

Université du Québec
Institut National de la Recherche Scientifique
Centre Eau Terre Environnement

**SUIVI INTRASAISSONNIER DU STATUT AZOTÉ ET ESTIMATION DES
RENDEMENTS DE LA CULTURE DE LA POMME DE TERRE À L'AIDE
DE LA TÉLÉDÉTECTION PROXIMALE HYPERSPECTRALE**

Par
Thomas Morier

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et examineur interne	André St-Hilaire INRS Centre Eau Terre Environnement
Examineur externe	Marie-Christine Bélanger La Financière agricole du Québec
Directeur de recherche	Karem Chokmani INRS Centre Eau Terre Environnement
Codirectrice de recherche	Athyna Cambouris Agriculture et Agroalimentaire Canada

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes codirecteurs de recherche, Karem Chokmani et Athyna Cambouris, pour leur appui tout au long de ce projet de maîtrise. Les nombreux conseils de Karem et Athyna ont été essentiels à l'accomplissement de ce mémoire. Je les remercie également de m'avoir permis de présenter les résultats de mes travaux au 11^e congrès international d'agriculture de précision qui s'est tenu à Indianapolis en 2012 ainsi qu'au congrès conjoint AQSSS-CSSS de 2012.

Je tiens aussi à souligner la contribution de toute l'équipe des Laboratoires de pédologie et d'agriculture de précision d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, et plus particulièrement Mario Deschênes, Yann Renaux, Cédric Bouffard et Sarah-Maude Parent pour leur précieuse aide à la prise des mesures au champ et aux analyses de laboratoire. Merci à la Ferme Roger Cantin et Fils qui a fourni une parcelle de leur champ pour le dispositif expérimental. Merci également aux étudiants du local 1313 et à l'équipe du laboratoire de télédétection de l'INRS.

Je tiens à remercier l'organisme Fonds québécois sur la nature et les technologies pour avoir financé ce projet. J'aimerais terminer en remerciant mes examinateurs, Marie-Christine Bélanger et André St-Hilaire, pour avoir investi du temps dans la révision de ce mémoire.

RÉSUMÉ

La pomme de terre représente une culture d'une importance économique considérable au Québec avec des recettes monétaires à la ferme ayant atteint près de 120 millions de dollars en 2012. L'azote (N) étant considéré comme le pivot de la fertilisation de la pomme de terre, une gestion adéquate des engrais azotés s'avère essentielle afin d'optimiser le rendement en tubercules, la qualité de la production et l'efficacité des engrais azotés. La pratique courante en matière de fertilisation azotée consiste à appliquer une dose uniforme de N même si la disponibilité de N est reconnue comme étant variable et dynamique à l'intérieur d'un même champ agricole. L'absence d'une méthode rapide et économique permettant la caractérisation de la variabilité spatiotemporelle de l'azote est à l'origine de cette pratique.

L'avènement de la télédétection en agriculture de précision a permis d'utiliser la plante comme un indicateur biologique des conditions environnementales prévalant durant la saison de croissance. Les mesures de télédétection permettraient de résoudre une partie de la problématique liée à la caractérisation du statut azoté de la culture de la pomme de terre. Toutefois, les longueurs d'onde optimales pour le suivi intrasaisonnier du stress azoté et des rendements sont inconnues pour le cultivar *Russet Burbank* dans le contexte pédoclimatique québécois. Ce projet présente la télédétection proximale hyperspectrale comme une méthode adaptée pour l'identification des longueurs d'onde et des indices de végétation les plus appropriés à la détection du stress azoté de la pomme de terre.

Pour ce faire, une étude a été réalisée en 2011 et 2012 dans des parcelles expérimentales d'un champ de pommes de terre irriguées à Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (46,84°N, 71,64°W). Cinq doses de N, *i.e.* 0, 60, 120, 200 et 280 kg N ha⁻¹, ont permis d'induire différentes concentrations en N dans la plante. Des mesures de réflectance hyperspectrale ont été acquises au cours des deux saisons de croissance. L'analyse de la variance des indices de végétation hyperspectraux (IVH) a permis d'identifier ceux discriminant le mieux les différents statuts azotés de la culture de la pomme de terre, et ce sur une base temporelle à différents stades de croissance.

Les IVH utilisant la réflectance dans la région spectrale du *red edge* se sont avérés les plus performants dans l'évaluation du statut azoté de la culture et du rendement en tubercules. Cette étude a démontré qu'à partir d'environ 50 jours après la plantation, il serait possible de recourir à la télédétection proximale hyperspectrale pour un suivi rigoureux du statut azoté de la culture de la pomme de terre.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	III
RÉSUMÉ.....	V
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
PARTIE 1 : SYNTHÈSE	1
1 INTRODUCTION	3
1.1 CONTEXTE.....	3
1.2 PROBLEMATIQUE.....	4
1.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE.....	5
2 REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 L'AZOTE DANS L'AGROECOSYSTEME.....	7
2.1.1 <i>Besoins en azote de la culture de la pomme de terre</i>	8
2.1.2 <i>Effet de l'azote sur le rendement en tubercules</i>	10
2.2 L'INDICE DE NUTRITION AZOTEE.....	12
2.3 LA TELEDETECTION.....	16
2.3.1 <i>Théorie</i>	16
2.3.2 <i>Signature spectrale de la pomme de terre</i>	20
2.3.3 <i>Indices de végétation</i>	23
3 MATÉRIEL ET MÉTHODES	27
3.1 SITE D'ETUDE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	27
3.2 MESURES DE L'INDICE DE NUTRITION AZOTEE ET DU RENDEMENT EN TUBERCULES.....	30
3.3 DONNEES DE REFLECTANCE HYPERSPECTRALE.....	30
3.4 ANALYSES STATISTIQUES.....	31
4 RÉSULTATS ET DISCUSSION	33
4.1 SUIVI INTRASAISSONNIER DU STATUT AZOTE A L'AIDE DE L'INDICE DE NUTRITION AZOTEE.....	33
4.2 SUIVI INTRASAISSONNIER DU STATUT AZOTE A L'AIDE DES INDICES DE VEGETATION HYPERSPECTRAUX.....	35
4.3 ESTIMATION DU RENDEMENT TOTAL EN TUBERCULES A L'AIDE DE L'INDICE DE VEGETATION HYPERSPECTRAL LE PLUS APPROPRIE.....	40
5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	41

PARTIE 2 : ARTICLE	43
AVANT-PROPOS	45
RÉSUMÉ	47
ABSTRACT.....	49
IN-SEASON NITROGEN STATUS ASSESSMENT AND YIELD ESTIMATION USING HYPER SPECTRAL VEGETATION INDICES IN A POTATO CROP	51
1 INTRODUCTION.....	53
2 MATERIALS AND METHODS	57
2.1 STUDY AREA AND EXPERIMENTAL DESIGN.....	57
2.2 NITROGEN NUTRITION INDEX AND TOTAL TUBER YIELD MEASUREMENTS.....	58
2.3 HYPER SPECTRAL DATA COLLECTION.....	59
2.4 HYPER SPECTRAL VEGETATION INDICES	61
2.5 STATISTICAL ANALYSIS	65
3 RESULTS AND DISCUSSION	67
3.1 INTRASEASONAL MONITORING OF CROP NITROGEN STATUS USING THE NITROGEN NUTRITION INDEX	67
3.2 TOTAL TUBER YIELD	69
3.3 INTRASEASONAL CROP NITROGEN STATUS ASSESSMENT USING HYPER SPECTRAL DATA.....	71
3.3.1 <i>Hyperspectral Signatures</i>	71
3.3.2 <i>Selection of the Most Appropriate Hyperspectral Vegetation Indices for Crop Nitrogen Status Assessment in 2011 and 2012</i>	74
3.3.3 <i>Sensitivity of Selected Hyperspectral Vegetation Indices to Intraseasonal Crop Nitrogen Status..</i>	76
3.3.4 <i>Optimization of the $CI1_{red-edge}$ to Assess Early-Stage Crop Nitrogen Status Using the HTBVI ...</i>	81
3.4 YIELD ESTIMATION USING THE MOST APPROPRIATE HYPER SPECTRAL VEGETATION INDEX	83
4 CONCLUSIONS.....	85
5 ACKNOWLEDGMENTS	87
RÉFÉRENCES.....	89
ANNEXE A : DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES QUOTIDIENNES.....	97
ANNEXE B : ÉVOLUTION INTRASAISSONNIÈRE DES INDICES DE VÉGÉTATION HYPER SPECTRAUX UTILISANT LE CHAMP DE VISÉE 25° EN 2011 ET 2012.....	105
ANNEXE C : MATRICES DE COEFFICIENTS DE DÉTERMINATION (R^2) POUR LES RELATIONS LINÉAIRES ENTRE LE HTBVI ET L'INDICE DE NUTRITION AZOTÉE À DIFFÉRENTES DATES EN 2011 ET 2012.....	113

LISTE DES TABLEAUX

PARTIE 1 : SYNTHÈSE

TABLEAU 1	RESUME DES PROCEDURES ET CONDITIONS EXPERIMENTALES.	28
TABLEAU 2	TEMPERATURES ET PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES DE LA NORMALE DE 30 ANS (1981-2010) ET AU COURS DE LA SAISON DE CROISSANCE 2011 ET 2012.	29
TABLEAU 3	INDICES DE VEGETATION HYPERSPECTRAUX SELECTIONNES POUR LE SUIVI INTRASAISSONNIER DU STATUT AZOTE.	35
TABLEAU 4	ANALYSE DE LA VARIANCE DES EFFETS DE LA DOSE DE FERTILISANT AZOTE, DU CHAMP DE VISEE ET DE LA DATE DE MESURE SUR LA REPONSE DES INDICES DE VEGETATION HYPERSPECTRAUX SELECTIONNES EN 2011 ET 2012.	37
TABLEAU 5	COMBINAISONS DE LONGUEURS D'ONDE ET DE CHAMP DE VISEE MAXIMISANT LE COEFFICIENT DE DETERMINATION ENTRE LE HTBVI ET L'INDICE DE NUTRITION AZOTEE A DIFFERENTES DATES DE MESURE EN 2011 ET 2012.	39

PARTIE 2 : ARTICLE

TABLE 1	MONTHLY NORMAL TEMPERATURE AND RAINFALL OBTAINED FROM AN ENVIRONMENT CANADA WEATHER STATION AND MONTHLY AIR TEMPERATURE AND RAINFALL DURING THE 2011 AND 2012 GROWING SEASONS OBTAINED FROM AN ON-SITE WEATHER STATION.	57
TABLE 2	LIST OF HYPERSPECTRAL VEGETATION INDICES USED IN THE STUDY.	62
TABLE 3	MEAN VALUES AND LEAST SIGNIFICANT DIFFERENCES (LSD) FOR EFFECT OF FERTILIZER N RATE ON N NUTRITION INDEX (BÉLANGER <i>ET AL.</i> , 2001) OF THE POTATO CROP MEASURED ON DIFFERENT SAMPLING DATES IN 2011 AND 2012.	67
TABLE 4	MEAN VALUES AND LEAST SIGNIFICANT DIFFERENCES (LSD) FOR EFFECT OF N FERTILIZATION ON MARKETABLE TUBER YIELD AND ABOVE GROUND BIOMASS AT CANOPY CLOSURE IN 2011 AND 2012.	70
TABLE 5	SPEARMAN CORRELATION COEFFICIENTS BETWEEN THE N NUTRITION INDEX (NNI) AND HYPERSPECTRAL VEGETATION INDICES AS WELL AS BETWEEN TUBER TOTAL YIELD AND HYPERSPECTRAL VEGETATION INDICES REGARDLESS OF YEAR MEASUREMENT AND FIELD OF VIEW.	75
TABLE 6	MEANS AND LEAST SIGNIFICANT DIFFERENCES (LSD) FOR EFFECT OF N FERTILIZATION ON HYPERSPECTRAL VEGETATION INDICES USING THE 7.5° AND 25° FIELDS OF VIEW AT 40, 48, 55, 61, 66, 70, 76, AND 84 D AFTER PLANTING IN 2011.	78
TABLE 7	MEANS AND LEAST SIGNIFICANT DIFFERENCES (LSD) FOR EFFECT OF N FERTILIZATION ON HYPERSPECTRAL VEGETATION INDICES USING THE 7.5° AND 25° FIELDS OF VIEW AT 37, 54, AND 68 D AFTER PLANTING IN 2012.	79
TABLE 8	MEANS AND LEAST SIGNIFICANT DIFFERENCES (LSD) FOR EFFECT OF N FERTILIZATION ON THE OPTIMIZED C11 _{RED EDGE} AT 40 D AFTER PLANTING IN 2011.	83

LISTE DES FIGURES

PARTIE 1 : SYNTHÈSE

FIGURE 1	HISTORIQUE DES PRIX DE L'UREE (\$ US/T) AU COURS DES 25 DERNIERES ANNEES (WORLD BANK, 2013).....	4
FIGURE 2	CYCLE DE L'AZOTE (TIRE DE MOROT-GAUDRY, 1997).....	7
FIGURE 3	STADES DE CROISSANCE DES PLANTS DE POMME DE TERRE (MODIFIE DE MILLER <i>ET AL.</i> , 2008).....	9
FIGURE 4	PRELEVEMENT CUMULATIF EN AZOTE PAR LES PLANTS DE POMME DE TERRE <i>RUSSET BURBANK</i> (MODIFIE DE STARK <i>ET AL.</i> , 2008).....	10
FIGURE 5	CONCEPT GENERAL DE LA CONCENTRATION CRITIQUE EN AZOTE (MODIFIE DE ZIADI <i>ET AL.</i> , 2012)...	13
FIGURE 6	CONCENTRATION EN AZOTE EN FONCTION DE LA BIOMASSE TOTALE (W) DE DEUX CULTIVARS DE POMME DE TERRE SOUS IRRIGATION. LES POINTS DE DONNEES CORRESPONDENT A LA BIOMASSE TOTALE MAXIMALE DE CHAQUE SITE ET CULTIVAR (MODIFIE DE BELANGER <i>ET AL.</i> , 2001).....	14
FIGURE 7	RELATION ENTRE LE RENDEMENT RELATIF ET L'INDICE DE NUTRITION AZOTEE DE DEUX CULTIVARS DE POMME DE TERRE (R : <i>RUSSET BURBANK</i> ; S : <i>SHEPODY</i>) AVEC IRRIGATION (I) ET SANS IRRIGATION (NI) (MODIFIE DE BELANGER <i>ET AL.</i> , 2001).....	15
FIGURE 8	LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE (TIRE DE LAGUNAGE.EU, 2013).....	17
FIGURE 9	CARACTERISTIQUES SPECTRALES TYPIQUES DE LA VEGETATION ET DU SOL NU POUR L'INTERVALLE DE LONGUEURS D'ONDE DE 400 A 1000 NM (MODIFIE DE JENSEN, 2007).....	19
FIGURE 10	SIGNATURE SPECTRALE DE LA POMME DE TERRE (CULTIVAR <i>BINTJE</i>) A UN INDICE DE SURFACE FOLIAIRE MAXIMAL (ISF = 5,34) AINSI QUE LA POSITION DU <i>RED EDGE</i> (λ_{REP}) (MODIFIE DE JONGSCHAAP <i>ET AL.</i> , 2004).....	20
FIGURE 11	SIGNATURES SPECTRALES DE LA POMME DE TERRE (CULTIVAR <i>K. CHANDRAMUKHI</i>) SOUMISE A DIFFERENTES DOSES D'APPLICATION D'AZOTE A : (A) 40 JOURS ET (B) 65 JOURS APRES LA PLANTATION (MODIFIE DE JAIN <i>ET AL.</i> , 2007).....	22
FIGURE 12	SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL EN BLOCS COMPLETS ALEATOIRES UTILISE EN 2012.....	27
FIGURE 13	ÉVOLUTION INTRASAISSONNIERE DE L'INDICE DE NUTRITION AZOTEE EN (A) 2011 ET (B) 2012. LES LIGNES POINTILLEES DELIMITENT LE SEUIL DE SUFFISANCE DU STATUT AZOTE DE LA CULTURE. LES FLECHES INDIQUENT LE MOMENT DE L'APPLICATION DU 2 ^E FRACTIONNEMENT DES ENGRAIS AZOTES.....	34

PARTIE 2 : ARTICLE

FIG. 1	IN-FIELD SET-UP FOR HYPERSPECTRAL PROXIMAL SENSING OF THE POTATO CROP	60
FIG. 2	RESPONSE OF TOTAL TUBER YIELD TO N FERTILIZATION AS DETERMINED BY A QUADRATIC PLATEAU MODEL IN 2011 AND 2012.....	71
FIG. 3	HYPERSPECTRAL SIGNATURE OF A POTATO CROP MEASURED USING THE 25° FIELD OF VIEW UNDER FIVE N RATES (0, 60, 120, 200, AND 280 KG N HA ⁻¹) IN 2011 AT (A) 40, (B) 55, (C) 70, AND (D) 84 D AFTER PLANTING.....	72

FIG. 4 INTRASEASONAL EVOLUTION OF MEAN $C11_{\text{RED-EDGE}}$ VALUES FOR THE 25° FIELD OF VIEW ONLY IN
 (A) 2011 AND (B) 2012. THE ARROWS INDICATES THE YEARLY TIMING (I.E., AT HILLING) OF THE SECOND IN-
 SEASON N FERTILIZER APPLICATION..... 80

FIG. 5 CONTOUR MAP OF THE HYPERSPECTRAL TWO-BAND VEGETATION INDEX (HTBVI) COEFFICIENTS OF
 DETERMINATION (R^2) FOR THE 7.5° (ABOVE DIAGONAL) AND 25° (BELOW DIAGONAL) FIELDS OF VIEW IN 2011
 AT 40 D AFTER PLANTING. THE CONTOUR MAP SHOWS THE COEFFICIENTS OF DETERMINATION FOR THE
 LINEAR RELATIONSHIP BETWEEN THE N NUTRITION INDEX AND EACH WAVELENGTH COMBINATION FORMING
 THE HTBVI. THE ARROWS INDICATE THE SPECTRAL REGIONS WITH THE HIGHEST COEFFICIENTS OF
 DETERMINATION..... 82

PARTIE 1 : SYNTHÈSE

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

La superficie cultivée en pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) au Québec a atteint 17 000 ha en 2012, totalisant une production annuelle de 499 000 t (ISQ, 2012). Les recettes monétaires générées à la ferme se chiffraient à 118,6 millions \$ lors de la même année de production (ISQ, 2012). Une bonne gestion de l'azote (N) s'impose afin d'assurer le succès de cette production d'une grande importance économique (Zebarth *et al.*, 2007). Après le stress hydrique, l'azote est reconnu comme l'élément nutritif le plus limitant à la croissance de la pomme de terre (Errebhi *et al.*, 1998, Lemaire *et al.*, 1997). Une fertilisation adéquate en N s'avère alors cruciale afin d'optimiser le rendement en tubercules et la qualité de la production. Les doses de N recommandées au Québec varient de 125 à 175 kg N ha⁻¹ selon le cultivar utilisé et le type de sol (CRAAQ, 2010). Cependant, le coefficient de recouvrement des engrais azotés appliqués à la pomme de terre est inférieur à 50 % (Cambouris *et al.*, 2008, Tran *et al.*, 1991). Cette faible efficacité de la culture à prélever l'azote minéral du sol s'explique par divers facteurs intrinsèques à la pomme de terre, dont un système racinaire superficiel et peu développé, une sensibilité au stress hydrique et des sols de texture sableuse généralement bien drainés.

Bien que l'usage des engrais azotés soit essentiel afin d'assurer un rendement maximal, une gestion inappropriée de cet intrant peut entraîner des effets négatifs sur l'environnement. Dans un contexte climatique humide, le lessivage des nitrates représente un problème environnemental majeur, surtout en sols sableux (Errebhi *et al.*, 1998, Munoz *et al.*, 2005). Au Québec, des concentrations élevées en nitrates ont été recensées dans l'eau souterraine des secteurs de production intensive de la pomme de terre (Giroux, 2003, Giroux, 2011). En fait, près de la moitié des puits situés dans les régions productrices de pommes de terre démontrent des concentrations en nitrates supérieures à la norme pour l'eau potable du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), soit 10 mg/L de N-NO₃⁻ (Giroux, 2011). D'autre

part, le producteur agricole doit, depuis quelques années, s'adapter à la flambée du prix des fertilisants azotés. Un prix record de l'urée, l'une des formes de fertilisant azoté disponible commercialement, a d'ailleurs été atteint en 2009 et une tendance à la hausse du prix de cet intrant est observée depuis le début des années 2000 (Figure 1).

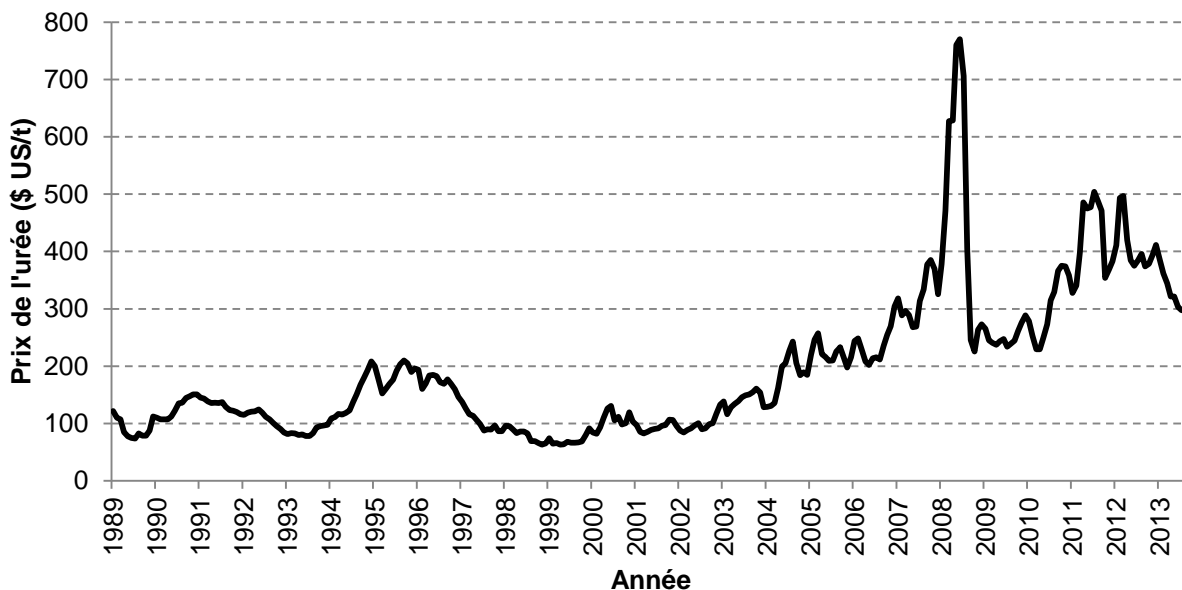


Figure 1 Historique des prix de l'urée (\$ US/t) au cours des 25 dernières années (World Bank, 2013).

Un des grands enjeux auquel font face les producteurs agricoles québécois consiste donc à gérer la production de la pomme de terre de façon à minimiser les pertes environnementales de N tout en maintenant leurs objectifs de rendement et de qualité. Il devient alors nécessaire, autant d'un point de vue environnemental qu'économique, d'assurer une gestion optimale des fertilisants azotés dans la culture de la pomme de terre (Zebarth *et al.*, 2009).

