effet de vignelage présent sur les images acquises dans ce projet a été corrigé grâce à l'utilisation d'un facteur radial de correction qui a permis de rehausser les valeurs des pixels situés en bordure des images. La correction du vignettage apporte de meilleurs résultats (augmentation du coefficient de détermination de 0,03 par exemple pour la régression logarithmique de la biomasse humide avec l'indice MSAVI 2) lors de l'estimation des paramètres biophysiques qu'une estimation sans correction. Même si l'amélioration du coefficient de détermination n'est pas notable, la correction du vignelage correspond à appliquer un facteur de correction en cochant une option dans le logiciel du capteur utilisé, contrairement à la régression multiple où les traitements sont plus chronophages (amélioration de 0,02 du coefficient de détermination). C'est pour cela que dans ce projet, le choix a été fait d'appliquer la correction du vignelage et de ne pas d'utiliser la régression multiple. La méthode est propre au capteur et à l'objectif utilisés ce qui permet de l'appliquer automatiquement à l'ensemble des images acquises. De plus, Lelong *et al.* (2008) appuient cette méthode de correction

qu'ils appliquent également sur leurs images proche infrarouge. Yu (2004) compare dans son étude les méthodes de correction du vignetage et met en relief deux méthodes efficaces dont l'une est l'application d'un facteur radial de correction à partir du centre de l'image. Compte-tenu de l'efficacité et de la facilité d'automatisation de cette étape de correction, il est fortement recommandé de l'appliquer et cela dans n'importe quel contexte de production d'imagerie automatisée.

- *Normalisation des bandes*

L'approche de normalisation des bandes développée dans ce projet a permis de montrer que même en cas de variation de l'éclairement lors des prises de vues, le rapport entre les bandes du capteur visible proche infrarouge utilisé ne varie que très peu. Cette constance a permis d'appliquer des valeurs de normalisation inter-bandes généralisables sur l'ensemble des images acquises. Encore une fois, les résultats de l'estimation des paramètres biophysiques sont meilleurs avec la normalisation que sans. La méthode de normalisation utilisée dans ce projet permet d'obtenir des indices de végétation en équivalence de réflectance apparente stables malgré les variations d'éclairement durant les vols. Cependant, même si Primicerio *et al.* (2012) montrent la capacité de l'ADC Lite de Tetracam™ à estimer avec précision la végétation au sol en comparant les valeurs de l'imagerie avec les valeurs mesurées par un spectroradiomètre au sol, l'intégration d'un capteur de rayonnement incident améliore la qualité des résultats (Calderon *et al.*, 2014). La connexion de ce dernier à un capteur permet donc d'intégrer dans les métadonnées des images acquises la quantité de l'éclairement incident au moment de la prise de vue. Il est ensuite facile d'intégrer cette étape dans une chaîne de traitement afin de corriger les images avec ces valeurs d'éclairement et ainsi transformer les images en réflectance apparente automatiquement. De plus, cela apporte un gain de temps non négligeable dans les traitements de l'imagerie et permet de livrer rapidement un produit fini de qualité pour les agriculteurs.

- *Correction de la réflectance bidirectionnelle*

Sans les informations de vol et plus particulièrement les angles d'Euler durant l'acquisition des images, il est difficile de corriger les effets de réflectance bidirectionnelle. Appliquée directement sur les mosaïques, la méthode *Local Range Modification* a permis de corriger les effets néfastes de la réflectance bidirectionnelle et ainsi améliorer les résultats de l'estimation des paramètres biophysiques. Cette méthode a montré son efficacité dans l'étude de Lelong *et al.* (2008) pour corriger l'imagerie sans les données de la station inertielle et de la position géographique. Mais la

méthode la plus efficace reste encore l'intégration d'une station inertielle qui permet de corriger les effets de réflectance bidirectionnelle grâce aux données intégrées aux images. Une fois encore, cette étape peut-être automatisée et réduire le temps de traitements de l'imagerie.