1.2 Problématique

La pratique agronomique privilégiée consiste à fractionner les applications de fertilisants azotés de manière à mieux synchroniser les apports avec les besoins de la culture (CPVQ, 2000, Vos *et al.*, 2000). L'augmentation de l'efficacité des engrais azotés nécessite l'application de la bonne dose, au bon moment et au bon endroit. Malgré le

fait que la disponibilité de N soit très variable et dynamique à l'intérieur d'un même champ agricole et d'une même saison (Cambouris *et al.*, 2008, Goffart *et al.*, 2008), la pratique courante se limite à l'application d'une dose uniforme de N, généralement fractionnée en deux apports. Cette pratique est principalement dictée par les coûts élevés liés à la caractérisation de la variabilité spatiale et temporelle des besoins de la culture en N. Une partie de cette problématique pourrait être résolue en utilisant des mesures de télédétection afin de déterminer le statut azoté de la culture à différents stades de croissance. Dans le contexte pédoclimatique québécois de la production de la pomme de terre (cultivar *Russet Burbank*) sous irrigation, les bandes spectrales formant les indices de végétation spécifiques à l'évaluation du statut azoté et des rendements de la culture sont inconnues a priori. De plus, l'effet du champ de visée sur la capacité des indices de végétation à discriminer hâtivement le statut azoté est peu documenté. Par conséquent, la télédétection proximale hyperspectrale est proposée comme un outil prometteur pour le suivi intrasaisonnier du statut azoté de la pomme de terre.

1.3 Objectifs de la recherche

L'objectif général de ce mémoire était d'étudier le potentiel de la télédétection proximale hyperspectrale comme outil de suivi intrasaisonnier du statut azoté de la pomme de terre (cultivar *Russet Burbank*) et accessoirement comme indicateur des rendements potentiels de cette culture. Ceci impliquait de répondre aux quatre objectifs spécifiques suivants :

1. Identifier les indices de végétation hyperspectraux (IVH) qui discriminent le mieux le statut azoté de la culture de la pomme de terre (cultivar *Russet Burbank*).
2. Étudier l'impact du champ de visée (CDV) sur la capacité des IVH à détecter hâtivement le stress azoté de la culture de la pomme de terre.
3. Comparer la sensibilité des IVH les plus performants avec une méthode de référence destructive (*i.e.* l'indice de nutrition azoté).
4. Évaluer la performance des IVH à estimer le rendement en tubercules.

2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.1 L'azote dans l'agroécosystème

L'azote est un élément essentiel à la croissance des plantes (Errebhi *et al.*, 1998, Vos *et al.*, 2000). Il est un constituant des acides aminés, enzymes, protéines, pigments de la chlorophylle et autres molécules impliquées dans les processus biochimiques du développement des végétaux photosynthétiques (Morot-Gaudry, 1997, Vos *et al.*, 2000).

Les plantes absorbent l'azote sous forme ionique minérale, soit les ions nitrate (NO_3^-) et ammonium (NH_4^+), à partir de la solution du sol (Vos *et al.*, 2000). Toutefois, le sol renferme principalement l'azote sous forme organique : seulement à 1 à 3 % de l'azote se retrouve sous forme minérale. Cette quantité importante de N organique nécessite d'être minéralisée par l'activité microbienne du sol avant d'être assimilable par la plante (Morot-Gaudry, 1997). Les transformations de minéralisation et d'immobilisation (organisation) interagissent continuellement dans le sol (Shepherd *et al.*, 2000) et font partie intégrante du cycle de l'azote (Figure 2).

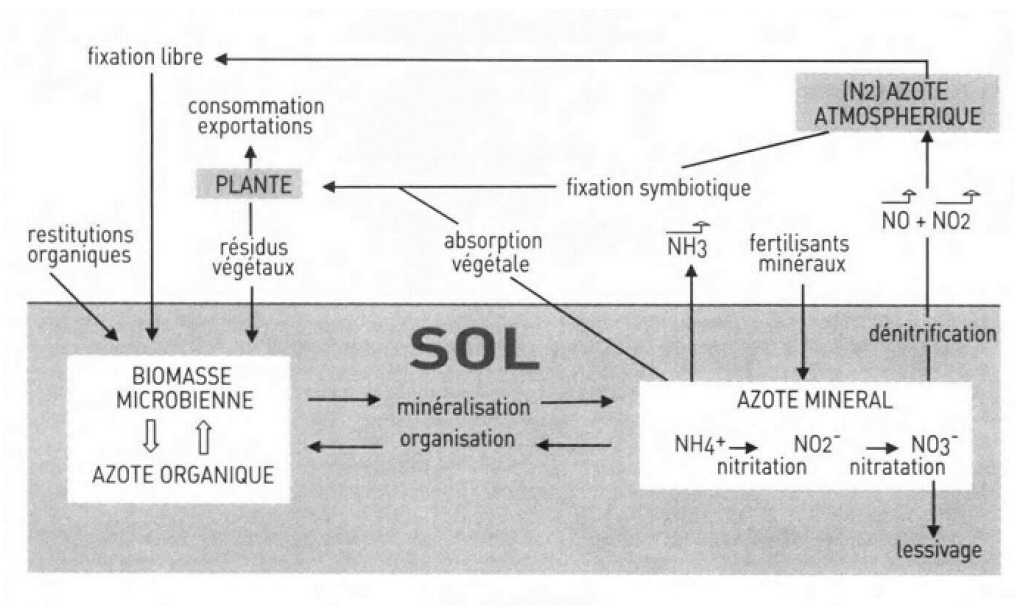


Figure 2 Cycle de l'azote (tiré de Morot-Gaudry, 1997).

Les plantes prélèvent préférentiellement l'azote sous forme de nitrates (Shepherd *et al.*, 2000). Les nitrates, hautement mobiles, ne sont pas retenus par les particules de sol chargées négativement, rendant cette forme de N particulièrement sujette aux pertes par lessivage (Morot-Gaudry, 1997, Shepherd *et al.*, 2000). Une fois absorbés par la plante, les nitrates sont réduits en ammonium et s'incorporent dans divers composés organiques telles les protéines (Morot-Gaudry, 1997).

La minéralisation de N de la matière organique du sol est tributaire des conditions climatiques, des propriétés physicochimiques du sol et du type de matière organique, ce qui la rend difficilement prévisible (Goffart *et al.*, 2008). Cet apport de N a toutefois une influence majeure sur les besoins en fertilisants des cultures agricoles (Shepherd *et al.*, 2000).

2.1.1 Besoins en azote de la culture de la pomme de terre

Au Québec, les doses recommandées de fertilisants azotés varient de 125 à 175 kg N ha⁻¹ (CRAAQ, 2010). Malgré que le fractionnement des applications de N peut limiter le rendement lors de certaines années de production (Porter *et al.*, 1993), le fractionnement en deux applications (*i.e.* l'une à la plantation et l'autre au buttage) représente la pratique courante au Québec étant donné la présence de sols généralement sableux et susceptibles au lessivage (Zebarth *et al.*, 2012). Errebhi *et al.* (1998) rapportent qu'il n'y a pas de consensus sur la meilleure stratégie de fractionnement des applications de N dans la pomme de terre cultivée sous irrigation et dans des sols à texture sableuse. Par contre, l'optimisation de la fertilisation azotée requiert de synchroniser les apports de N avec les besoins de la plante (Westermann *et al.*, 1988, Zebarth *et al.*, 2012). À cet effet, il importe de d'abord définir les cinq stades de croissance de la pomme de terre (Figure 3) :

- I. Le développement des germes ;
- II. La croissance végétative ;
- III. Le début de la tubérisation ;
- IV. Le grossissement du tubercule ;
- V. La maturation du tubercule.

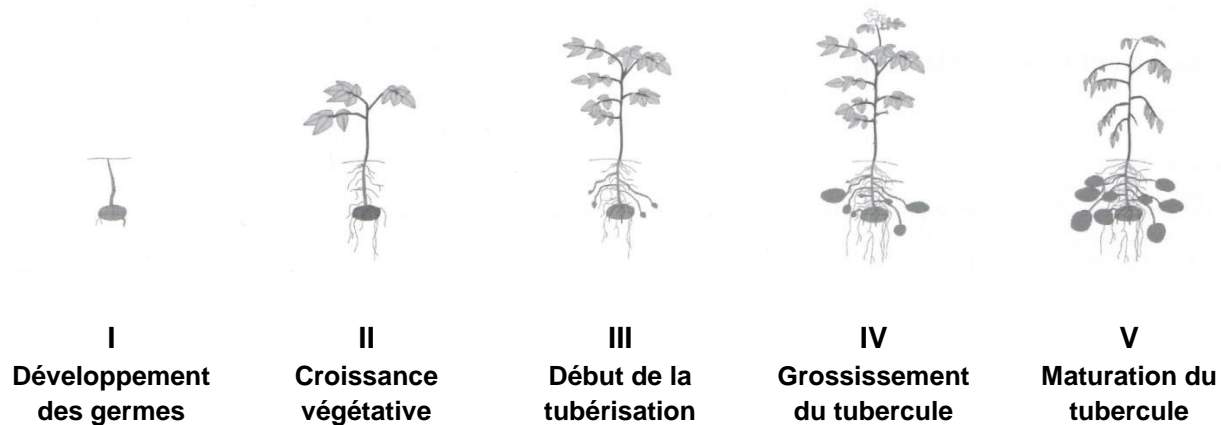


Figure 3 Stades de croissance des plants de pomme de terre (modifié de Miller *et al.*, 2008).

La dynamique de prélèvement de N par la culture de la pomme de terre varie en fonction des stades de croissance (Figure 4). Au stade I, les germes se développent à partir des yeux sur le tubercule mère (Miller *et al.*, 2008). Jusqu'à l'émergence, les besoins en N de la pomme de terre sont très faibles puisque les plants dépendent des réserves du tubercule mère (Chambenoit, 2002, Ewing *et al.*, 1978). Au stade II, les plants de pommes de terre n'ont pas des besoins élevés en N jusqu'à deux à trois semaines après émergence étant donné que le transfert des réserves du tubercule mère se poursuit jusqu'à l'épuisement de celles-ci (Chambenoit, 2002) et que le système racinaire est peu développé (Errebhi *et al.*, 1998). Une fertilisation élevée en N à ce stade favorise une croissance végétative et retarde le début de la tubérisation de sept à dix jours (Kleinkopf *et al.*, 1981). Au stade III, un manque de N cause toutefois une perte de rendement due à une mauvaise tubérisation (Roberts *et al.*, 1982). Au stade IV, un surplus de N provoque une croissance végétative extensive et retarde la maturation du tubercule (Ojala *et al.*, 1990). L'azote étant un élément mobile dans le phloème, une grande proportion de N est transportée vers les tubercules lors de la maturation (Miller *et al.*, 2008, Stark *et al.*, 2008). Il en résulte un patron de distribution de N dans la plante similaire à celui de l'accumulation de matière sèche. La demande en N du tubercule affecte donc cette distribution de N dans la plante (Stark *et al.*, 2008). Ojala *et al.* (1990) rapportent que 30 à 40 % des prélèvements totaux en N ont eu lieu à la fin du stade III. Le taux de prélèvement en N le plus rapide se produit au stade III (de 50 à 70 jours après la plantation) alors que ce taux diminue durant le stade IV (de 70 à

90 jours après la plantation) (Zebarth *et al.*, 2012). Roberts *et al.* (1991) ont trouvé des résultats similaires avec la majorité du prélèvement de N se produisant entre 40 et 100 jours après la plantation pour les cultivars indéterminés tels que *Russet Burbank*. Par conséquent, il est crucial de maintenir une fertilité azotée adéquate à la mi-saison (*i.e.* au stade III). De plus, le potentiel de rendement des cultivars tardifs augmente au fur et à mesure que la durée de la saison de croissance augmente, tant que la plante demeure en santé et que les apports en nutriments sont adéquats (Stark *et al.*, 2008). Il importe de mettre en perspective que les stades de croissance, la disponibilité en N par la minéralisation de la matière organique du sol et les pertes de nitrates par lessivage sont hautement influencés par les conditions climatiques (Zebarth *et al.*, 2012).

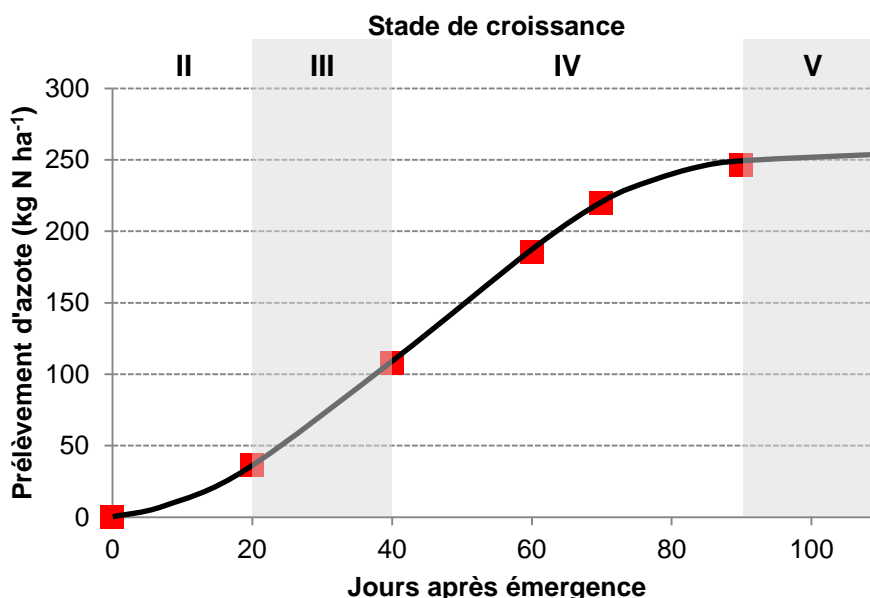


Figure 4 Prélèvement cumulé en azote par les plants de pomme de terre *Russet Burbank* (modifié de Stark *et al.*, 2008).

2.1.2 Effet de l'azote sur le rendement en tubercules

La plupart des études ont démontré un effet positif de la fertilisation azotée sur le rendement total et vendable en tubercules (Zebarth *et al.*, 2007). La dose de N optimale varie toutefois en fonction du site et des conditions climatiques (Bélanger *et al.*, 2000). Bélanger *et al.* (2000) ont trouvé, pour le cultivar *Russet Burbank*, une réponse positive à l'azote sur 11 des 12 sites à l'étude avec un rendement total et vendable de

34,9 t ha⁻¹ et 27,4 t ha⁻¹, respectivement. En plus de la dose d'application, le type de fractionnement de la dose de N appliquée à la culture a un effet sur le rendement vendable. Errebhi *et al.* (1998) ont rapporté qu'une augmentation de la proportion de N appliquée à la plantation pour le cultivar *Russet Burbank* augmentait le rendement des tubercules indésirables, ce qui réduisait le rendement vendable.

En ce qui concerne la production de pomme de terre destinée à la transformation alimentaire (croustilles et frites), la qualité de la récolte présente son lot de défi puisque l'azote peut entraîner à la fois un effet positif comme un effet négatif sur le calibre des tubercules et les paramètres de qualité (Zebarth *et al.*, 2007). D'une part, la fertilisation azotée augmente la proportion des tubercules de gros calibre (Bélanger *et al.*, 2002), ce qui est recherché par le secteur de la pomme de terre de transformation. D'autre part, Lulai *et al.* (1979) ont observé qu'un poids spécifique élevé (*i.e.* environ 1,110) a permis d'augmenter le rendement en croustilles tout en diminuant le contenu en huile. Bélanger *et al.* (2002) ont rapporté une diminution linéaire du poids spécifique avec une augmentation des apports de N alors que Porter *et al.* (1993) ont observé une diminution du poids spécifique avec des doses de N supérieures à 90 kg N ha⁻¹.

2.2 L'indice de nutrition azotée

L'indice de nutrition azotée (INA) est une méthode de diagnostic du statut azoté de la culture basée sur la définition d'une concentration critique en N (N_{critique}), soit la concentration minimale de N requise pour une croissance maximale (Lemaire *et al.*, 1997). La concentration en N de la culture diminue au cours de la saison de croissance due à une augmentation de la proportion des constituants de structure et de réserve à faible teneur en N (Greenwood *et al.*, 1990). Une concentration critique en N mesurée à partir de la plante entière s'avère donc essentielle afin d'évaluer le statut azoté de la culture à différents moments au cours de la saison de croissance, et d'ultimement augmenter l'efficacité des engrais azotés (Bélanger *et al.*, 2001). N_{critique} se définit par la fonction allométrique suivante (Éq. 1) :

$$N_{\text{critique}} = aW^{-b} \quad 1$$

où N_{critique} est la concentration critique en N dans la biomasse aérienne (% de matière sèche (MS)), W est la biomasse aérienne exprimée en t MS ha⁻¹, et a et b sont des paramètres estimés. Le paramètre a représente la concentration en N avec 1 t MS ha⁻¹ et le paramètre b représente le coefficient de dilution de N dans la biomasse (Bélanger *et al.*, 2001). Une fois définie, N_{critique} permet de calculer l'INA, *i.e.* le ratio entre la concentration mesurée en N et la valeur prédite de N_{critique} (Éq. 2).

$$\text{INA} = \frac{N_{\text{mesurée}}}{N_{\text{critique}}} \quad 2$$

L'INA permet de discriminer trois types de statut azoté de la culture (Figure 5) :

1. Une valeur de l'INA < 1 indique que N limite la croissance de la plante et qu'un ajout de fertilisant azoté augmenterait les rendements ;
2. Une valeur de l'INA > 1 indique un niveau de nutrition excessif en N où un ajout de fertilisant azoté n'augmenterait pas la croissance de la culture ;
3. Une valeur de l'INA ≈ 1 correspond à une situation où N ne limite pas la croissance et où la nutrition en N n'est pas excessive.

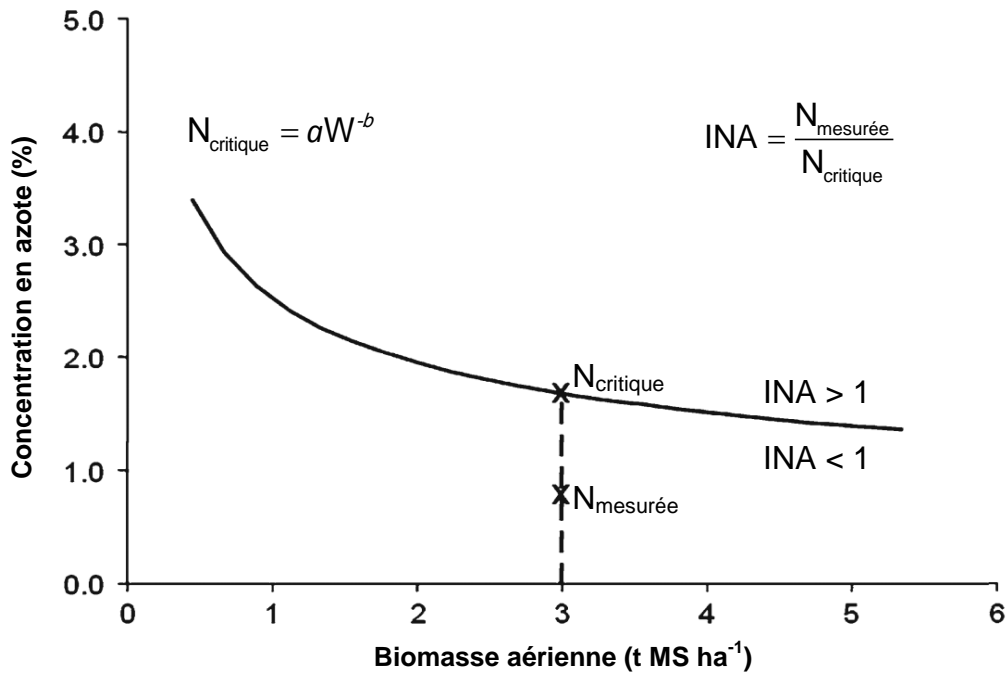


Figure 5 Concept général de la concentration critique en azote (modifié de Ziadi *et al.*, 2012).

Le concept d'une N_{critique} a d'abord été proposé en France pour la fétuque élevée avant que Greenwood *et al.* (1990) et Duchenne *et al.* (1997) l'appliquent à la pomme de terre (Bélanger *et al.*, 2001). Duchenne *et al.* (1997) ont rapporté que la fertilisation azotée a un effet marquant sur la répartition de la matière sèche entre la biomasse aérienne et les tubercules. Par conséquent, l'utilisation d'une N_{critique} basée seulement sur la biomasse aérienne des plants de pommes de terre se limite à la période de croissance précédant le début de la tubérisation. Ces auteurs ont donc développé une courbe de N_{critique} adaptée à la pomme de terre en se basant sur la biomasse totale de la plante. Ainsi, les valeurs des paramètres a et b sont estimées à partir de la biomasse combinée des pousses et des tubercules, et la concentration en N s'obtient à partir de cette biomasse combinée (Ziadi *et al.*, 2012).

Bien qu'aucune différence dans la relation entre la concentration en N et la biomasse n'ait été rapportée entre les cultivars de pomme de terre *Bintje* et *Kaptah Vandel* cultivés en France (Duchenne *et al.*, 1997), les courbes de N_{critique} se sont avérées spécifiques aux cultivars ainsi qu'aux conditions hydriques prévalant dans l'est du Canada (Ziadi *et al.*, 2012). Par conséquent, Bélanger *et al.* (2001) ont déterminé les

paramètres a et b de la courbe de dilution de N_{critique} pour les cultivars *Russet Burbank* et *Shepody* cultivés sous irrigation dans l'est du Canada (Figure 6). Puisqu'il n'y avait pas d'interaction significative entre le rendement et le cultivar, le même coefficient de dilution ($b=0,42$) s'appliquait aux deux cultivars. Cependant, la concentration en N était plus élevée pour *Shepody* que pour *Russet Burbank*, d'où une valeur plus faible du paramètre a pour le cultivar *Russet Burbank*. Le N_{critique} pour le cultivar *Russet Burbank* sous irrigation se définit donc spécifiquement par l'Équation 3 :

$$\text{Russet Burbank } N_{\text{critique}} = 4,57W^{-0,42}$$

3

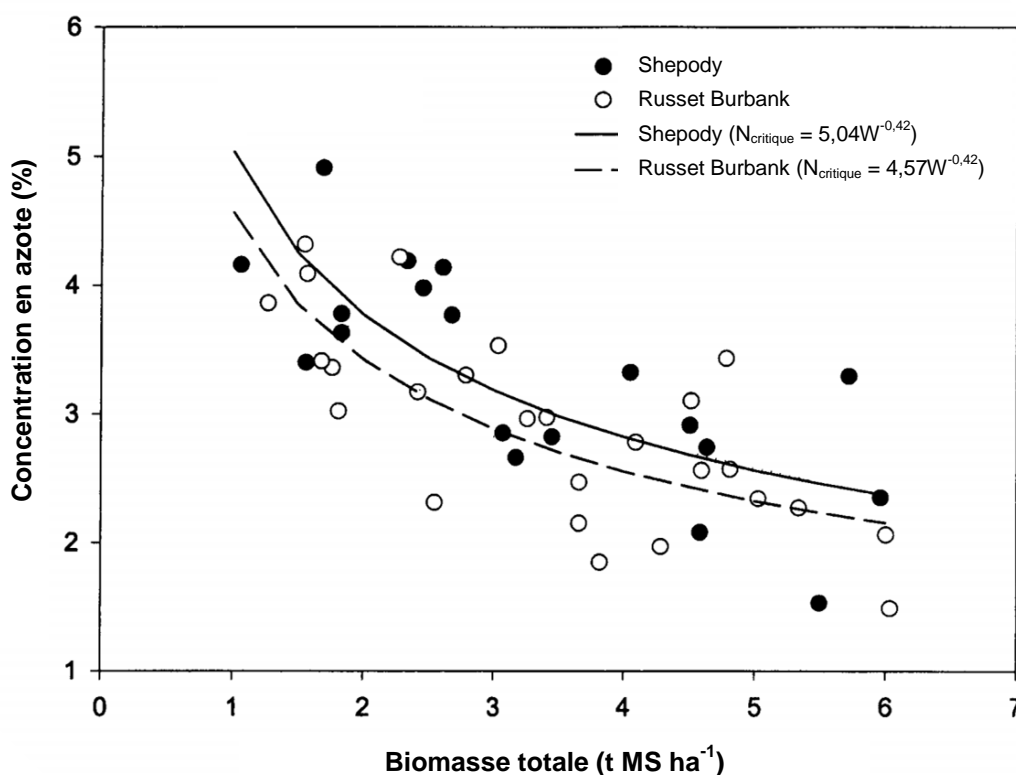


Figure 6 Concentration en azote en fonction de la biomasse totale (W) de deux cultivars de pomme de terre sous irrigation. Les points de données correspondent à la biomasse totale maximale de chaque site et cultivar (modifié de Bélanger *et al.*, 2001).