- *Transformation en température émissive*

L'imagerie infrarouge thermique acquise en niveaux de gris a été transformée en températures grâce à des mesures au sol sur des surfaces différentes. Le choix de ces surfaces a été fait grâce à des tests qui ont permis d'obtenir 4 valeurs de régression différentes. Une différence notable de températures apparaît entre la canopée et le sol nu ainsi qu'entre la bâche blanche et la bâche noire. Le coefficient obtenu montre une régression de qualité et qu'une transformation des niveaux de gris en températures est possible avec un minimum d'erreur. Sheng *et al.* (2010) ont été confrontés au même obstacle que dans ce projet : les valeurs de pixels du capteur thermique étaient exprimées seulement en niveaux de gris. Ils ont également réalisé des mesures de températures au sol afin de transformer les valeurs spectrales initiales en températures par une droite de régression linéaire. Dans le cas de l'utilisation de la caméra TAU640 de FLIR™, un module supplémentaire peut être intégré afin d'obtenir l'imagerie thermique directement en températures émissives sans mesures au sol ce qui serait souhaitable afin de limiter l'effort de prise de données terrain.

5.1.2. Corrections géométriques

- *Mosaïquage*

L'étape du mosaïquage a été réalisée avec Autopano Giga 3 qui est généralement utilisé par les photographes spécialisés en photographies panoramiques. Après comparaison avec d'autres, ce logiciel est apparu comme le plus efficace pour assembler les images acquises entre elles. L'intérêt majeur est de pouvoir contrôler manuellement toutes les options du procédé et de ne générer l'assemblage qu'une fois la RMSE moyenne obtenue. Cependant, le temps consacré est conséquent afin d'obtenir une mosaïque de qualité. Effectivement, Fangi et Nardinocchi (2013) démontrent dans leur étude la puissance de ce logiciel mais également que les procédés sont chronophages. De plus, comme vu précédemment, le mosaïquage avec Autopano Giga 3 modifie les valeurs spectrales des images sur les zones de recouvrement, ce qui peut être néfaste lors de l'interprétation des données. Les valeurs des pixels entre deux images dans les zones de superposition sont moyennées durant le mosaïquage. Même si la priorité est donnée aux pixels les plus proches du centre des images (les moins affectés par certaines perturbations radiométriques), les valeurs radiométriques sont

modifiées, ce qui explique cette variation pouvant atteindre presque 8%. Concernant la méthode de mosaïquage utilisée ici, d'autres logiciels ont fait leur apparition depuis, comme Pix4Dmapper® et Photoscan®, et assemblent les images rapidement et avec précision. Turner *et al.* (2014) ont notamment montré l'intérêt de ces logiciels dans l'automatisation de l'assemblage et du géoréférencement des images acquises par ASP tout en préservant les images de modifications radiométriques puisque ceux-ci tiennent compte des différentes données du capteur lors de l'acquisition des images (calibration de la caméra, longueur de la focale, distorsion de l'objectif, position et orientation de la camera).