De plus, Bélanger *et al.* (2001) ont trouvé que la relation quadratique entre le rendement relatif et l'INA expliquait une plus grande variabilité lorsque le cultivar *Russet Burbank* était cultivé avec irrigation ($R^2=0,71$) versus sans irrigation ($R^2=0,65$) (Figure 7). Sous des conditions non limitantes en eau, l'INA a permis d'identifier correctement les

situations de déficience et de suffisance en nutrition azotée de la culture de la pomme de terre, et ce peu importe le cultivar utilisé. D'une part, des valeurs d'INA égales ou supérieures à 1 ont occasionné un rendement relatif près de 1. Ce constat suggère que dans les conditions humides de l'est du Canada, l'utilisation de doses élevées de fertilisants azotés ne provoque pas une diminution marquée des rendements en tubercules (Cambouris *et al.*, 2007). D'autre part, les valeurs d'INA inférieures à 1 se sont traduites par une baisse des rendements relatifs. Les résultats de Bélanger *et al.* (2001) démontrent que l'INA est un indicateur fiable du statut azoté de la pomme de terre tout au long de la saison de croissance et indépendamment du stade de développement.

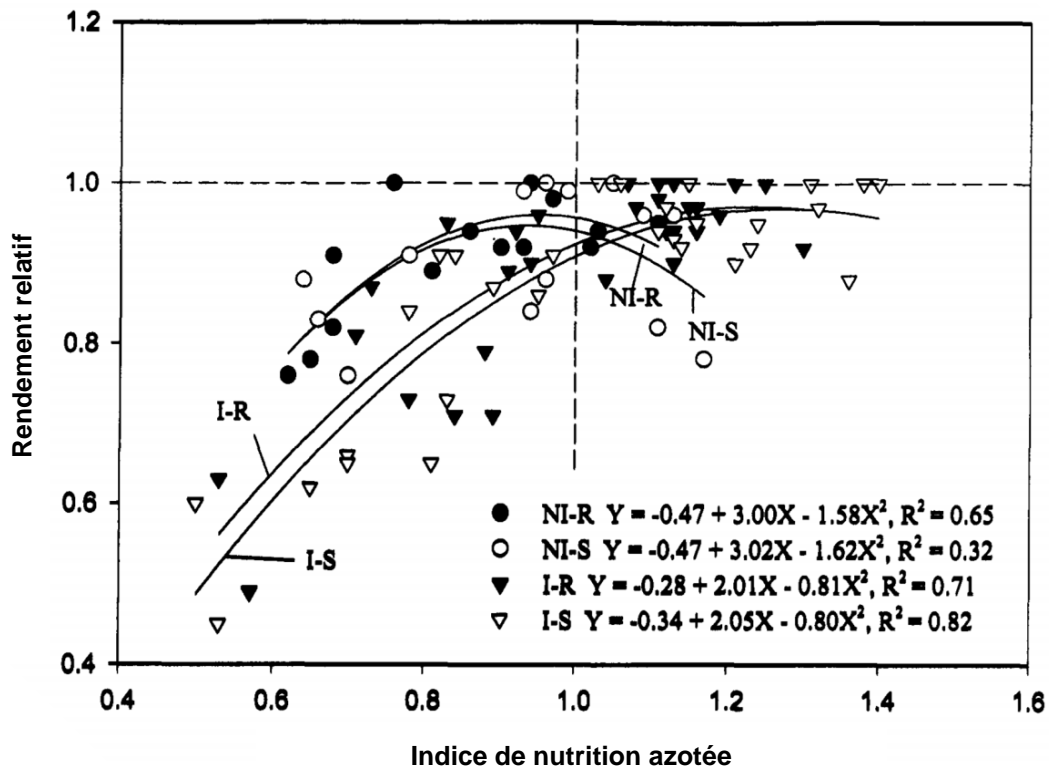


Figure 7 Relation entre le rendement relatif et l'indice de nutrition azotée de deux cultivars de pomme de terre (R : *Russet Burbank* ; S : *Shepody*) avec irrigation (I) et sans irrigation (NI) (modifié de Bélanger *et al.*, 2001).

Malgré que l'INA permet l'évaluation du statut azoté de la culture de la pomme de terre, ce dernier ne fournit pas de recommandations pour des applications additionnelles de N au cours de la saison de croissance (Goffart *et al.*, 2008). De plus, cette méthode

destructive requiert l'échantillonnage de la biomasse totale des plants et l'analyse de la concentration en N en laboratoire, ce qui rend son utilisation coûteuse et peu pratique pour le producteur agricole (Goffart *et al.*, 2008). L'intérêt de la méthode réside plutôt dans son utilisation pour la calibration de méthodes alternatives permettant de déterminer le statut azoté de la culture plus rapidement et plus simplement (Ziadi *et al.*, 2012).

2.3 La télédétection

2.3.1 Théorie

Selon le Centre canadien de télédétection (CCT, 2014) :

« La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. »

La télédétection se base sur l'interaction des surfaces avec le spectre électromagnétique (Figure 8) et se subdivise en plusieurs catégories. La télédétection optique se concentre sur la région du spectre des longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge (IR). Les composantes du spectre visible sont le violet de 400 à 446 nm, le bleu de 446 à 500 nm, le vert de 500 à 578 nm, le jaune de 578 à 592 nm, l'orange de 592 à 620 et le rouge de 620 à 700 nm (CCT, 2014). La télédétection acquiert de l'information spectrale à distance via des capteurs passifs qui dépendent du rayonnement solaire incident comme source d'énergie ou via des capteurs actifs qui produisent leur propre source d'énergie (CCT, 2014). Ces derniers capteurs ont l'avantage de ne pas dépendre des conditions d'éclairage et donc de pouvoir opérer à n'importe quel moment du jour et de l'année (CCT, 2014), ce qui représente un aspect pratique majeur dans l'adoption de la technologie par les producteurs agricoles. À cet effet, des capteurs actifs spécialisés principalement pour les cultures de maïs et de blé (Trimble GreenSeeker, Yara N-SensorTM ALS, etc.) sont disponibles commercialement.

De plus, la résolution spectrale des capteurs varie en fonction de leur capacité à capter des fenêtres étroites de longueurs d'onde (CCT, 2014). Le capteur multispectral acquiert des images dans quelques bandes spectrales plus larges que le capteur hyperspectral qui détecte des centaines de bandes spectrales très étroites dans les régions du spectre électromagnétique du visible et de l'IR (CCT, 2014). La grande résolution spectrale des capteurs hyperspectraux leur confère une capacité accrue de discrimination des caractéristiques d'une surface en fonction de la réponse différente mesurée dans chacune des bandes spectrales. Finalement, la télédétection s'opère à partir de capteurs basés à différentes distances de la cible. Ainsi la télédétection peut se qualifier de proximale, aérienne ou satellitaire (CCT, 2014).

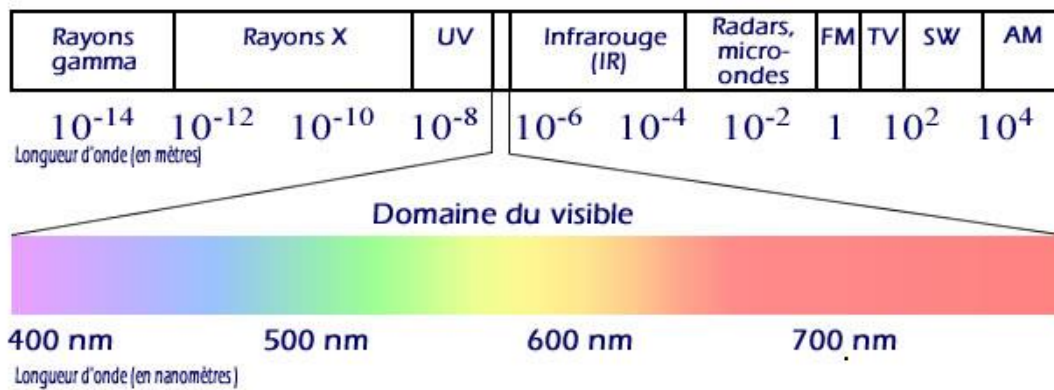


Figure 8 Le spectre électromagnétique (tiré de Lagunage.eu, 2013).

La végétation peut réfléchir, transmettre ou absorber le rayonnement incident (Guyot *et al.*, 1992). Dans un contexte d'agriculture de précision utilisant la télédétection optique, le rayonnement incident interagit simultanément avec la culture et le sol. Les propriétés physiologiques intrinsèques à la végétation permettent d'obtenir une réponse spectrale différente et de distinguer la culture du sol (Figure 9). Dans le domaine du visible, une forte absorption par les chloroplastes du parenchyme palissadique cause de faibles valeurs de réflectance (Gitelson, 2011, Jensen, 2007). Au contraire, les nombreuses réflexions dans la structure interne du mésophylle des feuilles provoquent des valeurs élevées de réflectance dans la région spectrale du proche infrarouge (PIR, 700 à

1300 nm) (Jensen, 2007). La transition abrupte entre le domaine du visible et du PIR, *i.e.* le *red edge*, a largement été étudiée pour le suivi de plusieurs propriétés de la végétation. La région du *red edge* est influencée par l'effet combiné de la forte absorption de la chlorophylle dans les longueurs d'onde du rouge et par la forte réflectance dans les longueurs d'onde du PIR (Jain *et al.*, 2007). La pente de la région du *red edge* représente un indicateur fiable de l'état de santé général des cultures (Jain *et al.*, 2007). En fait, lors d'un stress végétatif ou de la sénescence de fin de saison, la région du *red edge* se déplace vers les longueurs d'onde plus courtes (Chappelle *et al.*, 1991). Finalement, l'infrarouge moyen (1350 à 2700 nm) est reconnu comme étant sensible au contenu en eau dans la plante. Plus le contenu en eau est élevé, plus l'absorption est grande et plus la réflectance est faible (Jensen, 2007).

Le sol, quant à lui, évoque une courbe de réflectance relativement simple avec une augmentation constante des valeurs de réflectance jusqu'à la transition entre PIR et le moyen infrarouge (Ben-Dor, 2011, Price, 1990). Un contenu élevé en eau et en matière organique du sol génère des valeurs de réflectance plus faibles (Daughtry, 2001).

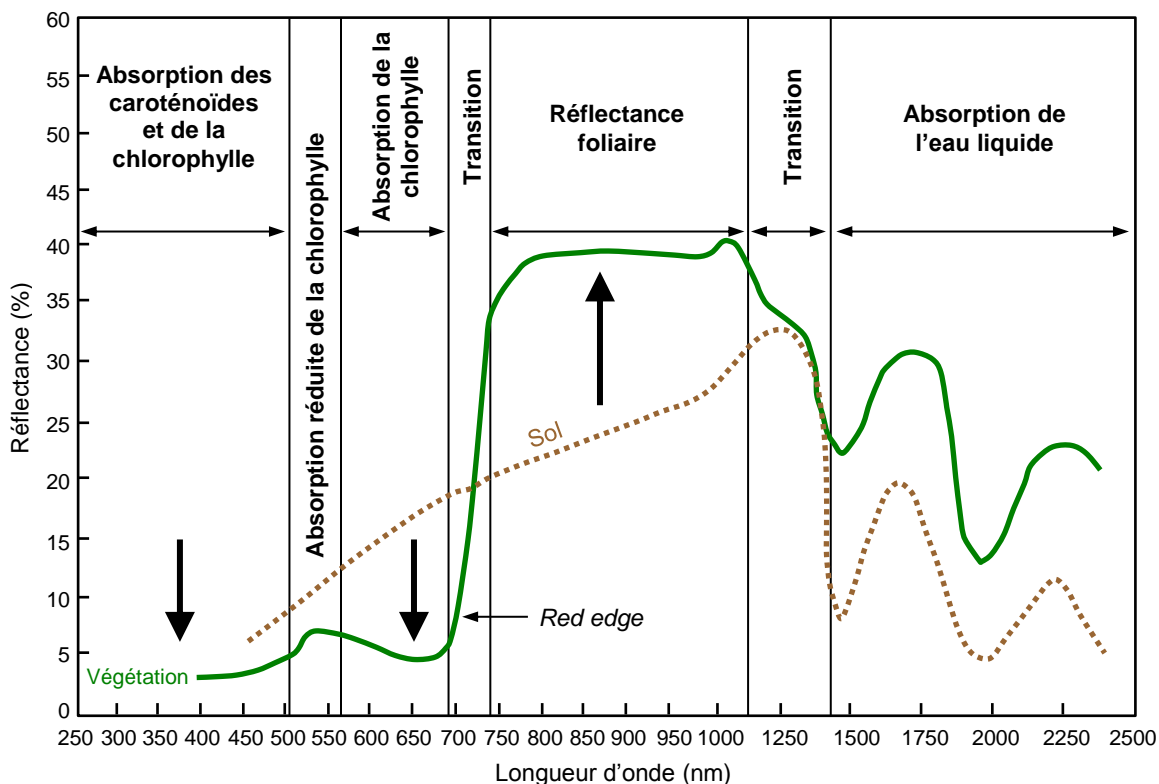


Figure 9 Caractéristiques spectrales typiques de la végétation et du sol nu pour l'intervalle de longueurs d'onde de 400 à 1000 nm (modifié de Jensen, 2007).

Ces notions physiologiques de base doivent être considérées dans le développement d'indices de végétation (IV) servant au suivi intrasaisonnier de propriétés spécifiques de la culture telles que le statut azoté (Jensen, 2007, Roberts *et al.*, 2011).

2.3.2 Signature spectrale de la pomme de terre

Différents capteurs ont été utilisés pour l'étude de la culture de la pomme de terre. Jongschaap *et al.* (2004) ont évalué le statut azoté de deux cultivars de pomme de terre (*i.e.* *Eersteling* et *Bintje*) à l'aide de mesures de réflectance multispectrale issues de l'appareil CropScanTM. L'analyse de la signature spectrale de la culture a permis, entre autres, de définir la longueur d'onde du point d'inflexion de la courbe de réflectance entre le rouge et le proche infrarouge, *i.e.* la position du *red edge* (λ_{rep}) (Figure 10). Dans les situations où la position du *red edge* a pu être estimée avec précision, le contenu en N de la canopée de la culture de la pomme de terre a également pu être estimé correctement (Jongschaap *et al.*, 2004). Ces auteurs ont démontré que la relation exponentielle entre la position du *red edge* et le contenu en N de la canopée de la pomme de terre a permis d'expliquer 82 % de la variabilité du contenu en N de la canopée. De plus, un avantage notable des mesures de réflectance par rapport aux méthodes de diagnostic à l'échelle de la feuille telle que le lecteur de chlorophylle est qu'elles représentent une mesure intégrée du contenu en N sur toute la profondeur de la canopée, ce qui permet d'obtenir directement des valeurs du statut azoté de la culture (Jongschaap *et al.*, 2004).

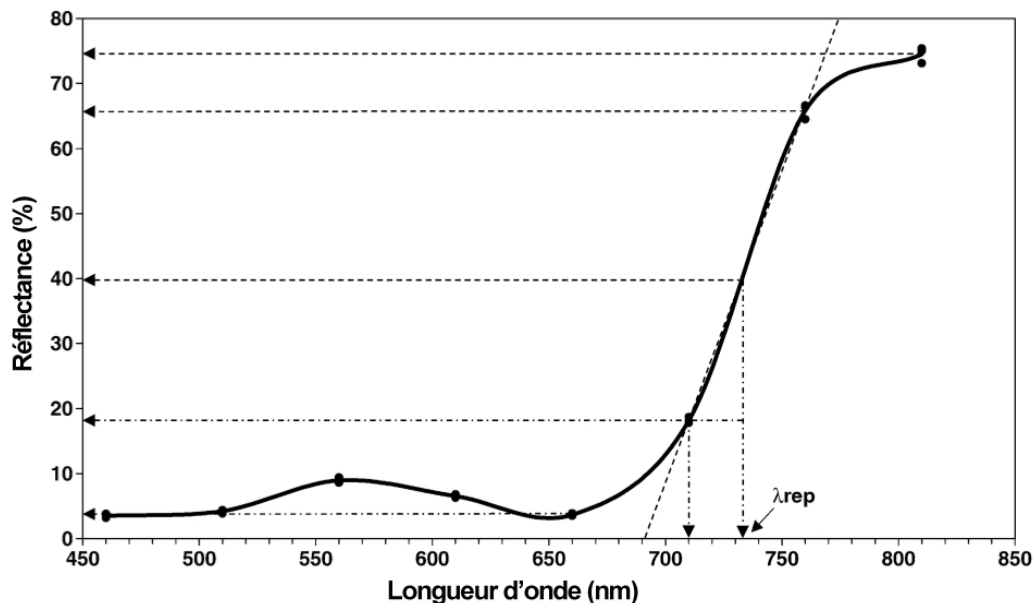


Figure 10 Signature spectrale de la pomme de terre (cultivar *Bintje*) à un indice de surface foliaire maximal (ISF = 5,34) ainsi que la position du *red edge* (λ_{rep}) (modifié de Jongschaap *et al.*, 2004).

Jain *et al.* (2007) ont quant à eux utilisé un capteur hyperspectral pour évaluer l'effet de différentes doses de N sur la réponse spectrale d'une culture de la pomme de terre cultivée en Inde. La Figure 11 illustre les signatures spectrales du cultivar *K. Chandramukhi* soumis à différentes doses d'application de N, et ce à deux dates différentes au cours de la saison de croissance. Ces auteurs ont démontré que la pomme de terre recevant de faibles doses de N réfléchissait moins dans le PIR. À l'inverse, les plants fertilisés à plus de 100 kg N ha⁻¹ affichaient des valeurs de réflectance plus élevées dans le PIR et plus faibles dans le visible (Jain *et al.*, 2007). Cette observation s'explique par le fait qu'une augmentation de l'indice de surface foliaire (ISF) se traduit également par une augmentation de l'absorption par les pigments chlorophylliens et une augmentation de la réflexion par les cellules du mésophylle dans le PIR (Roberts *et al.*, 2011). Cette discrimination des signatures spectrales sous l'effet de différents niveaux de fertilisation azotée était moins prononcée à 65 jours après la plantation (JAP) qu'à 45 JAP (Jain *et al.*, 2007). Ce résultat suggère qu'un cultivar hâtif comme celui utilisé dans cette étude est enclin à manifester un stress azoté relativement tôt en saison. Somme toute, Jain *et al.* (2007) ont mis de l'avant que la dose de N appliquée et que la variabilité temporelle de N conditionnent des réponses spectrales différentes chez la pomme de terre.

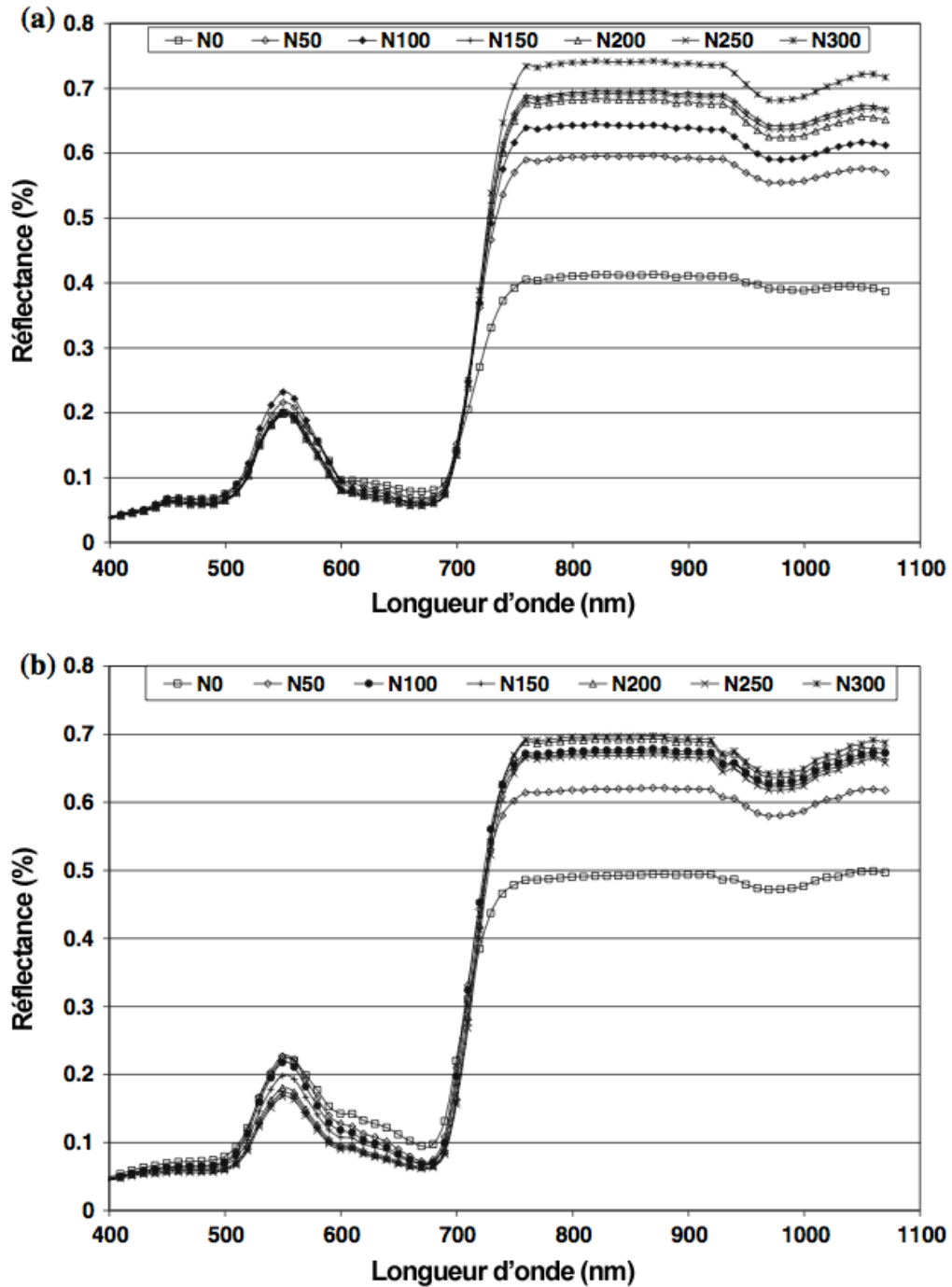


Figure 11 Signatures spectrales de la pomme de terre (cultivar *K. Chandramukhi*) soumise à différentes doses d'application d'azote à : (a) 40 jours et (b) 65 jours après la plantation (modifié de Jain *et al.*, 2007).

2.3.3 Indices de végétation

Les indices de végétation (IV) sont des transformations mathématiques du signal spectral d'origine permettant de réduire les erreurs associées à l'effet de réflexion du sol, de l'illumination solaire et de l'angle de vue du capteur (Jensen, 2007, Liang, 2004). Les IV devraient maximiser la sensibilité à détecter des paramètres biophysiques de la plante, et ce préférablement avec une réponse linéaire afin que la sensibilité se manifeste pour un large éventail de conditions de végétation ainsi que pour faciliter la validation et la calibration de l'indice (Jensen, 2007). Les IV devraient également être liés à des paramètres biophysiques spécifiques et mesurables tels que la biomasse, l'ISF ou le rayonnement absorbé photosynthétiquement actif (Jensen, 2007).

Les IV se calculent à partir des valeurs de réflectance issues des signatures spectrales de la culture. L'IV le plus répandu dans l'étude de la végétation est le *normalized difference vegetation index* (NDVI) (Yao *et al.*, 2011). Le NDVI se calcule à partir de la réflectance dans les longueurs d'onde du PIR et du rouge (Haboudane *et al.*, 2004) :

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{800} - \rho_{670}}{\rho_{800} + \rho_{670}}$$

où ρ_{800} est la réflectance à 800 nm et ρ_{670} la réflectance à 670 nm.

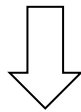
La venue de la télédétection hyperspectrale permet de construire des IV plus raffinés en utilisant d'étroites bandes spectrales et en améliorant les indices pour la correction des effets de réflexion du sol (Yao *et al.*, 2011). Les indices de végétation hyperspectraux (IVH) peuvent être divisés en trois catégories (Roberts *et al.*, 2011) :

1. Structure ;
2. Biochimie ;
3. Stress/physiologie de la plante.

Jain *et al.* (2007) ont étudié la capacité de seize IVH à discriminer les effets de différentes doses de N dans la culture de la pomme de terre. Les IVH les plus performants ont permis d'identifier correctement la culture souffrant d'un stress azoté. Parmi l'ensemble des IVH sélectionnés, les indices utilisant la région spectrale du *red edge* ont mieux détecté les variations causées par les différentes doses de N (Jain *et*

al., 2007). Herrmann *et al.* (2010) ont aussi évalué le statut azoté de la pomme de terre à l'aide des IVH. La particularité de cette étude israélienne réside dans le capteur hyperspectral utilisé. Ce dernier avait la capacité d'acquérir des mesures de réflectance jusque dans la région spectrale de l'infrarouge moyen. Puisque la réflectance à 1510 nm est reconnue comme étant hautement corrélée au contenu en N de la culture indépendamment du stade phénologique (Herrmann *et al.*, 2010), les auteurs ont adapté des IVH existants tel que le MCARI pour créer des indices spécifiques à l'azote. La réflectance de la longueur d'onde du rouge à environ 670 nm a été remplacée par celle dans l'infrarouge moyen à 1510 nm :

$$\text{MCARI} = \left[(\rho_{700} - \rho_{670}) - 0,2(\rho_{700} - \rho_{550}) \right] \left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \right)$$



$$\text{MCARI}_{1510} = \left[(\rho_{700} - \rho_{1510}) - 0,2(\rho_{700} - \rho_{550}) \right] \left(\frac{\rho_{700}}{\rho_{1510}} \right)$$

Les IVH modifiés avec la réflectance à 1510 nm étaient plus sensibles et prédisaient mieux le contenu en N de la pomme de terre que les IVH originaux (Herrmann *et al.*, 2010). Ainsi, les mesures de réflectance réalisées par les différents outils de télédétection proximale hyperspectrale rendent possible le calcul de plusieurs IVH performants dans l'évaluation du statut azoté de la culture de la pomme de terre (Goffart *et al.*, 2008, Herrmann *et al.*, 2010, Jain *et al.*, 2007).

Dans l'est du Canada, l'utilisation d'un capteur actif commercial, le N-Sensor, a permis de caractériser la variabilité spatiale du statut azoté de la culture de la pomme de terre (Zebarth *et al.*, 2003). Il a été suggéré que le N-Sensor pourrait être utilisé pour l'application à taux variable de N en post-levée et ainsi ajuster la dose aux besoins de la culture (Zebarth *et al.*, 2003). Dans le même ordre d'idée, van Evert *et al.* (2012) rapportent que les mesures de réflectance de la canopée d'une culture de pomme de terre cultivée aux Pays-Bas ont permis d'ajuster avec succès la dose de N appliquée en post-levée. Les auteurs ont déterminé qu'un IV, le *weighted difference vegetation index* (WDVI), estimait correctement le prélèvement en N de la pomme terre. Dans cette

étude, les applications à taux variable ont permis de réduire en moyenne 56 et 44 kg N ha⁻¹ à chacun des deux sites, respectivement, et ce tout en maintenant les rendements.

En plus de détecter le stress azoté, les IVH représentent un outil prometteur dans l'estimation du rendement des cultures (Yao *et al.*, 2011). Plusieurs études ont rapporté de bonnes corrélations entre les IV issus des données de télédétection et le rendement des cultures (Groten, 1993, Rasmussen, 1997). La précision de l'estimation des rendements dépend largement du moment d'acquisition des mesures de réflectance (Yao *et al.*, 2011). Dans l'est du Canada, Fortin *et al.* (2011) ont constaté que la variabilité spatiale du rendement en tubercules de la pomme de terre à l'intérieur d'un même champ dépendait principalement des variations de l'ISF. À l'aide de données de réflectance hyperspectrale, Thenkabail *et al.* (2000) ont rapporté qu'un modèle exponentiel utilisant l'IVH formé de la meilleure combinaison de longueurs d'onde a permis d'expliquer 88 % de la variabilité de l'ISF d'une culture de pomme de terre. Peu d'études ont toutefois été répertoriées pour l'estimation des rendements en tubercules à partir des mesures de réflectance hyperspectrale dans les conditions pédoclimatiques du Québec.

3 MATÉRIEL ET MÉTHODES

3.1 Site d'étude et dispositif expérimental

Dans le cadre de cette étude de deux années, un dispositif en blocs complets aléatoires a été instauré en 2011 et 2012 (Figure 12) dans un champ commercial de pomme de terre situé à Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier (article, Chapitre 2). Les traitements consistaient en quatre doses de N variant de 60 à 280 kg N ha⁻¹ en plus d'un contrôle, tous répétés quatre fois et où 40 % de la dose a été appliquée à la plantation et 60% au buttage (Tableau 1). Deux séries de sol, Pont-Rouge et Morin, appartenant au grand groupe de podzol humo-ferrique de la classification canadienne des sols (Soil Classification Working Group, 1998) constituaient le sol de chacun des deux sites à l'étude.

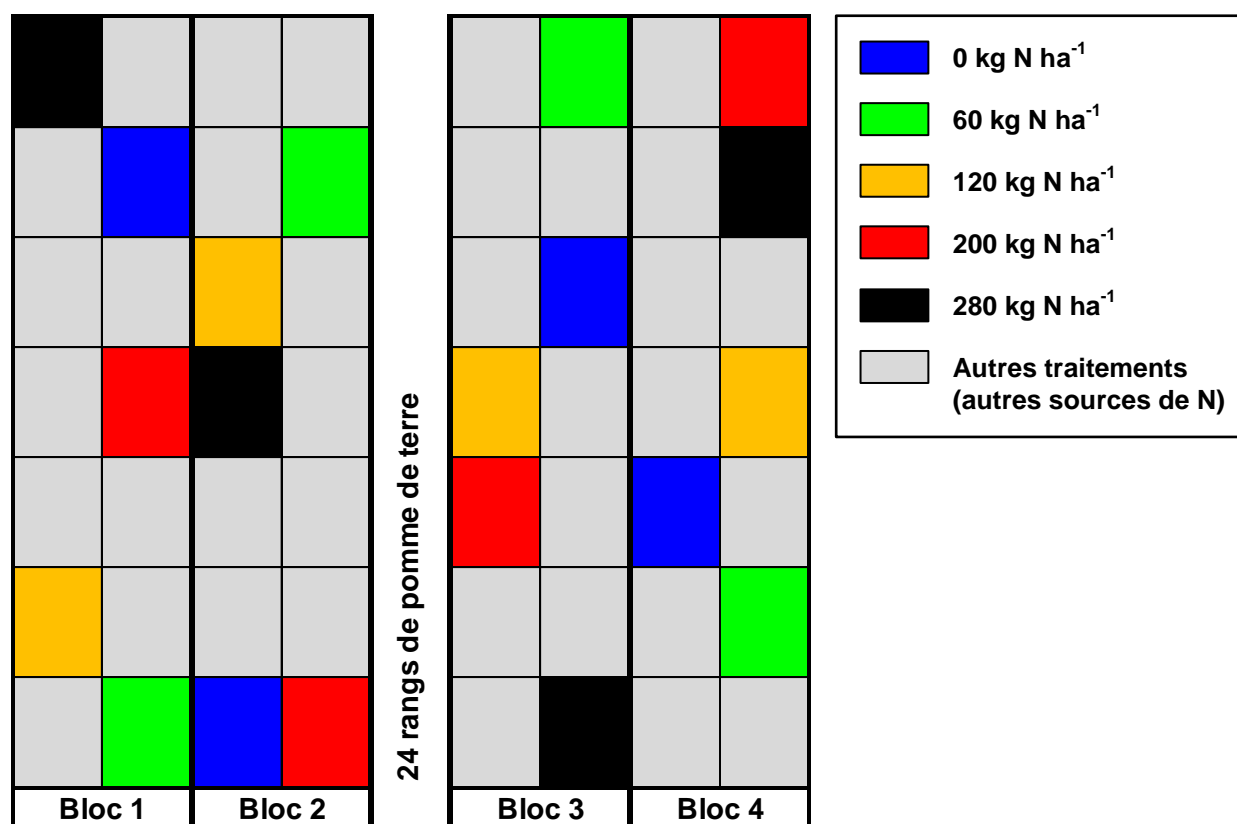


Figure 12 Schéma du dispositif expérimental en blocs complets aléatoires utilisé en 2012.

Tableau 1 Résumé des procédures et conditions expérimentales.

Variables	2011		2012	
Série de sol	Pont-Rouge		Morin	
Classification canadienne du sol ^a	Podzol humo-ferrique		Podzol humo-ferrique	
Analyse de sol (0-20 cm) :				
Matière organique (%)	5,5		4,8	
pH _{eau}	5,3		5,3	
P _{Mehlich-III} (mg kg ⁻¹)	228		233	
K _{Mehlich-III} (mg kg ⁻¹)	85		145	
Ca _{Mehlich-III} (mg kg ⁻¹)	614		725	
Mg _{Mehlich-III} (mg kg ⁻¹)	15		14	
Al _{Mehlich-III} (mg kg ⁻¹)	2125		1925	
Précédent cultural	Avoine		Maïs grain	
Fertilisation				
Avant la plantation :				
K ₂ O à la volée (kg ha ⁻¹)	170		170	
À la plantation :				
N (kg ha ⁻¹)	40 % des doses 0, 60, 120, 200 et 280 selon le dispositif expérimental			
P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	100		120	
K ₂ O (kg ha ⁻¹)	60		60	
Au buttage :				
N (kg ha ⁻¹)	60 % des doses 0, 60, 120, 200 et 280 selon le dispositif expérimental			
Source de N	Sulfate d'ammonium		Sulfate d'ammonium	
Opérations culturales :	Date	JAP	Date	JAP
Plantation	25 mai	0	14 mai	0
Buttage	5 juillet	41	21 juin	38
Récolte	26 sept.	124	24 sept.	133

^a : Soil Classification Working Group (1998).

JAP : Jours après la plantation.

Afin d'établir la caractérisation initiale des propriétés physico-chimiques des sols des sites expérimentaux de la saison 2011 et 2012, des échantillons de sol composites ont été prélevés à l'aide d'une tarière hollandaise en octobre 2010 et 2011 dans chacun des blocs des sites expérimentaux. Le taux de matière organique du sol a été déterminé par oxydation humide (Tiessen *et al.*, 1993) et le pH du sol a été mesuré avec un ratio sol:eau de 1:2 (Hendershot *et al.*, 1993). Le phosphore (P), le potassium

(K), le calcium (Ca), le magnésium (Mg) et l'aluminium (Al) du sol ont été extraits en utilisant la solution extractive Mehlich-III avec un ratio sol:solution de 1:10 (Tran *et al.*, 1993). La concentration en P extraite a été déterminée par colorimétrie (Murphy *et al.*, 1962) alors que la concentration en K extraite a été déterminée par l'émission dans la flamme. Finalement, les concentrations extraites en Ca, Mg et Al ont été déterminées par absorption atomique.

Les données météorologiques mensuelles révèlent que la saison de croissance de 2011 était plus humide que la normale alors que celle de 2012 était au contraire plus sèche que la normale (Tableau 2). Le calendrier d'irrigation a été réalisé selon les recommandations de l'agronome. Les données météorologiques quotidiennes détaillées sont rapportées en Annexe A.

Tableau 2 Températures et précipitations moyennes mensuelles de la normale de 30 ans (1981-2010) et au cours de la saison de croissance 2011 et 2012.

Mois	Normale ^a		2011			2012		
	T° (°C)	P (mm)	T° (°C)	P (mm)	I (mm)	T° (°C)	P (mm)	I (mm)
Mai	11,2	107	11,0	156	0	13,4	98	0
Juin	16,4	111	16,8	96	0	17,6	177	0
Juillet	19,3	125	19,5	152	0	19,6	44	66
Août	18,1	104	17,6	239	22	18,9	110	66
Septembre	12,8	117	15,4	80	0	13,2	94	0

^a : Normales de 30 ans (1981-2010) selon la station météorologique Jean-Lesage (latitude 46,80°N, longitude 71,38°W).

P : Précipitations.

I : Irrigations.

3.2 Mesures de l'indice de nutrition azotée et du rendement en tubercules

La biomasse de quatre plants entiers a été récoltée afin de déterminer le contenu en N dans les tubercules et dans la biomasse aérienne, permettant le calcul de l'INA tel que proposé par Bélanger *et al.* (2001) pour le cultivar *Russet Burbank* cultivé sous irrigation dans l'est du Canada (article, Chapitre 2). L'échantillonnage destructif des plants a eu lieu à 40, 54, 70 et 84 JAP en 2011 et à 38, 52 et 66 JAP en 2012.

Le rendement total en tubercules a été déterminé à partir du 2^e rang (6 m de long) de chaque parcelle (article, Chapitre 2). La récolte mécanisée a été effectuée le 26 septembre 2011 et le 24 septembre 2012 (Tableau 1) à l'aide d'une arracheuse à pomme de terre à un rang.

3.3 Données de réflectance hyperspectrale

La prise de mesures a été réalisée au champ à l'aide d'un spectroradiomètre portatif caractérisé par un domaine spectral de 325 à 1075 nm et une résolution spectrale de 3,5 nm (article, Chapitre 2). L'acquisition des données de réflectance s'est effectuée entre 10h00 et 14h00, à environ 1 m au-dessus de la canopée de la culture (au nadir) et utilisant deux champs de visée (CDV) (*i.e.* 7,5° et 25°). Deux campagnes de terrain ont permis d'acquérir huit mesures en 2011 entre 40 et 84 JAP en plus de trois mesures en 2012 entre 37 et 68 JAP. La prise des mesures de réflectance s'est effectuée aux mêmes dates d'échantillonnage que l'INA ou, lorsque les conditions d'éclaircissement n'étaient pas optimales, près de celles-ci.

Les données de réflectance hyperspectrale ont servi aux calculs de 31 IVH (article, Chapitre 2). Ces indices ont été classifiés en quatre grandes catégories (article, Table 2) :

1. Indices de structure tels que le *normalized difference vegetation index* (NDVI) ;
2. Indices de la chlorophylle tels que le *transformed chlorophyll absorption reflectance index* (TCARI) ;
3. Indices du *red edge* tels que le *normalized difference red edge* (NDRE) ;
4. Indices formés d'une combinaison de catégories tels que le *chlorophyll canopy content index* (CCCI).

3.4 Analyses statistiques

Plusieurs études axées sur le suivi de propriétés biophysiques des cultures agricoles utilisent une méthode similaire à celle proposée par Thenkabail *et al.* (2004), où quelques analyses statistiques complémentaires sont effectuées sans s'intégrer les unes aux autres. Dans le cadre de ce projet, une approche intégrée des analyses statistiques a été réalisée en plus d'utiliser l'INA comme méthode de référence du statut azoté de la culture de la pomme de terre (article, Chapitre 2). Pour ce faire, une présélection des cinq IVH les plus corrélés à l'INA a d'abord été réalisée avec la procédure CORR de SAS. Les coefficients de rang de *Spearman* ont été retenus puisqu'il s'agit d'un test non paramétrique. Par la suite, une analyse de la variance considérant un modèle à effets fixes et aléatoires a été effectuée avec la procédure MIXED de SAS afin de comparer les moyennes des IVH de chaque traitement (*i.e.* chaque dose de N) et de déterminer si au moins une des moyennes était significativement différente des autres. Puisque l'analyse de la variance représente un test paramétrique, la normalité de la distribution de l'erreur expérimentale a préalablement été testée par une analyse graphique des résidus (*i.e.* diagramme à tiges et à feuilles, boîte à moustaches et diagramme de probabilité normale) ainsi que par le test Kolmogorov-Smirnov, tous issus de la procédure UNIVARIATE de SAS. Lorsque la normalité était rejetée, une transformation appropriée des variables explicatives a été effectuée afin d'améliorer la normalité de la distribution et l'homogénéité des variances. De même, l'homogénéité de la variance de l'erreur expérimentale a été validée par l'analyse graphique des résidus (*i.e.* graphique des résidus en fonction des valeurs prédites) avant de procéder à l'analyse de la variance. Des tests de comparaisons multiples ont ensuite été produits dans le but d'identifier l'IVH et la configuration optique permettant la meilleure discrimination du stress azoté à différents moments au cours de la saison de croissance. D'une part, le test de la plus petite différence significative a permis d'identifier les doses de N qui apportaient une différence significative sur la réponse de chacun des IVH sélectionnés, et ce pour chacun des deux CDV séparément. D'autre part, des contrastes *a priori* ont permis de déterminer le type de réponse des IVH aux différentes doses de N appliquées. Une optimisation de l'IVH le

plus performant a été réalisée sur une base temporelle en utilisant le *hyperspectral two-band vegetation index* (HTBVI) (article, Chapitre 2). Les coefficients de détermination pour les relations linéaires entre chacune des combinaisons de longueurs d'onde formant le HTBVI et l'INA ont été calculés. Les deux longueurs d'onde les plus adaptées à l'évaluation du statut azoté de la culture ont ensuite été identifiées pour chacune des dates de mesure, permettant de les utiliser pour une optimisation temporelle d'un HVI sélectionné.

La procédure MIXED de SAS a également été utilisée pour l'analyse de la variance de l'INA et du rendement total en tubercules (article, Chapitre 2). La procédure REG de SAS a servi à évaluer la qualité du modèle de régression entre le rendement total en tubercules et l'IVH sélectionné.

4 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Suivi intrasaisonnier du statut azoté à l'aide de l'indice de nutrition azotée

L'INA étant la méthode de référence, il a permis d'établir la dynamique du statut azoté de la culture de la pomme de terre au cours des saisons de croissance 2011 et 2012 (article, Chapitre 3). Une augmentation de la dose de N appliquée résultait en un accroissement des valeurs de l'INA (Figure 13). La dose de 120 kg N ha⁻¹ a permis d'atteindre un niveau de suffisance en N (INA > 1) lors de la première moitié de la saison de croissance en 2011 alors que la dose 200 kg N ha⁻¹ a été nécessaire pour parvenir au même statut azoté tout au long de la saison de 2012. Cette différence pourrait être attribuable à une saison de croissance allongée de neuf jours en 2012 comparativement à 2011, ce qui a accru le potentiel de rendement et possiblement les besoins en N de la culture. De plus, une précipitation de 53 mm est survenue le 22 mai 2012 (Annexe A), soit huit jours après l'application du 1^{er} fractionnement de N à la plantation, et a probablement accentué les pertes de nitrates par lessivage.

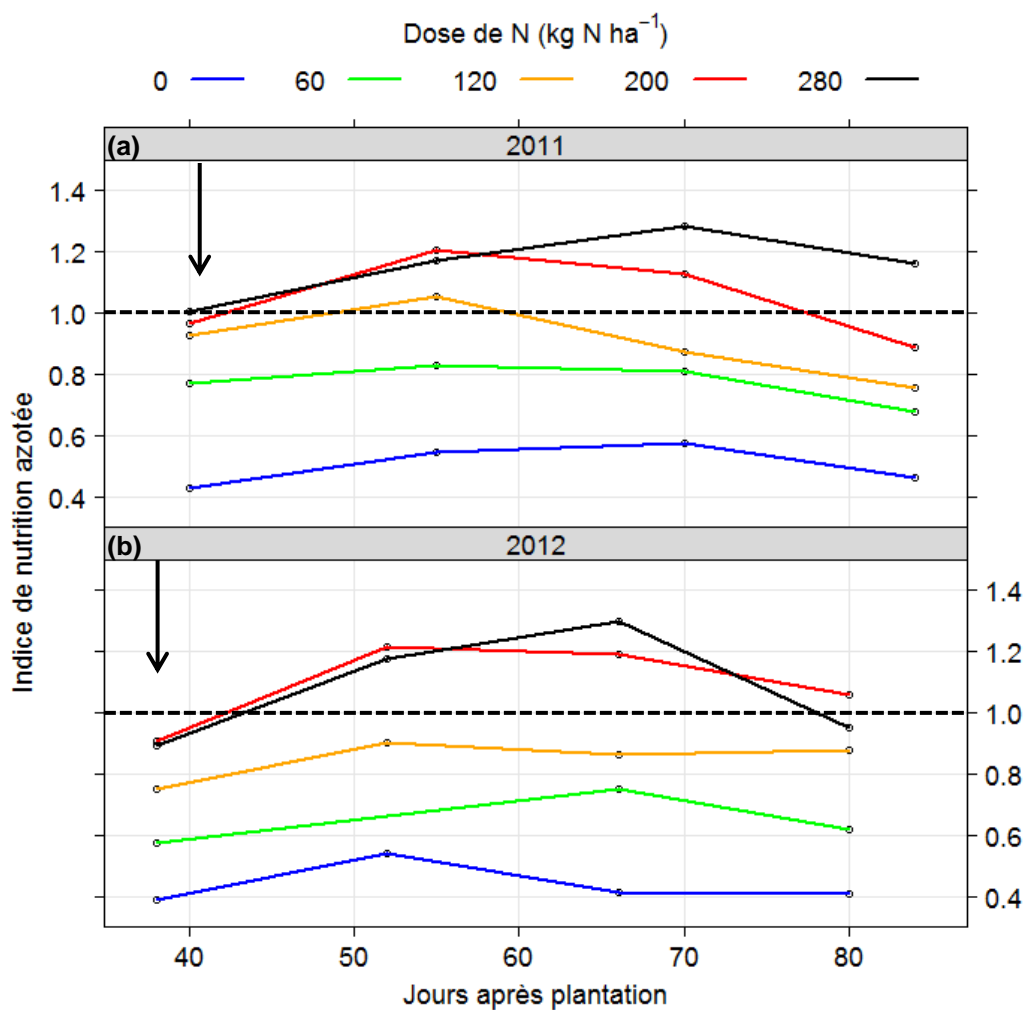


Figure 13 Évolution intrasaisonnière de l'indice de nutrition azotée en (a) 2011 et (b) 2012. Les lignes pointillées délimitent le seuil de suffisance du statut azoté de la culture. Les flèches indiquent le moment de l'application du 2^e fractionnement des engrais azotés.

4.2 Suivi intrasaisonnier du statut azoté à l'aide des indices de végétation hyperspectraux

Les IVH les plus corrélés à l'INA se sont avérés être le NDI, le $CI1_{red\ edge}$, le NDRE, le $RE_{740/720}$ et le NPD12 (Tableau 3), tous calculés à partir d'au moins une longueur d'onde dans la région spectrale du *red edge* (article, Table 5).

Tableau 3 Indices de végétation hyperspectraux sélectionnés pour le suivi intrasaisonnier du statut azoté.