- *Géoréférencement*

Le géoréférencement en deux étapes a été effectué afin de géoréférencer, en premier lieu, les images visibles proches infrarouges grâce aux points de contrôle puis, en deuxième lieu, les images infrarouges thermiques en les superposant avec les premières. Cette méthode a permis d'ajuster précisément l'imagerie infrarouge thermique sur l'imagerie visible proche infrarouge afin de pouvoir générer l'indice TVDI qui se base sur ces deux sources d'images. La précision moyenne du géoréférencement de toute l'imagerie utilisée lors du projet est de 0,33 m, ce qui est relativement bon compte tenu du nombre de mosaïques générées. Afin d'améliorer cette précision, Grenzdorffer *et al.* (2008) proposent une méthode qui couple l'intégration des positions géographiques et les angles d'Euler intégrés dans les images avec des points de contrôle au sol afin d'obtenir une précision moyenne de 0,11 m. Turner *et al.* (2011) ont comparé la précision des deux méthodes de géoréférencement : avec et sans points de contrôle au sol. Même s'il apparaît dans leur étude que la méthode indirecte (par points de contrôle au sol) est plus efficace que la méthode directe, l'installation et la désinstallation des cibles au sol et leur mesure de positionnement sont très chronophages. C'est pourquoi le géoréférencement direct est à prioriser même si l'intégration de certaines composantes, comme le positionnement géographique et les angles d'Euler, dans les métadonnées des images est nécessaire pour l'aérotriangulation automatique (Sugiura *et al.*, 2005; Zhou, 2009; Xiang et Tian, 2011; Chiang *et al.*, 2012). De plus, beaucoup de recherches sont mises en place pour améliorer la qualité et la précision des appareils de mesures embarqués (magnétomètre, accéléromètre, gyromètre, altimètre), de sorte que la précision de géoréférencement direct de l'ordre du centimètre sera bientôt disponible sans l'aide de points de contrôle au sol (Colomina et Molina, 2014). Cependant, l'atteinte de cette échelle de grandeur n'est pas une quête en soi mais la résolution au sol doit être sélectionnée selon l'application visée. Par exemple, certaines applications agricoles telles que la planification des parcelles pour le nivellement

nécessitent une précision de l'ordre du centimètre alors que l'estimation des paramètres biophysiques nécessite une résolution plus grossière.

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 géoréférencement, 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 quadrats 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 Magonigal (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

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 non-linéaire 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 multispectrale 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 Absorption Ratio*) (chlorophylle) ou OSAVI (*Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index*) (structure de la plante) (Zarco-Tejada *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.

Enfin, dans ce projet, l'imagerie thermique a été valorisée grâce à l'indice de végétation TVDI qui la combine avec l'imagerie visible proche infrarouge. Selon Sandholt *et al.* (2002), il est principalement utilisé afin de déterminer les problématiques liées à la sécheresse. Ce projet montre que cet indice améliore la détection des problèmes de développement par rapport aux indices de végétation basés sur l'imagerie visible proche infrarouge. Ces problèmes de développement sont en lien avec les manques en eau subis par la culture durant la saison de croissance. Plusieurs études démontrent également que cet indice est plus efficace que les indices NDVI et SAVI dans le suivi de la croissance de la végétation (Bannari *et al.*, 2002; Patel *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2004).

- *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.

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.

Tableau 20 : Avantages et inconvénients des différentes plateformes d'acquisition.⁴

	Satellite	Avion	Aéronef sans pilote
Mise en place	---	++	+++
Opérations	--	++	+++
Imagerie	-	++	+++
Fréquence	+	++	+++
Superficie couverte	++	+ / -	+ / -
Charge utile	+++	++	+ / -
Réglementation	++	+ / -	+ / -

⁴ --- : Inconvénients importants, -- : Quelques inconvénients, - : Inconvénients faibles, +/- : Plus ou moins avantageux, + : Assez avantageux, ++ : Avantageux, +++ : Très avantageux.

5.4. Limites méthodologiques

Une des premières limites de mise en place de ce projet concerne la réglementation aérienne imposée par Transports Canada. Afin de pouvoir mettre en œuvre une mission de recherche, un certificat d'opérations aériennes spécialisé (COAS) doit être déposé. Il doit être demandé dans le cas où l'aéronef pèse plus de 35 kilogrammes et est utilisé à des fins professionnelles ou académiques, comme la photographie aérienne, les levés géomatiques, l'observation des cultures, la publicité, la recherche et le développement. Les délais, qui pouvaient s'étendre de 6 à 12 mois, nécessitaient une préparation anticipée des missions un an à l'avance. Ce délai très important a notamment nuit à l'utilisation de l'ASP lors la première année de ce projet. Les prises de vues dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean ont donc dû être réalisées à l'aide d'un aéronef habité. Depuis, la réglementation a évolué et s'est assouplie, les délais sont de 20 jours ouvrables pour obtenir une permission de vol par ASP et des exemptions sont apparues. Par exemple, si l'ASP pèse moins de 2 kilos, la permission de vol n'est pas nécessaire; il faut satisfaire aux exigences de l'exemption de Transports Canada (avoir reçu une formation nécessaire, connaître les espaces aériens, assurances, etc.) (Transports Canada, 2015). Cette amélioration des conditions de vol n'est malheureusement pas semblable dans tous les pays, notamment aux États-Unis et en France, où la réglementation, plus sévère pour limiter les abus, peut freiner l'utilisation des ASP dans les projets de recherche et d'innovation par exemple. En France notamment, il est nécessaire d'avoir obtenu un brevet aéronautique théorique (formation théorique de télé-pilote professionnel possible) et déposer un manuel d'activité particulière auprès de la direction générale de l'aviation civile.