Indice de végétation	Formule ^a	Référence
<i>Normalized difference index</i> (NDI)	$NDI = (\rho_{850} - \rho_{710}) / (\rho_{850} + \rho_{680})$	Datt (1999)
<i>Red edge chlorophyll index 1</i> ($CI1_{red\ edge}$)	$CI1_{red\ edge} = \rho_{800} / \rho_{740} - 1$	Li <i>et al.</i> (2012)
<i>Normalized difference red edge index</i> (NDRE)	$NDRE = (\rho_{800} - \rho_{720}) / (\rho_{800} + \rho_{720})$	Modifié de Barnes <i>et al.</i> (2000)
<i>Red edge 740/720 index</i> ($RE_{740/720}$)	$RE_{740/720} = \rho_{740} / \rho_{720}$	Vogelmann <i>et al.</i> (1993)
<i>Nitrogen planar domain index 2</i> (NPD12)	$NPD12 = \frac{(CI2_{red\ edge} - CI2_{red\ edge\ MIN})}{(CI2_{red\ edge\ MAX} - CI2_{red\ edge\ MIN})}$ <p>où $CI2_{red\ edge} = \rho_{740} / \rho_{550} - 2$</p>	Cette étude

^a : ρ représente la valeur de réflectance et l'indice indique la longueur d'onde en nanomètres.

Pour chacun des IVH sélectionnés et lors des deux années de l'étude, l'effet de la date de mesure était statistiquement significatif (Tableau 4). La réponse des IVH variait avec le stade phénologique et l'ISF de la pomme de terre, ce qui témoigne de l'importance d'une méthode adaptée pour le suivi temporel de la vigueur de la culture. L'effet principal de la dose de N était significatif dans tous les cas. De la même manière que l'INA augmentait avec un accroissement des doses de N (Figure 13), les valeurs des IVH augmentaient quadratiquement avec la hausse de la dose de N appliquée. Parmi les cinq IVH sélectionnés, le $CI1_{red\ edge}$ était le seul indice ne présentant aucun effet significatif du CDV autant en 2011 qu'en 2012, et ce en considérant toutes les doses de N et toutes les dates de mesure. Le $CI1_{red\ edge}$ se révèle comme l'indice le plus stable et indépendant des paramètres de prise de vue. Les quatre autres IVH affichaient des valeurs significativement plus élevées avec le CDV 7,5° comparativement au CDV 25°. Pour les indices issus du CDV 7,5°, une plus faible proportion de réflectance du sol

dans le signal avait pour effet d'augmenter la réflectance dans le PIR et de la réduire dans le visible, se traduisant par des valeurs d'indices plus élevées comparativement au CDV 25°. Une interaction significative de la dose de N et du CDV n'a toutefois été observée que sur la réponse du NPDI2, et ce en 2011 seulement. D'autre part, le NDRE, le RE₇₄₀₇₂₀ et le NPDI2 ont présenté une interaction significative de la date de mesure et du CDV en 2012. Le comportement des IVH calculés selon les deux CDV pouvaient donc varier sous l'effet des différentes doses de N et de la date de mesure. Quoique non systématique, l'effet du CDV a significativement affecté le comportement de certains IVH autant en 2011 et qu'en 2012.

Pour chacun des IVH et durant les deux années de l'étude, un contraste *a priori* a indiqué la présence d'une interaction quadratique significative entre la dose de N et la date de mesure (Tableau 4). Malgré l'absence d'effet significatif du CDV pour chacun des cinq IVH sélectionnés (Tableau 4), les comparaisons multiples des moyennes des valeurs de chaque IVH pour chacune des dates de mesure (article, Table 6 et Table 7) ont démontré que les IVH utilisant le CDV 25° distinguaient davantage l'effet des différentes doses de N que ceux utilisant le CDV 7,5°, et ce aussi pour les mesures prises hâtivement (*i.e.* au buttage). Ces résultats peuvent s'expliquer par la plus grande variabilité dans les mesures de réflectance issues du CDV 7,5°. Au buttage, une taille inégale des plants de pommes de terre a été observée au champ. À ce sujet, Goffart *et al.* (2000) stipulent que la croissance de la pomme de terre est variable puisqu'un plant qui émerge hâtivement tend à devenir plus grand qu'un plant qui émerge subséquemment. Plus tard en saison, une plus petite fraction de la canopée, dont la structure et la disposition des feuilles étaient relativement irrégulières, a été mesurée avec le CDV 7,5°. Une répétabilité inférieure des mesures de réflectance entre les quatre blocs du dispositif expérimental a eu pour effet d'augmenter la variance et de diminuer la capacité de discrimination des doses de N sous le CDV 7,5°.

Tableau 4 Analyse de la variance des effets de la dose de fertilisant azoté, du champ de visée et de la date de mesure sur la réponse des indices de végétation hyperspectraux sélectionnés en 2011 et 2012.

Source de variation	2011					2012				
	NDI	CI1 _{red edge}	NDRE	RE ₇₄₀₇₂₀	NPDI2	NDI	CI1 _{red edge}	NDRE	RE ₇₄₀₇₂₀	NPDI2
Date	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Champ de visée (CDV)	0,005	0,123	0,002	<0,001	<0,001	<0,001	0,073	<0,001	<0,001	0,752
Dose de N	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q
Interactions										
Dose de N x Date	<0,001 L 0,002 Q	<0,001 L 0,049 Q	<0,001 L 0,006 Q	<0,001 L 0,002 Q	<0,001 L 0,020 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,001 Q	<0,001 L <0,022 Q	<0,001 L 0,019 Q	0,006 L 0,020 Q
Dose de N x CDV	0,992	0,999	0,976	0,920	0,008 L 0,040 Q	0,962	0,972	0,650	0,785	0,552
Date x CDV	0,999	0,957	0,799	0,762	0,306	0,330	0,508	<0,001	<0,001	0,005
Dose de N x Date x CDV	0,971	0,999	0,994	0,901	0,976	0,921	0,878	0,982	0,875	0,676

NDI : Normalized difference index.

CI1_{red edge} : Red edge chlorophyll index 1.

NDRE : Normalized difference red edge index.

RE740720 : Red edge 740/720.

NPDI2 : Nitrogen planar domain index 2.

L : Linéaire.

Q : Quadratique.

Les valeurs-p en caractères gras sont significatives à p<0,05.

L'évolution intrasaisonnière des IVH utilisant le CDV 25° (article, Fig. 4 et Annexe B) a dévoilé un patron de discrimination des différents niveaux de N similaire à celui de l'INA (Figure 13). Le CCCI s'étant classé au 3^e rang des IVH les plus corrélés au rendement total en tubercules (article, Table 5), il illustre aussi une évolution intrasaisonnière similaire à celle de l'INA (Annexe B). Considérant que l'ajout de N au-delà de la dose optimale de 119 kg N ha⁻¹ en 2011 et de 196 kg N ha⁻¹ en 2012 n'augmentait pas significativement les rendements (article, Fig. 2), les IVH sélectionnés distinguaient correctement les différents statuts azotés de la culture de la pomme de terre à partir d'environ 50 JAP, soit après que le deuxième fractionnement de N ait été appliqué (article, Table 6 et Table 7). Ces observations suggèrent que les IVH pourraient tout de même être utilisés pour parfaire la fertilisation azotée après la deuxième application de N. En fait, puisque la régie de la culture de la pomme de terre incluait la pratique de l'irrigation, la fertigation offrirait la possibilité d'apporter des apports supplémentaires en N plus tard en saison, et ce principalement lors d'années déficientes en précipitations.

L'IVH le plus performant à distinguer les différentes doses de N s'est avéré être le CI1_{red edge} (article, Chapitre 3). En fait, ce dernier a permis une discrimination équivalente ou supérieure à l'INA, sauf à 40 JAP en 2011 où il a seulement pu identifier les plants ne recevant aucun engrais azoté comme étant en situation de stress (article, Table 6). Une détection hâtive du stress azoté s'avère toutefois nécessaire afin d'ajuster efficacement la dose de N à la 2^e application de N (*i.e.* au buttage). La sensibilité du CI1_{red edge} au statut azoté s'est accrue au cours de la saison de croissance autant en 2011 qu'en 2012 (article, Table 6 et Table 7).

Une optimisation du CI1_{red edge} utilisant une version modifiée du HTBVI à 40 JAP en 2011 a permis de trouver les longueurs d'onde optimales spécifiques à ce moment pour l'évaluation du statut azoté (article, Fig. 5 et Table 8). Étant donné l'effet significatif de la date et donc du stade de croissance sur la réponse des IVH, les matrices de coefficients de détermination pour les relations linéaires entre l'HTBVI tel que proposé par Thenkabail *et al.* (2011) et l'INA ont été générées pour chacune des dates de mesure en 2011 et 2012 (Annexe C). Le Tableau 5 illustre un résumé du CDV et des combinaisons de longueurs d'onde issues du HTBVI qui permettraient de maximiser le coefficient de détermination. Il importe de noter que d'autres régions spectrales

associées aux deux CDV peuvent être hautement corrélées à l'INA (Annexe C). Le CDV 7,5° et les longueurs d'onde du visible à 434 et 630 nm se sont avérées optimales au buttage en 2011 alors que les longueurs d'onde dans la région spectrale du *red edge* sous le CDV 25° ont permis d'expliquer une plus grande variabilité de l'INA au buttage en 2012. En 2011, la relation entre l'INA et le HTBVI pour l'ensemble des campagnes de mesure de la saison ont révélé les longueurs d'onde 743 et 753 nm comme étant optimales sous le CDV 25° alors qu'en 2012, les longueurs d'onde 740 et 764 nm sous le CDV 7,5° ont permis de maximiser le coefficient de détermination. Ces résultats démontrent qu'il est difficile de statuer sur les longueurs d'onde optimales ainsi que le CDV le plus adapté au suivi intrasaisonnier du statut azoté de la pomme de terre. Toutefois, le *red edge* s'est révélé être une région spectrale hautement corrélée à l'INA, et ce peu importe le CDV utilisé, le stade phénologique de la culture et l'année d'étude (Annexe C). Ceci renforce les résultats stipulant que le $CI1_{red\ edge}$ était indépendant du CDV (Tableau 4) et l'indice le plus performant pour discriminer les différentes doses de N (article, Table 6 et Table 7). D'autres études seraient toutefois nécessaires afin d'investiguer l'effet de l'humidité du sol dans le choix du CDV et des longueurs d'onde les plus appropriées à détecter rapidement le stress azoté de la pomme de terre.

Tableau 5 **Combinaisons de longueurs d'onde et de champ de visée maximisant le coefficient de détermination entre le HTBVI et l'indice de nutrition azotée à différentes dates de mesure en 2011 et 2012.**

Année	Jours après plantation	Champ de visée (°)	Longueur d'onde 1 (nm)	Longueur d'onde 2 (nm)	R ²
2011	40	7,5	434	630	0,838
	55	25	744	749	0,880
	70	25	518	587	0,838
	84	25	746	755	0,900
	40, 55, 70 & 84	25	743	753	0,770
2012	37	25	736	767	0,647
	54	7,5	437	607	0,776
	68	7,5	744	764	0,809
	37, 54 & 68	7,5	740	764	0,741

4.3 Estimation du rendement total en tubercules à l'aide de l'indice de végétation hyperspectral le plus approprié

Le $CI1_{red\ edge}$ s'est avéré être un IVH hautement corrélé au rendement total en tubercules ainsi qu'à l'INA (article, Table 5). En fait, à environ 40 JAP autant en 2011 qu'en 2012, le $CI1_{red\ edge}$ utilisant le CDV 25 a démontré avoir la capacité de détecter des différences significatives avec la même sensibilité que le rendement total en tubercules (*i.e.* deux groupes en 2011 et trois groupes en 2012 ; article, Table 4). À environ 65 à 70 JAP durant les deux années de mesure, les valeurs du $CI1_{red\ edge}$ utilisant le CDV 25° ont été divisées en quatre groupes statistiquement différents (article, Table 6 et Table 7). Ainsi, les valeurs de cet indice sous la dose de N la plus élevée de 280 kg N ha⁻¹ n'étaient pas significativement différentes de celles observées sous la dose de 200 kg N ha⁻¹. Ceci est consistant avec les résultats de 2012 démontrant qu'une augmentation de la dose de N appliquée au-delà de la dose optimale d'environ 200 kg N ha⁻¹ n'a pas augmenté significativement les rendements et que les rendements les plus élevés en 2011 ont été obtenus sous la dose de 200 kg N ha⁻¹ (article, Table 4). Dans la mesure où aucun stress majeur ne se manifeste jusqu'au moment de la récolte, il est possible d'estimer dès 55 JAP les rendements en tubercules avec le $CI1_{red\ edge}$ utilisant le CDV 25° (article, Chapitre 3). Un modèle de régression polynomiale utilisant comme variable explicative les valeurs de cet indice à 54 JAP en 2011 et à 55 JAP en 2012 a permis d'expliquer 76 % de la variation du rendement total en tubercules (Éq. 4).

$$\text{Rendement total en tubercules (Mg ha}^{-1}\text{)} = -60,55 + 1097,37 \times CI1_{red\ edge} - 3004,75 \times (CI1_{red\ edge})^2 \quad 4$$

Il faut considérer cette régression avec prudence étant donné que la récolte des tubercules ne s'effectue qu'à environ 125-135 JAP. Néanmoins, le $CI1_{red\ edge}$ a démontré être un estimateur efficace du statut azoté et du rendement total en tubercules de la pomme de terre.

5 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Le but de ce projet était d'étudier la dynamique intrasaisonnière du statut azoté de la pomme de terre (cultivar *Russet Burbank*) cultivée sous irrigation dans l'est du Canada à l'aide de la télédétection proximale hyperspectrale. Le premier objectif consistait à identifier les IVH discriminant le mieux les différents statuts azotés de la culture. Les indices de la catégorie du *red edge*, et particulièrement le $CI1_{red\ edge}$, se sont avérés efficaces à cette fin. Le deuxième objectif visait à étudier l'impact du champ de visée sur la capacité des IVH à détecter hâtivement le stress azoté de la pomme de terre. À ce niveau, l'utilisation d'un CDV plus étroit (*i.e.* $7,5^\circ$) n'a pas permis d'obtenir une meilleure discrimination des différents statuts azotés au moment du buttage (*i.e.* environ 40 JAP). Au contraire, l'utilisation du CDV 25° s'est avérée la meilleure configuration optique pour l'étude du statut azoté. Le troisième objectif portait sur la comparaison de la sensibilité au stress azoté des IVH les plus performants avec la méthode de référence. Le $CI1_{red\ edge}$ utilisant le CDV 25° a démontré une capacité à détecter le stress azoté de la culture similaire ou supérieure à celle de l'INA durant les saisons de croissance 2011 et 2012, excepté au moment du buttage en 2011. À ce moment précis, le $CI1_{red\ edge}$ a été optimisé en utilisant la réflectance à 629 et 434 nm. Malgré que l'indice optimisé ait mieux performé, l'INA a permis une discrimination plus tranchée des différents statuts azotés de la culture à 40 JAP en 2011. Des recherches supplémentaires s'avèrent nécessaires afin de valider la pertinence d'utiliser des longueurs d'onde du visible pour la détection hâtive du stress azoté de la pomme de terre. Finalement, le quatrième objectif se voulait l'étude de l'habileté des IVH à prédire le rendement total en tubercules. À cet égard, le $CI1_{red\ edge}$ a permis d'estimer le rendement en expliquant 76 % de la variabilité à environ 55 JAP. Cette découverte représente un atout opérationnel pour les producteurs agricoles qui pourront mieux gérer la planification de l'entreposage des récoltes ainsi que la mise en marché.

Ce projet a été réalisé en utilisant un spectroradiomètre ayant un domaine spectral se limitant au visible et au PIR. Il serait intéressant de répéter l'expérience avec un capteur hyperspectral permettant également la mesure de réflectance dans la région spectrale de l'infrarouge moyen. Puisque la réflectance à 1510 nm est liée directement au

contenu en N de la plante, il serait alors possible d'utiliser cette longueur d'onde pour l'optimisation des IVH les plus performants tels que le $CI1_{red\ edge}$ et ainsi valider si une augmentation de la sensibilité des IVH au stress azoté était possible tôt en saison au moment du buttage. De plus, ce projet a démontré la performance de la région spectrale du *red edge* dans l'évaluation du statut azoté de la culture. Le développement d'un capteur actif spécifique à la pomme de terre pourrait donc se baser sur cette région spectrale. De cette manière, la technologie pourrait être adoptée par les producteurs agricoles pour l'application à taux variables puisque les données seraient accessibles en temps réel, sans d'éventuels délais de traitement et de problèmes de couverture nuageuse comme dans le cas des images satellitaires. La récente arrivée des drones en agriculture de précision soulève également son lot d'opportunités à investiguer plus en profondeur.

Une méthode de gestion de l'azote dans la culture de la pomme de terre nécessiterait un système d'aide à la décision global, dynamique et pouvant considérer les apports potentiels de N par la minéralisation de la matière organique du sol. Pour ce faire, il apparaît essentiel d'intégrer des données météorologiques en plus des données de sols et de plantes. Des méthodes de diagnostic estimant l'apport en N du sol pourraient être utilisées afin d'ajuster spatialement les doses de N appliquées à la plantation alors que les mesures de télédétection à l'échelle de la canopée de la culture servirait à parfaire les doses de N appliquées en post-levée. Un modèle de simulation de la croissance basé sur des données climatiques incluant l'accumulation de degrés jours (et non le nombre de jours après plantation) et des mesures de réflectance de la culture permettrait d'estimer avec plus de précision les besoins en N de la pomme de terre et le rendement en tubercules. De plus, la fusion de données de différents capteurs permettrait d'accentuer la sensibilité des outils au stress azoté de la culture, comme une combinaison d'indicateurs de fluorescence et de réflectance tel que rapporté par Bélanger *et al.* (2005) et Goffart *et al.* (2013). Somme toute, cette étude établit des assises solides pour le développement d'une méthode de gestion intrasaisonnière de la fertilisation azotée de la culture de la pomme de terre.

PARTIE 2 : ARTICLE

AVANT-PROPOS

L'article a été soumis pour une publication dans la revue *Agronomy Journal*. Cette revue est publiée par l'*American Society of Agronomy*.

Thomas Morier :

- Définition du sujet et des objectifs
- Développement de la méthodologie
- Analyse statistiques des données et interprétation des résultats
- Écriture et révision de l'article

Athyna Cambouris

- Aide à la définition du sujet et des objectifs
- Aide au développement de la méthodologie
- Aide à l'interprétation des résultats
- Révision de l'article

Karem Chokmani :

- Aide à la définition du sujet et des objectifs
- Aide au développement de la méthodologie
- Aide à l'interprétation des résultats
- Révision de l'article

RÉSUMÉ

Le taux et le moment des applications de N représentent des défis importants en agriculture de précision étant donné la variabilité spatiotemporelle de N à l'échelle de la parcelle agricole. L'évaluation intrasaisonnière du statut azoté de la culture de la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) est donc nécessaire afin de mieux gérer les apports de fertilisants azotés et ainsi améliorer l'efficacité d'utilisation de N. L'objectif était d'étudier la capacité des indices de végétation hyperspectraux (IVH) à évaluer le statut azoté et le rendement en tubercules d'une culture irriguée de pomme de terre « Russet Burbank » à différents stades phénologiques. Une étude de deux ans a été réalisée dans des parcelles d'un champ agricole près de Québec, QC, Canada, recevant cinq différentes doses de N variant de 0 à 280 kg N ha⁻¹, avec 40 % de la dose appliquée à la plantation et 60 % au buttage. Des échantillons de plants entiers ont été prélevés aux deux semaines afin de définir l'indice de nutrition azotée (INA) comme méthode de référence. La prise des mesures de réflectance hyperspectrale dérivées d'un spectroradiomètre portatif et utilisant deux champs de visée s'est effectuée sur plusieurs campagnes de mesure durant les deux saisons de croissance. Les analyses de la variance et des plus petites différences significatives ont permis d'évaluer la sensibilité des cinq IVH les plus corrélés à l'INA. Les résultats démontrent que les IVH calculés à partir de la région spectrale du *red edge* et utilisant un champ de visée plus large étaient les plus appropriés pour la détection du stress azoté de la culture de la pomme de terre. Parmi ces indices, le $C11_{red-edge}$ (*red edge chlorophyll index 1*) était le plus sensible au contenu en N de la pomme de terre et pouvait expliquer 76 % de la variabilité du rendement total en tubercules à 55 jours après la plantation (JAP).

Mots-clés: *Solanum tuberosum* L., indice de nutrition azotée, spectroradiomètre, réflectance, champ de visée.

ABSTRACT

The rate and timing of N applications are important issues in precision agriculture because of the within-field spatial and temporal variability of N. In-season assessment of potato (*Solanum tuberosum* L.) crop N status (CNS) is required to better match N fertilizer supply to crop N demand and improve N use efficiency. The objective of this study was to investigate the ability of hyperspectral vegetation indices (HVIs) to assess the CNS and tuber yield of irrigated 'Russet Burbank' potato at different growth stages. A 2-yr field experiment was conducted near Quebec City, QC, Canada, on plots receiving five different N rates ranging from 0 to 280 kg N ha⁻¹, with 40% applied at planting and 60% at hilling. Entire plant samples were collected biweekly for determination of the N nutrition index (NNI) as the N status reference method. In-field hyperspectral reflectance derived from a handheld spectroradiometer and using two fields of view was obtained on several dates during both growing seasons. The sensitivity of the five HVIs most correlated to the NNI was evaluated by analyses of variance and least significant differences. It was found that HVIs computed from reflectance in the red-edge spectral region and using a wider field of view (FOV) were the most appropriate indices to detect potato crop N stress. Among these indices, the CI1_{red-edge} (red-edge chlorophyll index 1) was the most sensitive to potato N content and could explain 76% of the variability in total tuber yield at 55 days after planting (DAP).

Keywords: *Solanum tuberosum* L., Nitrogen nutrition index, Spectroradiometer, Reflectance, Field of view.

**IN-SEASON NITROGEN STATUS ASSESSMENT AND YIELD
ESTIMATION USING HYPERSPECTRAL VEGETATION INDICES IN A
POTATO CROP**

Thomas Morier ^{1,2}, Athyna Cambouris^{2,*} and Karem Chokmani¹

¹ Institut national de la recherche scientifique, Centre – Eau Terre Environnement, 490, rue de la Couronne, Québec, Canada, G1K 9A9

² Agriculture and Agri-Food Canada, Pedology and Precision Agriculture Laboratories, 979, Ave de Bourgogne, Québec, Canada, G1W 2L4

* Author to whom correspondence should be addressed: Athyna.Cambouris@agr.gc.ca

1 INTRODUCTION

It is well known that N is the most limiting nutrient for potato (*Solanum tuberosum* L.) growth. For an irrigated potato crop, adequate N management is required to ensure maximum tuber yield and quality (Vos *et al.*, 2000). While excessive N fertilization can delay tuber maturation and reduce quality (Goffart *et al.*, 2008), a N deficiency can significantly reduce tuber size and yield (Bélanger *et al.*, 2000). According to the potato cultivar and irrigation, local N fertilizer recommendations in Quebec, Canada, vary from 125 to 150 kg N ha⁻¹ on loamy soils and from 135 to 175 kg N ha⁻¹ on sandy soils (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2010). However, potato is characterized by a relatively shallow root system (Stalham *et al.*, 2001) and by sensitivity to water stress (Allaire *et al.*, 2014). Moreover, commercial potato production usually occurs on coarse-textured soils with a low cation-exchange capacity and good drainage. In humid climates, high N inputs lead to a low N fertilizer use efficiency, usually below 50% (Cambouris *et al.*, 2008, Tran *et al.*, 1991), and to higher N losses primarily through NO₃⁻ leaching, which can cause contamination of groundwater (Errebhi *et al.*, 1998). Therefore, appropriate management of N fertilizer is important from both economic and environmental standpoints (Zebarth *et al.*, 2009).

Because it is difficult, at planting, to predict soil mineralization and the potato crop N requirements throughout the growing season, a common and generally accepted agronomic practice is to split N applications (Vos *et al.*, 2000). Producers need to monitor the N status of both the soil and the crop during the growing season in order to better match N fertilizer inputs to crop N demand within fields and among years. Instead of predicting soil N supply, the practice of monitoring the crop itself, which is considered a reliable integrator of the soil mineral N supply as well as weather conditions prevailing during the growing season, has been suggested (Schröder *et al.*, 2000).