De plus, tel que vu précédemment, malgré le système de stabilisation de la nacelle, la rotation des pales de l'ASP a transmis des déformations géométriques sur les images même si les dégradations maximales correspondent à 5 pixels soit 20 cm. L'analyse de l'imagerie a également montré que la qualité des images acquises avec un vent arrière durant le vol est supérieure à celle des images capturées avec un vent de travers. La direction des courants éoliens est donc à considérer lors de l'établissement des lignes de vol.

Enfin, la première année du projet, les images infrarouges thermiques n'ont pu être exploitées. La caméra infrarouge thermique utilisée ne générant que des images en niveaux de gris, il aurait donc fallu prendre des mesures de températures au sol. Puisque l'indice de végétation TVDI est basé en partie sur des images de températures en degrés Celsius, celui-ci n'a donc pu être calculé la première

année. Afin de pallier à ce problème, la seconde année, les mesures de températures au sol ont été effectuées. Aujourd'hui, les nouvelles caméras infrarouges thermiques génèrent systématiquement les images de températures émissives en degrés Celsius.

5.5. Perspectives d'applications et recommandations

Ce projet illustre le potentiel de développement de l'utilisation des ASP pour la télédétection agricole et notamment dans l'étude de la pomme de terre. Les bons résultats obtenus permettent de fournir des cartographies précises de quantités de biomasse ou de zones de maladies directement utilisables par les exploitants agricoles. Les dépistages, réalisés à l'aide des cartes zonales, peuvent être concentrés sur les secteurs problématiques afin de réduire le temps d'intervention dans les parcelles. Les agriculteurs pourraient également transférer ces données spatiales dans leur matériel d'épandage afin d'effectuer les actions nécessaires à l'échelle des variations intra-parcellaires. À l'heure d'aujourd'hui, la modulation possible est une gestion des ouvertures et fermetures de tronçons sur la moitié ou l'ensemble de la rampe de pulvérisation. Les avancées techniques ne permettent pas encore une modulation des apports (engrais et produits phytosanitaires) à l'échelle du rang de pommes de terre. Cependant, un fabricant de pulvérisateurs propose un modèle qui ouvre et ferme les buses séparément mais aucune entreprise ne propose un matériel capable de moduler la quantité de produit épandu au niveau de la buse.

Autre facette du projet, la concentration des analyses vers la télédétection hyperspectrale du mildiou (*Phytophthora infestans*) permettrait de détecter, quelques jours avant la perception à l'œil nu, l'arrivée de la maladie afin de permettre à l'agriculteur de réagir promptement. Il n'y a aucune technique de détection précoce du mildiou qui permet cela pour l'instant. De plus, dans une perspective de protection de l'environnement, la réduction des produits phytosanitaires épandus est la clé d'une gestion agricole durable. Cette étape passe par une gestion réactive et précise aux problèmes détectés dans les parcelles. Si l'utilisation de la géomatique peut anticiper le développement d'une maladie ou d'un ravageur, de grandes quantités de produits phytosanitaires pourraient être économisées.

6. Conclusion

L'augmentation du nombre de publications de télédétection en agriculture démontre l'intérêt grandissant du domaine pour l'agriculture de précision (Atzberger, 2013). Depuis une dizaine

d'années, les aéronefs sans pilote apparaissent dans les projets de recherche agricole comme des plateformes d'acquisition d'imagerie de plus en plus utilisées pour la télédétection à basse altitude et à haute résolution.