Therefore, several diagnostic methods have been developed in recent years to assess in-season crop N status (CNS). The N nutrition index (NNI) is a destructive method that relies on the chemical measurement of N concentration on the whole plant (Lemaire *et al.*, 1997). A critical N concentration (N_c) is thus required in order to assess CNS at different times during the growing season and ultimately adjust N fertilizer input to crop

N demand. The NNI was found to have the ability to assess CNS at different times during the growing season independently of growth stage (Ziadi *et al.*, 2012). This method was first developed for tall fescue by Lemaire *et al.* (1984) and was successfully adapted to potato by Duchenne *et al.* (1997). Shortly thereafter, Bélanger *et al.* (2001) developed a specific N_c for 'Russet Burbank' potato grown under irrigation in eastern Canada. In those conditions, the NNI was proposed as a reliable indicator of the level of N stress in a potato crop during the growing season. The NNI, although considered to be the best indicator of CNS, does not provide recommendations for side-dress N application (Goffart *et al.*, 2008). Because the NNI method requires destructive plant sampling, which is time-consuming and costly, it has been suggested that the NNI be used as a reference to calibrate faster methods such as remote sensing (Bélanger *et al.*, 2001, Goffart *et al.*, 2008).

Remote sensing is now widely used in a number of disciplines, including precision agriculture. Vegetation indices have been used for a long time to monitor many temporal changes in agricultural crops (Lyon *et al.*, 1998). While some vegetation indices have been shown to have potential for assessing several crop stresses as well as general plant health (Jackson *et al.*, 1991), hyperspectral vegetation indices (HVIs) may provide additional information on a crop's biophysical characteristics in comparison with broad-band vegetation indices (Thenkabail *et al.*, 2000). Assessment of the N status of crops under specific field conditions requires vegetation indices that account for the complex factors that affect the spectral response of vegetation, such as soil background and shadow, which influence the bidirectional reflectance signature (Bannari *et al.*, 1995, Zarco-Tejada *et al.*, 2004). The optimal wavelengths forming the HVIs that best identify 'Russet Burbank' potato CNS under irrigated fields in eastern Canada are still unknown, even though it has been recognized that chlorophyll absorption features have an impact on a larger portion in the spectrum than a width of a few nanometers and therefore that the optimal wavelengths obtained from a spectroradiometer may be similar to those found in other studies on potatoes (Jain *et al.*, 2007). Moreover, few studies have reported the effect of a narrower field of view (FOV) on the sensitivity of HVIs in assessing potato crop N status at early stages owing to a reduced soil background effect.

Hyperspectral vegetation indices have been categorized into three groups: structural, chlorophyll, and red-edge indices. Jain *et al.* (2007) reported that red-edge indices were efficient in detecting variation in a potato crop caused by different N rates. The red edge is defined by the rapid change in the reflectance spectrum between the red and near-infrared (NIR) regions (i.e., between 680 and 750 nm) and was found to distinctively characterize vegetation (Horler *et al.*, 1983). The red edge is also known to be correlated to the crop chlorophyll status independently of ground cover and is particularly efficient for the early detection of crop stress (Horler *et al.*, 1983), which is an important consideration in an in-season N management context.

In addition to crop N stress detection, another application of hyperspectral remote sensing in precision agriculture is crop yield estimation (Yao *et al.*, 2011). Yield prediction is one of the most important management aspects for growers (Yao *et al.*, 2011). Zebarth *et al.* (2003) revealed that the index derived from the N-Sensor (Yara International ASA, Oslo, Norway) was well correlated to tuber yield, but the use of HVIs to predict tuber yield in a potato crop grown in eastern Canada has not been documented.

The objectives of this study were (i) to identify the HVIs that best discriminate 'Russet Burbank' potato CNS, (ii) to study the impact of FOV on the ability of HVIs to detect early crop N stress, (iii) to compare the sensitivity of the most appropriate HVIs with that of a destructive reference method (i.e., the NNI), and (iv) to identify the HVIs that best estimate total tuber yield.

2 MATERIALS AND METHODS

2.1 Study Area and Experimental Design

A 2-yr study was conducted in experiment plots in an irrigated commercial potato field in Sainte-Catherine-de-la-Jacques-Cartier, QC, Canada (46.84°N latitude, 71.64°W longitude, 150 m above mean sea level). The soil series consisted of a Pont-Rouge on the 2011 site and a Morin on the 2012 site, and both soils are classified as Humo-Ferric Podzols in the Canadian System of Soil Classification (Soil Classification Working Group, 1998). The previous crops were oat and corn in the 2011 and 2012 growing seasons, respectively. The 2011 growing season was wetter than normal, and the 2012 growing season was drier than normal (Table 1).

Table 1 Monthly normal temperature and rainfall obtained from an Environment Canada weather station and monthly air temperature and rainfall during the 2011 and 2012 growing seasons obtained from an on-site weather station.

Month	Normal [†]		2011		2012	
	Temperature	Rainfall	Temperature	Rainfall	Temperature	Rainfall
	°C	mm	°C	mm	°C	mm
May	11.2	107	11.0	156	13.4	98
June	16.4	111	16.8	96	17.6	177
July	19.3	125	19.5	152	19.6	44
Aug.	18.1	104	17.6	239	18.9	110
Sept.	12.8	117	15.4	80	13.2	94

[†] Thirty-year normals (1981–2010) based on data from the Jean-Lesage weather station (≈20 km from the site, 46.80°N latitude, 71.38°W longitude, 74.40 m above mean sea level).

Irrigation was done with a center pivot sprinkler irrigation system. The field was irrigated once in August 2011 (22 mm), three times in July 2012 (66 mm), and three times in August 2012 (66 mm), as recommended by the agronomist in charge (personal

communication). The potato crop was planted, hilled, and harvested, respectively, on 25 May, 5 July, and 26 Sept. in 2011 and on 14 May, 21 June, and 24 Sept. in 2012.

Each experimental plot consisted of six rows, each measuring 0.915 m wide and 8 m long. A randomized complete block design with four replicates was used to maximize N variability to the potato crop (cultivar Russet Burbank). A control and four N rates, namely 0, 60, 120, 200, and 280 kg N ha⁻¹, were called N0, N60, N120, N200, and N280, respectively. The N fertilizer used was ammonium sulfate, and 40% of the rate was applied at planting and 60% at hilling (i.e., 41 days after planting [DAP] in 2011 and 38 DAP in 2012). Both P and K were applied based on local recommendations (Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2010). Every plot was fertilized with a single uniform rate of 100 kg P₂O₅ ha⁻¹ banded at planting as triple superphosphate (0–46–0). Potassium was applied at a rate of 230 kg K₂O ha⁻¹ in two applications: 170 kg K₂O ha⁻¹ as potassium chloride (0–0–60) was broadcast at preplanting, and the balance was banded at planting in a 50/50 mixture of potassium chloride and Sul-Po-Mag (0–0–22 22°S 11 Mg).

2.2 Nitrogen Nutrition Index and Total Tuber Yield Measurements

Starting at hilling, shoot biomass and tuber biomass were manually harvested biweekly from four whole potato plants in the fifth row of each plot. A representative 550-g sample of shoot biomass from each plot was oven-dried at 55°C and reweighed to determine dry matter content. Because the potato crop N_c is calculated from the combined biomass of shoots and tubers (Bélanger *et al.*, 2001), a representative sample of six tubers from each plot was sliced into 1 × 1 cm strips, weighed, oven-dried at 55°C, and reweighed to determine dry matter content (Cambouris *et al.*, 2008). The shoot and tuber samples were then ground to pass through a 1-mm sieve. Subsamples of 0.1 g were analyzed separately with an Elementar vario MAX CN analyzer (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany) to determine total N content in shoots and tubers. Shoot biomass and tuber biomass expressed on a dry matter basis were summed to obtain the combined potato biomass. The following equation was used

to calculate the N concentration of the combined biomass of shoots and tubers (N_c) (Eq. [1]):

$$N_c = aW^b \quad [1]$$

where W is the combined biomass of shoots and tubers ($\text{Mg dry matter ha}^{-1}$), parameter a represents the N concentration for $1 \text{ Mg dry matter ha}^{-1}$, and parameter b represents the coefficient of dilution (Bélanger *et al.*, 2001). Bélanger *et al.* (2001) set parameter a to 4.57 and parameter b to -0.42 for the Russet Burbank potato cultivar grown under irrigated conditions in eastern Canada. The NNI resulted from the ratio between the measured N_c and the predicted N_c as expressed in Eq. [1]. Vine desiccation was done on 11 Sept. 2011 and 9 Sept. 2012 using the herbicide diquat followed by a second application of diquat 1 wk later. Total tuber yield was determined on 26 Sept. 2011 and 24 Sept. 2012 using one row (6 m long) from each plot.

2.3 Hyperspectral Data Collection

Hyperspectral reflectance data were acquired from a FieldSpec HandHeld spectroradiometer (Analytical Spectral Devices [ASD] Inc., Boulder, CO) with a total range of 325 to 1075 nm and a spectral resolution of 3.5 nm at 700 nm. The spectra were sampled according to the device specifications, although after resampling, the data were provided at a 1-nm interval. Two FOVs, 25° and 7.5° , were selected to acquire the spectral measurements with different soil background effects. The readings were collected around midday, between 10:00 and 14:00, and as much as possible under clear sky conditions. The sensor was oriented at nadir over the plant and placed about 1 m above the crop canopy (Fig. 1), resulting in an area of 0.013 m^2 and 0.1544 m^2 for the 7.5° and 25° FOVs, respectively. A tripod stabilized the sensor in the proper position, and precautions were taken to not shadow the crop. Fieldwork data were obtained using the RS³ spectral acquisition software program (ASD Inc.) programmed with a spectrum averaging of 40. Before each measurement, a Spectralon highly Lambertian diffuser (Labsphere, Inc., North Sutton, NH) was used as the white reference. The ViewSpec Pro software program (ASD Inc.) was used to analyze and

export the spectral data. The reflectance data were kept at a 1-nm interval and thus were not averaged to a greater spectral interval. A wide range of HVIs and potentially very narrow absorption features specific to the potato crop were therefore fully accessible.

Hyperspectral reflectance measurements were collected at 40, 48, 55, 61, 66, 70, 76, and 84 DAP in 2011 and at 37, 54, and 68 DAP in 2012, on or close to the sampling dates of the N reference method (i.e., NNI), which were 40, 54, 70, and 84 DAP in 2011 and 38, 52, 66 and 80 DAP in 2012. The canopy closure occurred on August 3rd in 2011 and on July 23rd in 2012 (around 70 DAP).

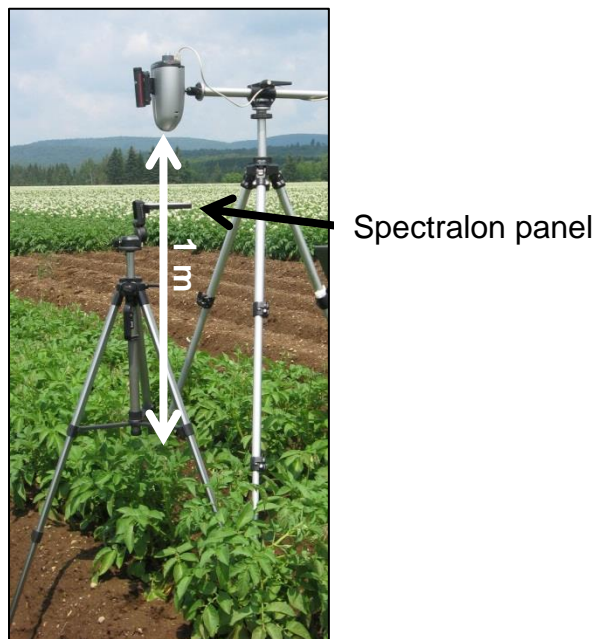


Fig. 1 In-field set-up for hyperspectral proximal sensing of the potato crop

2.4 Hyperspectral Vegetation Indices

Previous studies have already tested several HVIs on potato crops. Jain *et al.* (2007) have specifically studied several HVIs on a potato crop (cultivar K. Chandramukhi). Herrmann *et al.* (2010) have also studied some HVIs such as the CCCl, a chlorophyll index that accounts for soil background effect. Overall, a total of 31 HVIs were selected based on previous studies on CNS assessment of the potato crop using HVIs. These indices are defined in Table 2 and will be referred to by their abbreviations in this paper. These commonly used and newer HVIs were all computed using the reflectance data exported from the ViewSpec Pro software program. The HVIs were organized into four categories: structural, chlorophyll, red-edge-related, and combination. This fourth group consisted of combinations of the previous index categories.

Table 2 List of hyperspectral vegetation indices used in the study.

Hyperspectral vegetation index	Definition [†]	Crop studied	Origin
Structural indices			
Normalized difference vegetation index (NDVI)	$NDVI = (\rho_{800} - \rho_{670}) / (\rho_{800} + \rho_{670})$	various crops (Rouse <i>et al.</i> , 1974)	Rouse <i>et al.</i> (1974)
Transformed difference vegetation index (TDVI)	$TDVI = 1.5 \left[(\rho_{800} - \rho_{670}) / \sqrt{(\rho_{800}^2 + \rho_{670} + 0.5)} \right]$	balsam fir (Bannari <i>et al.</i> , 2002)	Bannari <i>et al.</i> (2002)
Weighted difference vegetation index (WDVI)	$WDVI = \rho_{810 (crop)} - (\rho_{810 (soil)} / \rho_{560 (soil)}) \times \rho_{560 (crop)}$	potato (van Evert <i>et al.</i> , 2012)	Clevers (1989)
Weighted normalized difference vegetation index (WNDVI)	$WNDVI = \frac{\rho_{810 (crop)} - (\rho_{810 (soil)} / \rho_{560 (soil)}) \times \rho_{560 (crop)}}{\rho_{810 (crop)} + (\rho_{810 (soil)} / \rho_{560 (soil)}) \times \rho_{560 (crop)}}$	potato	this study
Soil-adjusted vegetation index L=1 (SAVIL1)	$SAVIL1 = (\rho_{800} - \rho_{670})(1+L) / (\rho_{800} + \rho_{670} + L), \text{ where } L = 1$	corn, wheat, soybean (Haboudane <i>et al.</i> , 2004) potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Huete (1988)
Optimized soil-adjusted vegetation index (OSAVI)	$OSAVI = (\rho_{800} - \rho_{670})(1+0.16) / (\rho_{800} + \rho_{670} + 0.16)$	corn, wheat, soybean (Haboudane <i>et al.</i> , 2004) potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Rondeaux <i>et al.</i> (1996)
Modified soil-adjusted vegetation index (MSAVI)	$MSAVI = \rho_{800} + 0.5 - \sqrt{(\rho_{800} + 0.5)^2 - 2 \times (\rho_{800} - \rho_{670})}$	corn, wheat, soybean (Haboudane <i>et al.</i> , 2004) potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Qi <i>et al.</i> (1994)
Chlorophyll indices			
Modified chlorophyll absorption in reflectance index (MCARI)	$MCARI = [(\rho_{700} - \rho_{600}) - 0.2(\rho_{700} - \rho_{600})](\rho_{700} / \rho_{670})$	corn, wheat, soybean (Haboudane <i>et al.</i> , 2004) potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Daughtry <i>et al.</i> (2000)
Modified chlorophyll absorption in reflectance index 1 (MCARI1)	$MCARI1 = 1.2 [2.5(\rho_{800} - \rho_{670}) - 1.3(\rho_{800} - \rho_{670})]$	corn, wheat, soybean (Haboudane <i>et al.</i> , 2004) potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
Modified chlorophyll absorption in reflectance index 2 (MCARI2)	$MCARI2 = \frac{1.5 [2.5(\rho_{800} - \rho_{670}) - 1.3(\rho_{800} - \rho_{550})]}{[(2\rho_{800} + 1)^2 - (6\rho_{800} - 5\sqrt{\rho_{670}}) - 0.5]}$	corn, wheat, soybean (Haboudane <i>et al.</i> , 2004) potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Haboudane <i>et al.</i> (2004)
Transformed chlorophyll absorption in reflectance index (TCARI)	$TCARI = 3 [(\rho_{700} - \rho_{670}) - 0.2(\rho_{700} - \rho_{550})](\rho_{700} / \rho_{670})$	corn (Haboudane <i>et al.</i> , 2002) potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Haboudane <i>et al.</i> (2002)
Triangular vegetation index (TVI)	$TVI = 0.5 [120(\rho_{750} - \rho_{550}) - 200(\rho_{670} - \rho_{550})]$	corn, wheat, soybean (Haboudane <i>et al.</i> , 2004) potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Broge <i>et al.</i> (2001)

Structure-insensitive pigment index (SIPI)	$SIPI = (\rho_{770} - \rho_{445}) / (\rho_{770} + \rho_{680})$	potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Peñuelas <i>et al.</i> (1995a)
Normalized pigment chlorophyll index (NPCI)	$NPCI = (\rho_{680} - \rho_{430}) / (\rho_{680} + \rho_{430})$	potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Peñuelas <i>et al.</i> (1995b)
Yellowness index (YI)	$YI = (\rho_{582} - 2\rho_{626} + \rho_{670}) / (0.044^2)$	soybean (Adams <i>et al.</i> , 1999)	adapted from Adams <i>et al.</i> (1999)
Red-edge indices			
Zarco-Tejada and Miller index (ZTM)	$ZTM = \rho_{750} / \rho_{710}$	sugar maple (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2001)	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2001)
Red-edge 750/700 index (RE ₇₅₀₇₀₀)	$RE_{750700} = \rho_{750} / \rho_{700}$	potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Gitelson <i>et al.</i> (1996)
Red-edge 740/720 index (RE ₇₄₀₇₂₀)	$RE_{740720} = \rho_{740} / \rho_{720}$	potato (Jain <i>et al.</i> , 2007)	Vogelmann <i>et al.</i> (1993)
Red-edge chlorophyll index 1 (CI1 _{red-edge})	$CI1_{red-edge} = \rho_{800} / \rho_{740} - 1$	winter wheat (Li <i>et al.</i> , 2012)	Li <i>et al.</i> (2012)
Red-edge chlorophyll index 2 (CI2 _{red-edge})	$CI2_{red-edge} = \rho_{740} / \rho_{550} - 2$	chestnut, maple (Gitelson <i>et al.</i> , 1996)	adapted from Gitelson <i>et al.</i> (1996)
Normalized difference red-edge index (NDRE)	$NDRE = (\rho_{800} - \rho_{720}) / (\rho_{800} + \rho_{720})$	cotton (Barnes <i>et al.</i> , 2000) potato (Herrmann <i>et al.</i> , 2010)	adapted from Barnes <i>et al.</i> (2000)
Normalized difference nitrogen index (NDNI)	$NDNI = [\log(1/\rho_{740}) - \log(1/\rho_{800})] / [\log(1/\rho_{740}) + \log(1/\rho_{800})]$	mediterranean vegetation (Serrano <i>et al.</i> , 2002) potato (Herrmann <i>et al.</i> , 2010)	Serrano <i>et al.</i> (2002)
Normalized difference index (NDI)	$NDI = (\rho_{850} - \rho_{710}) / (\rho_{850} + \rho_{680})$	eucalyptus (Datt, 1999)	Datt (1999)
Combinations of index categories			
MCARI/SAVIL1	MCARI/SAVIL1	various tree crops (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2004)	adapted from Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2004)
MCARI/OSAVI	MCARI/OSAVI	various tree crops (Zarco-Tejada <i>et al.</i> , 2004)	Zarco-Tejada <i>et al.</i> (2004)
TCARI/SAVIL1	TCARI/SAVIL1	corn (Haboudane <i>et al.</i> , 2002)	adapted from Haboudane <i>et al.</i> (2002)
TCARI/OSAVI	TCARI/OSAVI	corn (Haboudane <i>et al.</i> , 2002)	Haboudane <i>et al.</i> (2002)
Canopy chlorophyll content index (CCCI)	$CCCI = (NDRE - NDRE_{MIN}) / (NDRE_{MAX} - NDRE_{MIN})$	wheat (Fitzgerald <i>et al.</i> , 2010)	Fitzgerald <i>et al.</i> (2006)
Nitrogen planar domain index 1 (NPD1)	$NPD1 = (CI1_{red-edge} - CI1_{red-edge MIN}) / (CI1_{red-edge MAX} - CI1_{red-edge MIN})$	wheat (Li <i>et al.</i> , 2012)	Li <i>et al.</i> (2012)
Nitrogen planar domain index 2 (NPD2)	$NPD2 = (CI2_{red-edge} - CI2_{red-edge MIN}) / (CI2_{red-edge MAX} - CI2_{red-edge MIN})$	potato	this study
Hyperspectral two-band vegetation index (HTBVI)	$HTBVI_{i,j} = (\rho_i - \rho_j) / (\rho_i + \rho_j)$	various agricultural crops (Thenkabail <i>et al.</i> , 2011)	Thenkabail <i>et al.</i> (2011)

[†] ρ stands for the reflectance value, and the subscript indicates the wavelength in nanometers.

The combinations of index categories were a more elaborate group. Besides HVIs derived from the simple ratio of two indices from different categories (i.e., MCARI/SAVIL1, MCARI/OSAVI, TCARI/SAVIL1, and TCARI/OSAVI), the other HVIs in this category are based on the theory of planar domain which requires two indices being related to each other. One index is sensitive to the desired crop property (i.e. CNS) and the other index is sensitive to the crop biomass for estimating fractional vegetation cover (Clarke *et al.*, 2001). The CCCI is thus computed from the relationship between the NDVI and the NDRE according to the method described by Fitzgerald *et al.* (2006). Following the same principle, Li *et al.* (2012) developed the NPDI1, which is determined by the relationship between the NDVI and the $CI1_{red-edge}$. The NPDI2 is in turn obtained from the relationship between the NDVI and the $CI2_{red-edge}$. The NPDI2 is defined as the ratio of wavelengths in the red-edge and green regions rather than the ratio of wavelengths in the NIR and red-edge regions, as is the case for the $CI1_{red-edge}$. It is worth noting at this point that a drawback of the planar domain indices is the necessity to access a complete dataset prior to their calculation.

The HTBVI was found to be a well-suited index for exploiting all the information available in the hyperspectral reflectance data. The HTBVI is constructed with the same equation as that used for the widely used NDVI. However, instead of relying on the reflectance at two predefined wavelengths in the NIR and in the red (chlorophyll absorption maxima) regions, the HTBVI takes information from all possible combinations of wavelengths. In this study, the HTBVI served to identify spectral regions best adapted for CNS assessment at specific times. To that end, correlation contour plots were created in R (R Core Team, 2012). For each wavelength combination, the *cor()* function was selected to fit a linear model between the HTBVI and the N reference method (i.e., NNI) values while storing the result of each coefficient of determination in a matrix. A median filter of 10×10 nm was applied to the latter matrix, because some noise in the spectral signal measurements was observed at the beginning and end of the spectrum. Coefficients of determination values were then plotted with the *filled.contour()* function. Lastly, optimization of a selected HVI to detect CNS was carried out using the two-wavelength combinations resulting in the highest coefficient of determination.

2.5 Statistical Analysis

The statistical analysis for the present paper was performed using the SAS software program Statistical Analysis System (SAS Institute Inc., 2004). A preselection of the five most appropriate HVIs to assess potato CNS was conducted using the *CORR* procedure. Spearman correlation coefficients between the NNI and each HVI from the whole dataset (i.e., available sampling dates in 2011 and 2012, 7.5° and 25° FOVs) were thereafter computed. Moreover, Spearman correlation coefficients between total yield and each HVI from the whole dataset (all eight hyperspectral data collection measurement dates in 2011 and three measurement dates in 2012, 7.5° and 25° FOVs) were computed. Data normality was tested beforehand with the *UNIVARIATE* procedure, because parametric statistical analyses of variance (ANOVAs) were carried out. When normality was rejected, appropriate transformation of explanatory variables was applied to improve distribution normality and homogeneity of variances. For each explanatory variable, ANOVAs were performed using the *MIXED* procedure with a significance level of 0.05.