Les objectifs de ce projet de recherche étaient de montrer que l'estimation de paramètres biophysiques de la pomme de terre pouvait se faire par l'utilisation d'indices de végétation et que la définition de zones de stress était possible avec l'utilisation de capteurs visible proche infrarouge et infrarouge thermique basés sur de l'imagerie acquise à partir d'ASP. Ces objectifs ont été remplis. De plus, même si la différenciation des niveaux de stress n'a pu être effectuée, ce projet a permis de réaliser des cartes zonales de stress permettant d'appuyer les méthodes de dépistages actuelles de la culture de la pomme de terre.

L'objectif général du projet était tourné vers l'applicabilité de l'outil sur le terrain pour appuyer les dépistages. Les traitements effectués ont donc été sélectionnés en fonction de leur facilité et leur rapidité de réalisation. Des outils tels que celui présenté dans ce projet pourraient apporter une plus-value importante aux producteurs, en limitant notamment la quantité d'intrants utilisés par des interventions plus ciblées dans le temps et dans l'espace dans une optique de préservation de l'environnement. De plus, le produit fini délivré à l'agriculteur doit être en concordance avec ses attentes financières. À l'échelle mondiale, l'utilisation des ASP en agriculture pourrait diminuer de 40 % les quantités de produits phytosanitaires épandues tout en augmentant de 15 % les rendements des cultures (*Association for Unmanned Vehicle Systems International, 2014*).

Cependant, une réduction des coûts de production de ces cartes est nécessaire pour permettre une commercialisation par l'industrie. Des recherches supplémentaires permettraient également de caractériser l'intensité des stress et d'intégrer des seuils d'intervention aux cartes de dépistage des cultures de pomme de terre. Cette technologie pourrait également être adaptée à d'autres types de cultures (ex : maraicher, vigne).

7. Références

- Aber J.S., Marzolff 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.
- Bethany A.B. (2014) Remote detection of invasive plants: a review of spectral, textural and phonological approaches. *Biological Invasions*. Vol. 16. 1411-1425.

- Birth G.S. et 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.
- Buschmann C. et Nagel E. (1993) In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 14. 711–722.
- 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.
- Chaerle L. et Van Der Straeten D. (2001) Seeing is believing: Imaging techniques to monitor plant health. *Biochimica and Biophysica Acta. Gene Structure and Expression*. Vol. 1519. 153-166.
- Chiang K.W., Tsai M.L. et Chu C.H. (2012) The development of a UAV borne direct georeferenced photogrammetric platform for ground control point free applications. *Sensors*. Vol. 12. 9161-9180.
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Meron, M., Saranga, Y., et Tsipris, J. (2005) Estimation of leaf water potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*. 56 p.
- Colomina I. et Molina P. (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. Vol. 92. 79-97.
- Comité responsable PHYTO (2009) Guide de bonnes pratiques phytosanitaires en culture de pommes de terre. Louvain-la-Neuve, Belgique. 19 p.
- ConservationDrones (2015) Page d'accueil. <http://www.conservationdrones.org> [Consulté le 03-02-2015].
- Córcoles J.I., Ortega J.F., Hernández D., et Moreno M.A.(2013) Estimation of leaf area index in onion (*Allium Cepa* L.) using an unmanned aerial vehicle. *Biosystems Engineering*. Vol. 115 (1). 31-42.
- Daumard F. (2010) Contribution à la télédétection passive de la fluorescence chlorophyllienne des végétaux. Thèse de doctorat, École polytechnique ParisTech. Paris. 375 p.
- De Montis J-M. (1986) La motorisation agricole. Centre de recherche sur la culture technique. Neuilly-sur-Seine. 100-107.
- Déry P. (2007) Pérenniser l'agriculture. Mémoire pour la Commission sur l'avenir de l'agriculture. Groupe de recherches écologiques de la Batture. 23 p.