The statistical model for ANOVAs used a completely randomized block design with block as a random effect. Differences between means were calculated with the *PDIF* option of the *LSMEANS* statement. Linear and quadratic responses of explanatory variables to fixed effects and their interactions were determined using contrasts. Least significant differences (LSDs) for letter mean separation in the *MIXED* procedure were assigned using the *PDMIX 800* macro (Saxton, 1998) with a significance level of 0.05. More precisely, the NNI was analyzed for each year of the experiment using repeated measures in a two-way ANOVA with N rates and sampling dates as fixed effects. The latter analysis made it possible to compare differences in the NNI response to the five levels of N rates among the sampling dates. For each measurement year, ANOVAs of the five selected HVIs were carried out as described for the NNI, with the exception that N rates, sampling dates, and FOVs were considered to be fixed effects.

The *MIXED* procedure, a priori linear and quadratic contrasts, and the *PDMIX 800* macro were used to analyze the total tuber yield as well as the above ground biomass. The model for total tuber yield response to N rates was created using the *NLIN*

procedure to determine the optimal N rate. Lastly, the *REG* procedure was used to fit a polynomial regression model of total tuber yield as a function of the most appropriate HVI.

3 RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Intraseasonal Monitoring of Crop Nitrogen Status Using the Nitrogen Nutrition Index

For each year, the main effect of the sampling dates (i.e., days after planting) and N rates on the NNI was statistically significant ($\alpha = 0.05$). In addition, a significant quadratic response of the NNI to N rates was tested by a contrast ($p < 0.0001$ in both 2011 and 2012; ANOVA not shown). Therefore, mean NNI values and LSDs were reported among N rates and years (Table 3).

Table 3 Mean values and least significant differences (LSD) for effect of fertilizer N rate on N nutrition index (Bélanger *et al.*, 2001) of the potato crop measured on different sampling dates in 2011 and 2012.

N rate	N nutrition index values							
	Days after planting 2011				Days after planting 2012			
	40	55	70	84	38	52	66	80
kg N ha ⁻¹								
0	0.43a [†]	0.54a	0.58a	0.46a	0.39a	0.54a	0.42a	0.41a
60	0.77b	0.83b	0.81b	0.68b	0.57b	N/A [‡]	0.75b	0.62b
120	0.93c	1.05c	0.88b	0.75bc	0.75c	0.90b	0.86b	0.88c
200	0.97c	1.21c	1.13c	0.89c	0.91c	1.22c	1.19c	1.06c
280	1.01c	1.17c	1.28c	1.16d	0.89c	1.18c	1.30c	0.95c

[†] Means followed by the same letter within a sampling date are not significantly different ($\alpha = 0.05$) using LSD test.

[‡] N/A, data not available.

Within sampling dates, NNI values increased as the rate of fertilizer increased, with the exception of the two higher N rates, given that half of the time, the N200 rate achieved a higher level of CNS than the N280 rate did. This saturation response of the NNI to N rates was revealed by a significant quadratic contrast in both 2011 and 2012.

Across years, only the N200 and N280 rates consistently matched most of the potato N needs ($\text{NNI} > 0.9$) throughout the entire growing season. The N60 rate did not supply enough N to the crop ($\text{NNI} < 0.9$) on every sampling date of each measurement year, while severe N deficiencies ($\text{NNI} < 0.6$) occurred as expected under the N0 rate. Therefore, soil N mineralization did not provide enough N to fully match the high requirements of the potato crop.

In 2011, the N120 rate matched crop N demand only during the first half of the growing season (i.e., up to 55 DAP). Starting from the second split N application, frequent rainfalls promoted NO_3^- leaching and thus an increase in the potato crop N deficiency level until the last measurement date (i.e., 84 DAP). Higher N rates were then required at later growth stages in order to reach a sufficient N level. In weather conditions that promote leaching, additional in-season applications of N fertilizer could have been beneficial for maintaining an optimal CNS throughout the growing season.

In 2012, N stress ($\text{NNI} < 0.9$) was observed under the N120 rate, except at 52 DAP (i.e., 2 wk after the second split N application), when most of the crop N requirements were covered ($\text{NNI} = 0.90$). In comparison with 2011, it was found in 2012 that a higher N rate (i.e., N200) was required in drier conditions to fully meet the crop's N requirements during the first half of the growing season. Higher air temperatures in 2012 early spring may have promoted higher microbial activity and biochemical processes in the soil and thus more N mineralization from soil organic matter (Griffin, 2008, St. Luce *et al.*, 2011). However, a higher N rate on the first measurement date was needed in 2012 to reach a sufficient CNS level. Precipitation of 53 mm occurred 8 d after the first split N application in 2012 and may have caused, to a lesser extent, NO_3^- leaching from the fertilizer applied at planting (40% of the total rate). Plantation in 2011 have been delayed which may have promoted higher soil temperature and avoided some of the rainfalls that would have contributed to increase N leaching in early May 2011. Therefore, higher N mineralization may have occurred in 2011 because of higher total tuber yield on the controls plots in 2011 than in 2012. Bélanger *et al.* (2000) also reported the complex effects of weather on soil N mineralization, N leaching, and potato crop N uptake.

For each year of the experiment, the NNI discriminated three statistically different groups at the hilling stage as well as throughout the growing season, with the exception of 2011 at the end of the growing season (i.e., at 84 DAP), when four groups were identified (Table 3). Chambenoit *et al.* (2004) reported that an NNI value higher than 1 (≈ 1.2) maximized tuber yield, suggesting that the NNI did not distinguish luxury N consumption from N sufficiency level in potatoes. However, Ziadi *et al.* (2012) reported the ability of the NNI to monitor the CNS independently of growth stage, which is a prerequisite for calibrating in-season remote sensing measurements.

3.2 Total Tuber Yield

Because there was a statistically significant linear interaction between years and N rates ($p = 0.0443$; ANOVA not shown), the effect of N rates on tuber yield was investigated separately for each measurement year (Table 4). As expected, the lowest yields (20.33 Mg ha^{-1} in 2011 and 16.38 Mg ha^{-1} in 2012) were found when no N fertilizer was applied, confirming that N deficiency significantly reduced tuber yield. Numerically highest total tuber yields (39.33 Mg ha^{-1} in 2011 and 41.59 Mg ha^{-1} in 2012) were observed under the N200 rate for both years of the experiment. Excessive N fertilizer application rates promoted excessive vegetative growth at the expense of tuber production (Table 4). Indeed, under the highest N280 rate, there was no significant increase in tuber yield in comparison with the N200 rate in 2012. In addition, no significant increase in tuber yield was observed under the N60 to N280 rates in comparison with the N0 treatment in 2011. A higher N rate was thus required in 2012 to reach a significantly higher yield.

In this study, yield potential was reduced in leaching conditions such as those prevailing during the 2011 growing season. Moreover, planting occurred 11 d later in 2011 than in 2012, but harvest occurred on nearly the same date, leaving less time for tuber bulking and maturation at the end of the 2011 growing season. Therefore, the highest total tuber yield was observed in 2012 (Table 4).

Table 4 Mean values and least significant differences (LSD) for effect of N fertilization on marketable tuber yield and above ground biomass at canopy closure in 2011 and 2012.

N rate	2011		2012	
	Total tuber yield	Above ground biomass at 70 DAP	Total tuber yield	Above ground biomass at 66 DAP
kg N ha ⁻¹	----- Mg ha ⁻¹ -----			
0	20.33a [†]	1.31a	16.38a	0.67a
60	33.90b	2.13b	31.14b	1.46b
120	37.71b	2.15b	36.10bc	2.08c
200	39.33b	2.89c	41.59c	2.28c
280	37.92b	2.73c	41.25c	2.82d

[†] Means followed by the same letter within a measurement year are not significantly different ($\alpha = 0.05$) using LSD test.

A significant quadratic contrast of N rates on total tuber yield was observed in 2011 ($p = 0.0006$) and 2012 ($p = 0.0011$), suggesting that total tuber yield varied quadratically with N rates (ANOVA not shown). Therefore, a quadratic plateau model was used to fit total tuber yield response to N fertilizer application (Fig. 2). Optimal N rates of 119 ± 29.8 and 196 ± 42.1 kg N ha⁻¹ were obtained in 2011 and 2012, respectively. These optimal N rates are consistent with the LSD results discussed previously and shown in Table 4. A large variation in optimal fertilizer N rate was previously reported to be related to weather conditions (Goffart *et al.*, 2008, Zebarth *et al.*, 2009). Because 2011 was more likely to have been characterized by weather conditions favorable for N leaching, crop N requirements could have been lower owing to a later planting date, which resulted in a shorter growing season and lower yield potential. Moreover, the higher yield under the N0 treatment in 2011 suggested that besides the effect of site, more N mineralization from soil organic matter may have occurred after hilling in 2011 than in 2012. The maximum yield response to N fertilizer applications (plateau of 41.2 Mg ha⁻¹) was found in 2012, which is also consistent with the total tuber yield measurements provided in Table 4.

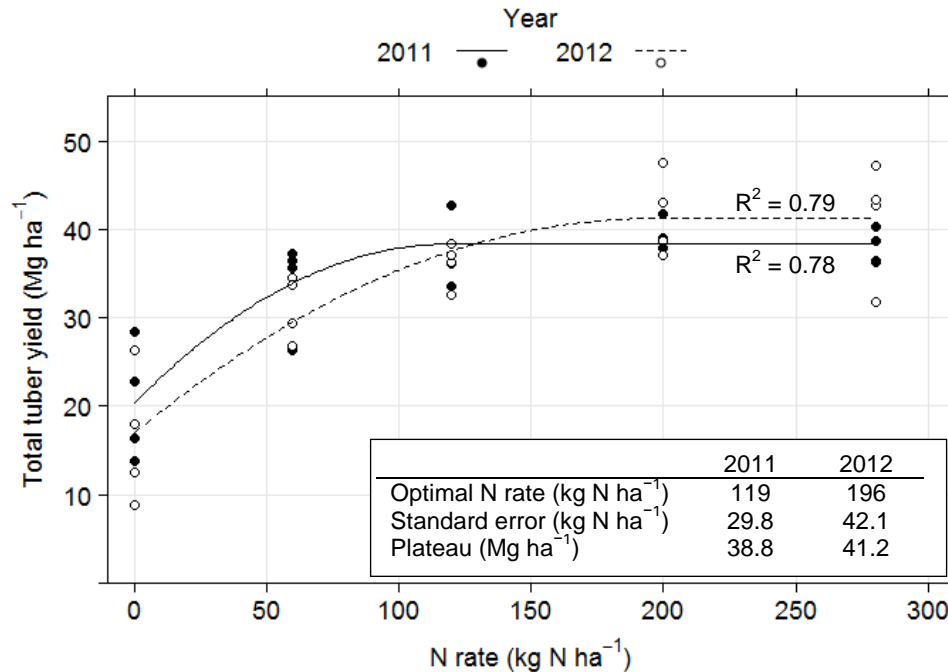


Fig. 2 Response of total tuber yield to N fertilization as determined by a quadratic plateau model in 2011 and 2012.

3.3 Intraseasonal Crop Nitrogen Status Assessment Using Hyperspectral Data

3.3.1 Hyperspectral Signatures

Remote sensing of vegetation has shown that a higher crop cover increases scattering in the spongy mesophyll cells and therefore increases reflectance in the NIR (Jensen, 2007). Conversely, chlorophyll pigments absorb visible light and reduce reflectance in the red and blue regions of the spectrum (Jensen, 2007). Typical hyperspectral signatures of the potato crop under different N levels are illustrated in Fig. 3. The hyperspectral signatures in the 2012 growing season (data not shown) were similar to those of 2011 shown in Fig. 3 and are therefore not presented.

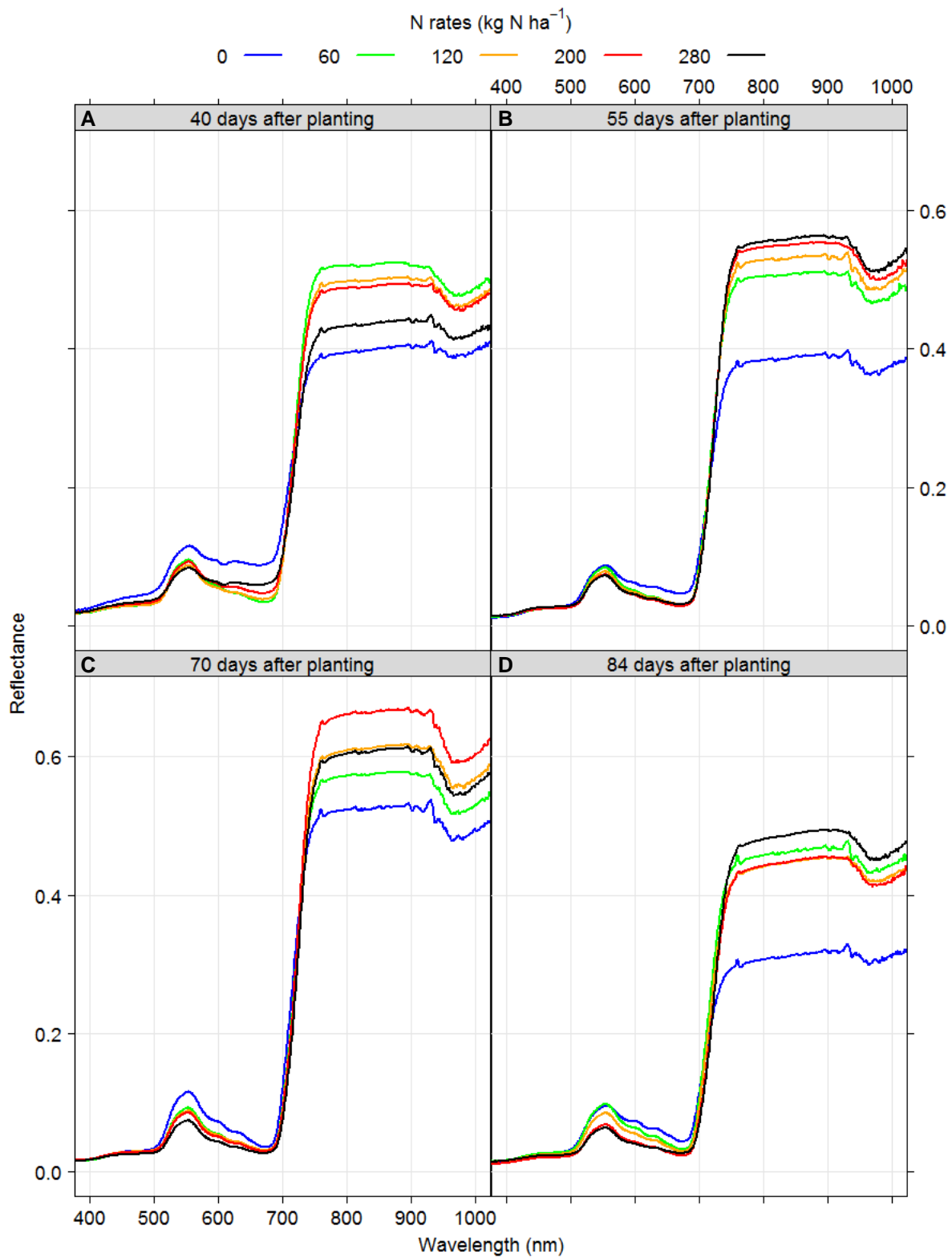


Fig. 3 Hyperspectral signature of a potato crop measured using the 25° field of view under five N rates (0, 60, 120, 200, and 280 kg N ha⁻¹) in 2011 at (A) 40, (B) 55, (C) 70, and (D) 84 d after planting.

At 40 DAP, NIR reflectance, starting at about 790 nm, did not increase as the N application rate increased (Fig. 3). The control, in which no N was applied at planting, showed the lowest NIR plateau value, about 0.40, whereas the maximum, about 0.52, was achieved by the lowest N rate applied, which was the N60 rate. The highest N rate allowed the crop to reflect light in the NIR at about 45% of the incident light, which represented the lowest reflectance value after the control. Lower crop canopy development at hilling and therefore higher soil background effects in the signal, coupled with the fact that the crop had barely begun to take up N from the fertilizer applied at planting (40% of the total N rate), can explain this inconsistent pattern of NIR reflectance at the early growth stage. Therefore, HVIs based only on NIR reflectance may not be sufficient to precisely assess CNS at hilling.

Still at 40 DAP, the reflectance pattern in the visible spectrum (i.e., between 400 and 700 nm), differed more among the five N rates than it did at later dates (Fig. 3). This discrimination of N rates was especially marked around reflectance in the chlorophyll absorption maxima in the red region of the spectrum (i.e., at about ρ_{680}). Indeed, the highest reflectance value, 0.09, was obtained for the control treatment, owing to low chlorophyll content as well as a greater fraction of soil reflectance incorporated into the signal because of less crop development. Because ρ_{680} is effective for chlorophyll-a pigment estimation (Blackburn, 1998), early-stage potato CNS assessment could benefit from the use of visible-based HVIs. Moreover, the greatest soil crop contrast and sensitivity to canopy cover are achieved in the red region at around 680 nm (Thenkabail *et al.*, 2000).

At 55 DAP, the rest of the total N rate had been applied to the crop 15 d earlier. Near-infrared reflectance increased as the applied N rate increased, with an apparent saturation at the two higher N rates. More precisely, the NIR plateau was reached at 0.39, 0.51, 0.53, 0.55, and 0.56 for the N0, N60, N120, N200, and N280 rates, respectively. In the visible portion of the spectrum, the reflectance curves were more or less the same for all N rates, with the exception of the control, for which reflectance was higher. Therefore, CNS discrimination using only visible wavelengths seems less adapted later in the growing season than at 40 DAP.

From 40 to 55 DAP, NIR reflectance of the control treatment remained constant at almost 0.40, whereas reflectance in the visible portion of the spectrum was reduced. From 55 to 70 DAP, each N rate showed to a lesser extent an increase in the NIR reflectance owing to an increase in crop canopy development.

At 84 DAP, the senescence process had begun, and plant sagging was initiated. Consequently, a marked decrease in NIR reflectance of about 0.15 was observed in comparison with the values at 70 DAP. However, N rate differentiation seemed possible in the visible portion of the spectrum, suggesting that chlorophyll-related wavelengths could be used as a good indicator of crop N uptake at the end of the growing season.

3.3.2 Selection of the Most Appropriate Hyperspectral Vegetation Indices for Crop Nitrogen Status Assessment in 2011 and 2012

Spearman correlation coefficients between the NNI and each HVI are shown in Table 5. The NDI was the HVI most correlated to the NNI, with a correlation coefficient of 0.85. Of the 10 HVIs most correlated to the NNI (ranks 1 to 10), nine are computed from at least one red-edge spectral band. Previous studies also reported that the red-edge region is related to the CNS and chlorophyll content (Daughtry *et al.*, 2000). The WNDVI, a structural index that is calculated without red-edge wavelengths but accounts for soil background effects, ranked in eighth position, with a correlation coefficient of 0.80.

Chlorophyll-based indices such as the MCARI and TCARI alone showed the lowest absolute correlation coefficients ($|r| \approx 0.25$). Shanahan *et al.* (2008) indicated that a chlorophyll-based index, the transformed soil-adjusted vegetation index, or TSAVI, detected fewer variations in greenness or canopy vigor of cereal crops during early-stage growth. Moreover, Cohen *et al.* (2010) reported that the TCARI was highly correlated with leaf N concentration of a potato crop only at tuber bulking stage, but not at early growth stage. In contrast, combinations of indices using chlorophyll wavelengths, such as the MCARI/SAVIL1, performed better ($|r| = 0.77$) in predicting NNI values than did the widely used NDVI ($r = 0.61$).

Table 5

Spearman correlation coefficients between the N nutrition index (NNI) and hyperspectral vegetation indices as well as between tuber total yield and hyperspectral vegetation indices regardless of year measurement and field of view.

Rank	Hyperspectral vegetation index	Index category	<i>r</i>	
			NNI	Yield
1	NDI	red-edge	0.85	0.64
2	CI1 _{red-edge}	red-edge	0.83	0.64
3	NDRE	red-edge	0.83	0.61
4	RE ₇₄₀₇₂₀	red-edge	0.82	0.60
5	NPDI2	combination	0.82	0.59
6	ZTM	red-edge	0.82	0.60
7	CI2 _{red-edge}	red-edge	0.81	0.59
8	WNDVI	structural	0.80	0.58
9	RE ₇₅₀₇₀₀	red-edge	0.79	0.57
10	CCCI	combination	0.78	0.62
11	MCARI/SAVIL1	combination	-0.77	-0.59
12	WDVI	structural	0.77	0.55
13	NDNI	red-edge	0.77	0.60
14	TCARI/SAVIL1	combination	-0.73	-0.60
15	MCARI/OSAVI	combination	-0.66	-0.51
16	NPDI1	combination	0.64	0.57
17	NDVI	structural	0.61	0.42
18	SIPI	chlorophyll	0.60	0.39
19	OSAVI	structural	0.59	0.45
20	MSAVI	structural	0.59	0.44
21	TCARI/OSAVI	combination	-0.58	-0.50
22	NPCI	chlorophyll	-0.57	-0.47
23	TDVI	structural	0.55	0.42
24	SAVIL1	structural	0.55	0.42
25	MCARI1	chlorophyll	0.54	0.41
26	TVI	chlorophyll	0.44	0.33
27	MCARI2	chlorophyll	0.43	0.25
28	YI	chlorophyll	0.37	0.39
29	TCARI	chlorophyll	-0.26	-0.29
30	MCARI	chlorophyll	-0.25	-0.29

In comparison with the NNI correlations, the HVIs were similarly correlated to total tuber yield (Table 5): four of the five HVIs most correlated to the NNI, namely the $CI1_{red-edge}$, NDI, NDRE, and RE_{740720} , were also found to be the HVIs most correlated to total tuber yield. In fact, the difference among the NNI correlations was that the CCCI ranked in the top five HVIs at the expense of the NPDI2. However, the CCCI and NPDI2 are both combinations of index categories that use red-edge wavelengths, validating the reliability of red-edge indices as indicators of general crop productivity. Because N is the most limiting factor, after water stress, for crop growth, the four HVIs most correlated to the NNI were also the indices most correlated to tuber yield. Correlations between HVIs and yield were generally lower than those between HVIs and the NNI because of in-season variability of crop growth that could not be accounted for, since yield was measured only at the end of the growing season.

3.3.3 Sensitivity of Selected Hyperspectral Vegetation Indices to Intraseasonal Crop Nitrogen Status

As was the case for the NNI in 2011 and 2012, the main effect of the sampling dates (i.e., days after planting) and N rates on the NNI was statistically significant ($\alpha = 0.05$). For each measurement date, mean HVI values for each FOV are presented with LSDs in Table 6 and Table 7 for the 2011 and 2012 growing seasons, respectively. Each HVI increased as the N rate increased, regardless of year, timing, and FOV (Table 6 and Table 7), suggesting that HVIs make it possible to monitor the in-season N status of a potato crop. At earlier growth stages, higher index values characterized the 7.5° FOV in comparison with the 25° FOV. Because of lower crop canopy development, soil reflectance was incorporated more into the signal when the 25° FOV was used, as previously discussed (Thenkabail *et al.*, 2000). Despite this difference, the HVIs using the 7.5° FOV did not provide better discrimination of N rates at hilling or within the growing season for both measurement years, resulting in even less capacity to detect significant difference of means than the 25° FOV has at later growth stages. Therefore, the use of a narrower FOV even at early stages, when lower crop development was observed, did not seem conclusive in this study. Moreover, Spearman correlation analysis (Table 5) revealed that soil-adjusted vegetation indices such as the SAVIL1

and MSAVI did not correlate highly to the NNI (ranks 24 and 20, respectively), even though they were developed to minimize the effect of varying background soil reflectance on vegetation index sensitivity (Huete, 1988, Qi *et al.*, 1994). Preference should therefore be given to canopy scale measurements using a wider FOV, especially at later growth stages.