- Erickson B., Widmar D. et Holland J. (2013) Precision Agriculture in 2013. *CropLife*. Vol. 173 (6). 10-20.
- Fangi G. et Nardinocchi C. (2013) Photogrammetric processing of spherical panoramas. *The photogrammetric record*. Vol. 28 (143). 293-311.
- Fédération des producteurs de pommes de terre du Québec (2014) Portrait de la production. <http://www.fpptq.qc.ca/portrait.htm> [Consulté le 17-07-2014].
- 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 high-resolution 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.

- 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/press-room/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

- 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) *Environnemental 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 Cépadues. 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., Lunagarla 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.

- 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., Schmutge 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/generale-aviationloisir-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://e-cours.univ-paris1.fr/modules/uvved/envcal/html/vegetation/caracteristique-vegetation/propriete_s.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 cross-pollination 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. (2013a) 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. (2013b) 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.

8. Annexes

Annexe 1 : Moyennes et écarts-type des classes de maladies issues du formulaire de dépistage.

Classe	Nb de sites	NDVI		GNDVI		MSAVI 2		RVI		SAVI		TVDI	
		Moyenne	Écart-type										
Aucune maladie	42	0,81	0,04	0,08	0,34	0,87	0,04	12,41	4,12	1,205	0,06	0,09	0,05
Intensité 1	73	0,81	0,04	0,15	0,33	0,87	0,04	13,45	5,72	1,21	0,06	0,09	0,04
Intensité 2	16	0,73	0,03	0,35	0,00	0,73	0,03	6,69	0,66	1,09	0,04	0,09	0,01
Intensité 3	8	0,72	0,02	0,35	0,00	0,72	0,02	6,43	0,61	1,08	0,03	0,09	0,01

Annexe 2 : Procédé de correction du vignettage avec le logiciel PixelWrench2

Le logiciel PixelWrench2 donne la possibilité de corriger l'effet de vignettage en effectuant les tâches suivantes :

- 1) Photographier une surface neutre uniformément éclairée (un mur blanc, une feuille de carton,...)
- 2) Ouvrir le fichier RAW ou DCM
- 3) Ouvrir l'histogramme
- 4) Sélectionner une petite zone dans un coin de l'image. Noter sa valeur moyenne de luminance.
- 5) Sélectionner une petite zone dans le centre de l'image. Noter sa valeur moyenne de luminance
- 6) Trouver le pourcentage de vignettage = $1 - (\text{valeur du coin} / \text{valeur au centre})$
- 7) La valeur est un entier (ex : 15). L'intégrer dans *Index Tools form / Matrix tab / Vignette Box*
- 8) Enregistrer le fichier PCF pour garder les nouvelles valeurs.

- *Définition de la valeur de correction*

Une image est acquise en photographiant un mur blanc dont l'éclairage est considéré comme homogène. On mesure les valeurs des pixels dans les angles et au centre afin de calculer la valeur du facteur de correction :

Valeurs luminance angles = 32 – 28 – 28 – 32 / Moyenne = 30

Valeur luminance centre = 59

Valeur de correction vignettage = $1 - (30/59) = 1 - 0,49 = 0,51 = 51\%$

La valeur de correction du vignettage appliquée est égale à 51 %. Cette valeur est intégrée comme facteur de vignettage (*Vignette Factor*) :

Index	Matrix	Palette	Canopy	MCA	Batch
	Rf	Gf	Bf	RVS (%)	
	-140	-130	450	72	Make CPF
	428	-55	-225	100	
	-127	325	-127	90	
				Auto Adjust Scaling <input checked="" type="checkbox"/>	130
				Vignette Factor:	51 2
				Pixel One =	<input type="radio"/>  <input checked="" type="radio"/>  DCM

Ce facteur fonctionne comme un filtre de distribution radiale. Le facteur de 51% s'applique à 100% dans les angles puis diminue au fur et à mesure jusqu'au centre.