The $CI1_{red-edge}$ using the 25° FOV was found to be the only HVI able to discriminate all five levels of N fertilizer application. That HVI achieved this sensitivity in 2011 at 84 DAP, suggesting that the sensitivity of the index to CNS increased until the end of the growing season. Indeed, the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) discriminated N rates into four groups as early as 48 DAP in 2011 and into three groups at 37 DAP in 2012. However, the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) was not able to maintain the separation of N rates in four groups at 55 and 61 DAP in 2011, although the index still performed at the same level as the NNI at 55 DAP (i.e., discriminated three groups) (Table 3). Partial canopy closure and relatively late N uptake by the potato crop during the first half of the growing season can explain this irregularity in the HVI's sensitivity. Moreover, variability in crop development may be due to the fact that potatoes are grown from tubers. In 2011 at 66 DAP, crop canopy development had stabilized, and the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) discriminated at least four groups of N rates until the end of the season. Therefore, the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) provided the most consistent separation of lower N rates versus higher N rates across the measurement dates in 2011 and 2012, even though the NDI (25° FOV) outperformed the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) at 61 DAP in 2011, discriminating N treatments into one more group than the $CI1_{red-edge}$ did. In comparison with to the NNI, the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) showed an equal or better ability to discriminate N treatments on all dates (i.e., days after planting) across years, with the exception of 40 DAP in 2011, when the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) discriminated one group fewer than the NNI did. It is worth noting that in 2012, NNI measurements at 38 DAP performed better than $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) at 37 DAP.

Table 6 Means and least significant differences (LSD) for effect of N fertilization on hyperspectral vegetation indices using the 7.5° and 25° fields of view at 40, 48, 55, 61, 66, 70, 76, and 84 d after planting in 2011.

N rate	Hyperspectral vegetation index									
	-----7.5° field of view-----					-----25° field of view-----				
	NDI	CI1 _{red-edge}	NDRE	RE ₇₄₀₇₂₀	NPDI2	NDI	CI1 _{red-edge}	NDRE	RE ₇₄₀₇₂₀	NPDI2
kg N ha ⁻¹										
40 d after planting										
0	0.63a [†]	0.09a	0.22a	1.44a	0.15a	0.62a	0.09a	0.18a	1.33a	0.14a
60	0.72b	0.14b	0.31b	1.68b	0.35b	0.70b	0.13b	0.29b	1.62b	0.43b
120	0.73b	0.14b	0.32b	1.69b	0.36b	0.72b	0.14b	0.30b	1.63b	0.48b
200	0.71b	0.13b	0.30b	1.64b	0.33b	0.71b	0.13b	0.28b	1.58b	0.43b
280	0.74b	0.14b	0.32b	1.70b	0.40b	0.72b	0.14b	0.28b	1.57b	0.45b
48 d after planting										
0	0.67a	0.10a	0.26a	1.55a	0.24a	0.64a	0.09a	0.23a	1.48a	0.27a
60	0.71ab	0.13ab	0.30ab	1.64ab	0.32ab	0.69b	0.12b	0.28b	1.60b	0.40b
120	0.74bc	0.15bc	0.33bc	1.72bc	0.40bc	0.74c	0.15c	0.33c	1.71c	0.56c
200	0.76c	0.17c	0.35c	1.80c	0.44bc	0.76c	0.16cd	0.35c	1.77c	0.64c
280	0.78c	0.18c	0.37c	1.84c	0.50c	0.77c	0.17d	0.36c	1.81c	0.68c
55 d after planting										
0	0.67a	0.11a	0.26a	1.54a	0.23a	0.65a	0.11a	0.24a	1.47a	0.29a
60	0.73b	0.15b	0.33b	1.72b	0.40b	0.72b	0.14b	0.31b	1.68b	0.52b
120	0.77bc	0.19bc	0.38b	1.86b	0.52b	0.76c	0.17c	0.35bc	1.77bc	0.62bc
200	0.77bc	0.19c	0.38b	1.86b	0.49b	0.77c	0.18c	0.37c	1.83c	0.71c
280	0.78c	0.19c	0.38b	1.86b	0.49b	0.78c	0.19c	0.38c	1.87c	0.75c
61 d after planting										
0	0.68a	0.12a	0.28a	1.59a	0.28a	0.67a	0.12a	0.26a	1.54a	0.36a
60	0.76b	0.18b	0.36b	1.81b	0.49b	0.75b	0.17b	0.35b	1.77b	0.69b
120	0.79bc	0.21bc	0.40bc	1.93bc	0.57bc	0.77bc	0.19bc	0.37bc	1.84bc	0.76bc
200	0.80c	0.22bc	0.42c	2.00c	0.65bc	0.79cd	0.21c	0.39cd	1.90cd	0.86cd
280	0.81c	0.23c	0.42c	2.01c	0.68c	0.80d	0.22c	0.41d	1.96d	0.91d
66 d after planting										
0	0.67a	0.12a	0.27a	1.56a	0.26a	0.65a	0.11a	0.25a	1.51a	0.33a
60	0.75b	0.17b	0.35b	1.79b	0.45b	0.75b	0.17b	0.35b	1.76b	0.63b
120	0.77bc	0.20bc	0.38bc	1.88bc	0.52b	0.77bc	0.20c	0.37bc	1.83bc	0.73b
200	0.78bc	0.20bc	0.39bc	1.89bc	0.55bc	0.78cd	0.20cd	0.39cd	1.88cd	0.76b
280	0.81c	0.24c	0.43c	2.03c	0.68c	0.80d	0.23d	0.41d	1.96d	0.89c
70 d after planting										
0	0.66a	0.11a	0.26a	1.53a	0.21a	0.64a	0.11a	0.24a	1.49a	0.28a
60	0.73b	0.15b	0.32b	1.70b	0.34b	0.73b	0.15b	0.32b	1.70b	0.53b
120	0.76bc	0.19b	0.37bc	1.84bc	0.36b	0.76bc	0.18c	0.36bc	1.78b	0.63bc
200	0.80cd	0.23c	0.41cd	1.95c	0.57c	0.78cd	0.21d	0.39cd	1.89c	0.73cd
280	0.81d	0.25c	0.43d	1.93c	0.69c	0.79d	0.22d	0.40d	1.91c	0.80d
76 d after planting										
0	0.57a	0.08a	0.19a	1.37a	0.09a	0.58a	0.09a	0.20a	1.38a	0.14a
60	0.72b	0.15b	0.32b	1.68b	0.34b	0.70b	0.14b	0.30b	1.63b	0.46b
120	0.73bc	0.16bc	0.33bc	1.72bc	0.37bc	0.73b	0.16bc	0.33bc	1.70b	0.55b
200	0.77c	0.19c	0.38c	1.86c	0.51c	0.76c	0.18cd	0.36cd	1.87c	0.77c
280	0.77c	0.19c	0.37c	1.83c	0.49c	0.78c	0.20d	0.38d	1.84c	0.73c
84 d after planting										
0	0.53a	0.08a	0.16a	1.28a	0.02a	0.54a	0.09a	0.16a	1.28a	0.04a
60	0.63b	0.11b	0.24b	1.46b	0.18b	0.65b	0.12b	0.25b	1.49b	0.29b
120	0.69c	0.15c	0.29c	1.60c	0.30c	0.67b	0.14c	0.27b	1.53b	0.38b
200	0.72c	0.16c	0.32c	1.67c	0.37c	0.73c	0.17d	0.33c	1.69c	0.60c
280	0.80d	0.22d	0.41d	1.97d	0.64d	0.77d	0.20e	0.37d	1.82d	0.75d

[†] Means followed by the same letter within a sampling date and hyperspectral vegetation index are not significantly different ($\alpha = 0.05$) using LSD test.

Table 7 Means and least significant differences (LSD) for effect of N fertilization on hyperspectral vegetation indices using the 7.5° and 25° fields of view at 37, 54, and 68 d after planting in 2012.

N rate	Hyperspectral vegetation index									
	-----7.5° field of view-----					-----25° field of view-----				
	NDI	CI1 _{red-edge}	NDRE	RE ₇₄₀₇₂₀	NPD12	NDI	CI1 _{red-edge}	NDRE	RE ₇₄₀₇₂₀	NPD12
kg N ha ⁻¹										
37 d after planting										
0	0.66a†	0.11a	0.22a	1.42a	0.09a	0.64a	0.10a	0.15a	1.23a	0.05a
60	0.67a	0.11a	0.24a	1.48ab	0.16ab	0.66a	0.11ab	0.17a	1.28ab	0.14b
120	0.71b	0.14b	0.29b	1.59bc	0.30bc	0.70b	0.13bc	0.23b	1.43c	0.29c
200	0.74b	0.16b	0.31b	1.65c	0.43c	0.71b	0.14c	0.24b	1.39bc	0.36c
280	0.74b	0.16b	0.31b	1.65c	0.46c	0.73b	0.15c	0.24b	1.43c	0.32c
54 d after planting										
0	0.63a	0.09a	0.22a	1.42a	0.04a	0.62a	0.09a	0.18a	1.32a	0.13a
60	0.73b	0.14b	0.32b	1.71b	0.48b	0.71b	0.13b	0.29b	1.60b	0.47b
120	0.75bc	0.17bc	0.35bc	1.78bc	0.55b	0.74bc	0.15bc	0.33bc	1.71bc	0.55bc
200	0.77c	0.19c	0.37c	1.84c	0.69b	0.76cd	0.18cd	0.35c	1.78c	0.68c
280	0.77c	0.19c	0.38c	1.86c	0.69b	0.77d	0.18d	0.36c	1.81c	0.69c
68 d after planting										
0	0.63a	0.10a	0.23a	1.45a	0.09a	0.61a	0.09a	0.19a	1.35a	0.13a
60	0.70b	0.13b	0.30b	1.63b	0.33b	0.70b	0.13b	0.29b	1.61b	0.43b
120	0.74c	0.16c	0.34b	1.74b	0.48bc	0.74c	0.16c	0.34c	1.73c	0.59bc
200	0.78d	0.21d	0.39c	1.89c	0.70cd	0.78d	0.21d	0.38d	1.86d	0.79cd
280	0.79d	0.22d	0.40c	1.93c	0.90d	0.79d	0.22d	0.40d	1.90d	0.88d

† Means followed by the same letter within a sampling date and hyperspectral vegetation index are not significantly different ($\alpha = 0.05$) using LSD test.

The CI1_{red-edge} (25° FOV) mean values were plotted in Fig. 4 to illustrate the intraseasonal response of the index to applied N. At 40 DAP in 2011, the CI1_{red-edge} (25° FOV) for the N0 rate differed from the other N rates and had a lower value, about 0.05 (Fig. 4). Before the second N fertilizer application in 2011, the CI1_{red-edge} was able to discriminate only two statistically different groups (i.e., N0 versus N60 to N280) (Table 6), as clearly illustrated in Fig. 4. Because the optimal N rate was nearly 200 kg N ha⁻¹ for tuber yield production in 2012 (Fig. 2), the CI1_{red-edge} response to the two higher N rates (i.e., N200 and N280) was saturated and expressed similar values, especially after the second split N application. The findings in 2012 were globally consistent with that ones in 2011.

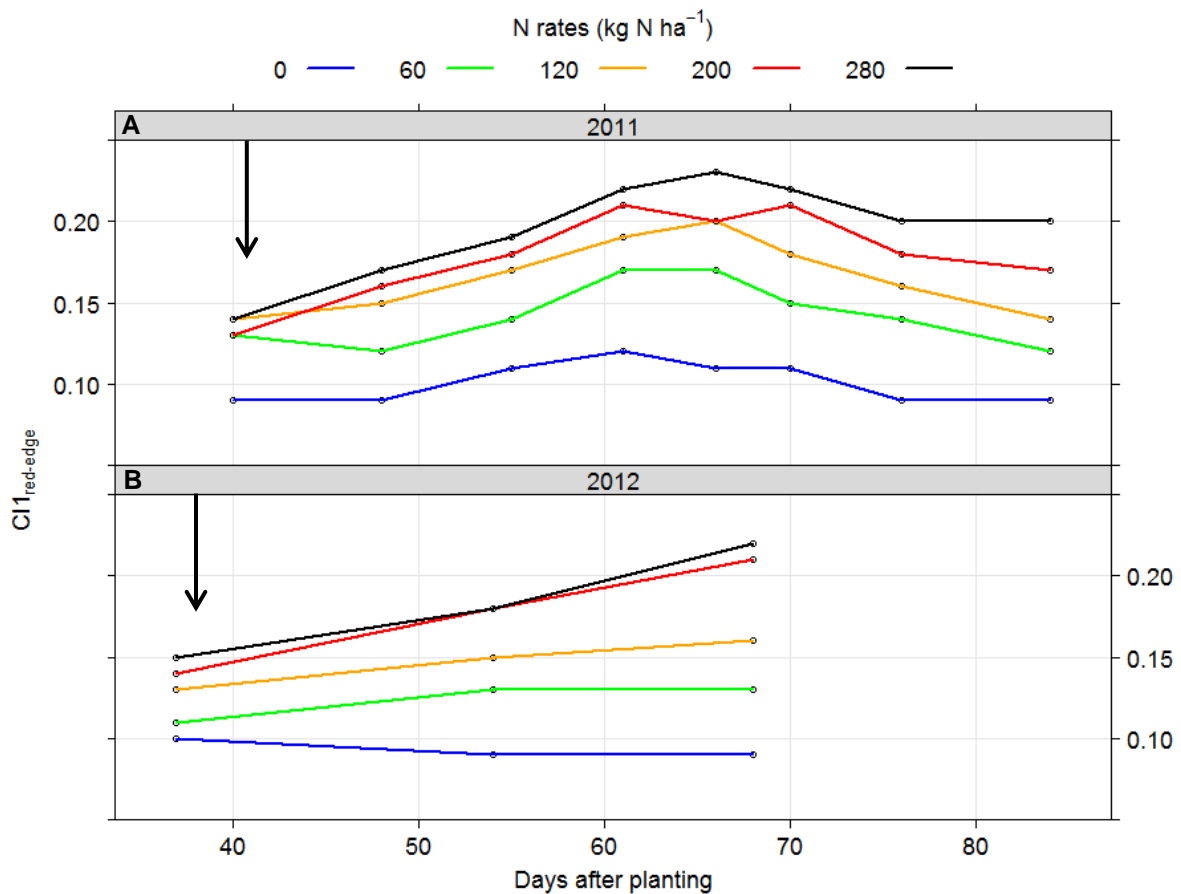


Fig. 4 Intraseasonal evolution of mean $CI1_{red-edge}$ values for the 25° field of view only in (A) 2011 and (B) 2012. The arrows indicates the yearly timing (i.e., at hilling) of the second in-season N fertilizer application.

During the 2011 growing season, the $CI1_{red-edge}$ followed a quadratic function according to days after planting. For all N rates, the $CI1_{red-edge}$ values followed the same pattern as the intraseasonal distribution of the NNI values (Table 3). The dilution of N concentration in the crop at the end of the season was clearly expressed for both the $CI1_{red-edge}$ and NNI. Among N treatments where N was applied, the $CI1_{red-edge}$ values decreased by about 0.05 from 66 to 84 DAP. As previously reported, the $CI1_{red-edge}$ was efficient in assessing the canopy chlorophyll content of the crop (Clevers *et al.*, 2012).

3.3.4 Optimization of the $CI1_{red-edge}$ to Assess Early-Stage Crop Nitrogen Status Using the HTBVI

Early-stage CNS assessment is essential in order to allow farmers to split N fertilizer at a practical time (i.e., at hilling) as well as improve tuber yield and quality. As illustrated in Table 6 and Table 7, ANOVAs and LSDs revealed that the $CI1_{red-edge}$ using the 25° FOV was the most appropriate HVI for assessing potato CNS and had N sensitivity at least as good as the sensitivity of the NNI, with the exception of 2011 at 40 DAP, when cooler and humid conditions as compared to 2012 may have reduced the crop growth rate at hilling, delayed N stress symptoms, and reduced the sensitivity of the $CI1_{red-edge}$ to N stress. Moreover, using a passive sensor in variable illumination conditions could have increased variances in hyperspectral data and hindered LSD sensitivity. Therefore, an optimization of the ability of the $CI1_{red-edge}$ to detect N stress at hilling in 2011 was carried out using a modified form of the HTBVI (Fig. 5). Based on the parsimony principle (i.e., preference is to be given to the simplest form of an index that can explain the crop N variability), the HTBVI was computed from the ratio of two wavelengths as found in the $CI1_{red-edge}$ formula (Table 2). A normalized difference as stated in Thenkabail *et al.* (2011) was discarded, resulting in a simplified equation for the HTBVI (Eq. [2]):

$$HTBVI_{i,j} = \frac{\rho_j}{\rho_i} \quad [2]$$

Fig. 5 shows that with the 7.5° FOV, the spectral combination that best explained the NNI variations ($0.8 < R^2 < 0.9$) corresponded to the violet-blue (ρ_{425}) and red (ρ_{630}) spectral regions. Green (ρ_{525}) and NIR (ρ_{950}) combinations as well as green (ρ_{525}) and red-edge (ρ_{720}) combinations had lower but still high coefficients of determination ($0.7 < R^2 < 0.8$). With the 25° FOV, the highest correlations were observed from a combination of red-edge and NIR wavelengths. It is worth noting that the 7.5° FOV using visible wavelengths yielded higher coefficients of determination than did the 25° FOV using red-edge and NIR wavelengths. At earlier growth stages, leaf structure and distribution had less effect on NIR reflectance than they did at later growth stages.

Minimizing soil reflection with a narrower FOV allowed the HTBVI based on the visible spectral range to focus on chlorophyll absorption features and better assess CNS.

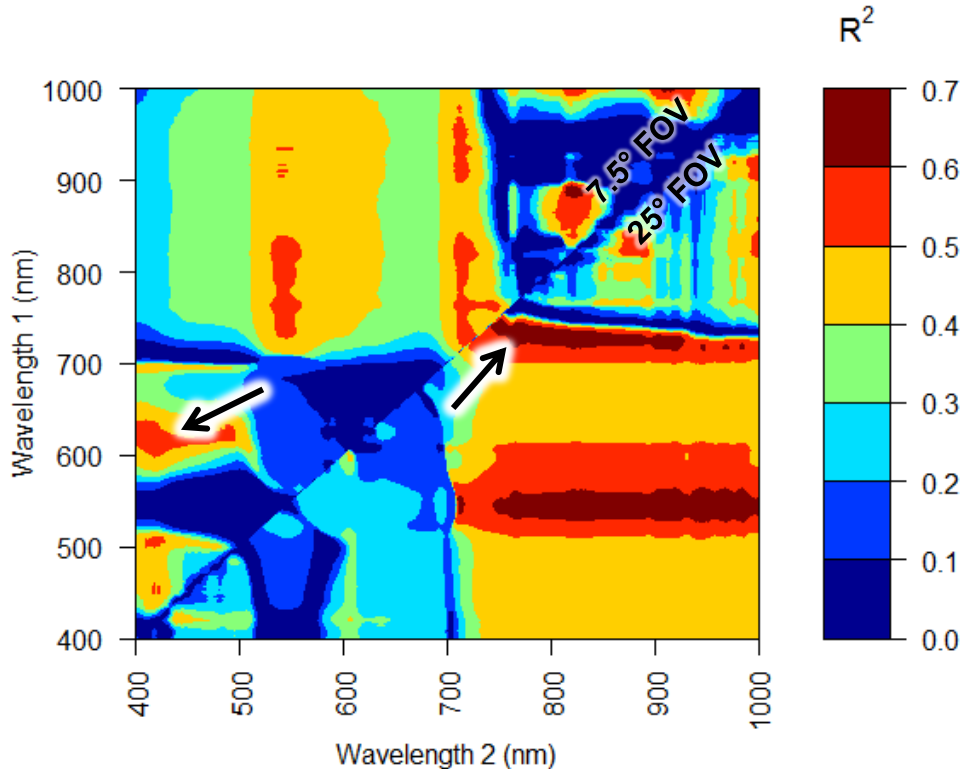


Fig. 5 Contour map of the hyperspectral two-band vegetation index (HTBVI) coefficients of determination (R^2) for the 7.5° (above diagonal) and 25° (below diagonal) fields of view in 2011 at 40 d after planting. The contour map shows the coefficients of determination for the linear relationship between the N nutrition index and each wavelength combination forming the HTBVI. The arrows indicate the spectral regions with the highest coefficients of determination.

The optimized $CI1_{red-edge}$ at 40 DAP in 2011 was formed by the highest coefficient of determination: reflectance at 629 nm and 434 nm (near the red and blue spectral regions, respectively) using the 7.5° FOV. The optimized $CI1_{red-edge}$ was then computed from a formula similar to that of the NPCI (Table 2), which was also obtained from wavelengths in the red (680 nm) and blue (430 nm) spectral regions. However, the NPCI, contrary to the optimized $CI1_{red-edge}$, used a normalized difference of the reflectance wavelength combination. It is worth noting that the NPCI did not score anywhere close to the five HVIs most correlated to the NNI (i.e., rank 22 in Table 5). This ranking suggests that temporal variations in CNS affected crop biophysical

parameters and therefore their optimal estimators. The choice of an HVI for an efficient CNS assessment may depend on climatic conditions and crop growth stage, which can in turn impact the optimal FOV.

The optimized $CI1_{red-edge}$ in 2011 at 40 DAP decreased from 2.09 to 1.51 as the N rate increased (Table 8). Jain *et al.* (2007) reported the same behavior for the NPCI. Analysis of variance revealed that the optimized $CI1_{red-edge}$ achieved the discrimination of three groups, in comparison with only two groups for the non-optimized version. The N200 rate expressed a similar response to the N120 and N280 rates as well as to the lower rate, N60. Therefore, better discrimination was achieved with the optimized version of the $CI1_{red-edge}$ than with the non-optimized version, but means separation was as not as clearly defined as the means separation of the NNI in 2011 at 40 DAP (Table 3).

Table 8 Means and least significant differences (LSD) for effect of N fertilization on the optimized $CI1_{red-edge}$ at 40 d after planting in 2011.

N rate	Optimized $CI1_{red-edge}$
kg N ha ⁻¹	
0	2.09a [†]
60	1.69b
120	1.52c
200	1.56bc
280	1.51c

[†] Means followed by the same letter are not significantly different ($\alpha = 0.05$) using LSD test.

3.4 Yield Estimation Using the Most Appropriate Hyperspectral Vegetation Index

The $CI1_{red-edge}$ was found to be highly correlated to total tuber yield in addition to the NNI (Table 5). At about 40 DAP in 2011 and 2012, $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) had the capacity to detect significant differences (Table 6 and Table 7) at the same sensibility than the total tuber yield (two groups in 2011 and three groups in 2012; Table 4). At about 65 to 70 DAP in both years, the $CI1_{red-edge}$ values (25° FOV) were divided into four statistically

different groups (Table 6 and Table 7). The values of this index under the highest N rate (i.e., N280) were not significantly different from those under the N200 rate, a finding that is consistent with the fact that increasing the N rate above the optimal N rate of about 200 kg N ha⁻¹ did not significantly increase yield in 2012 and that the highest tuber yield was found under the N200 rate in 2011 (Table 4). The values of $CI1_{red-edge}$ under the highest N rate were statistically different from those under the N200 rate at 84 DAP in year 2011 (Table 6), which did not translate in an increased total tuber yield at the N280 rate in 2011 (Table 4). Moreover, as early as 55 DAP, the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) successfully estimated total tuber yield. A polynomial regression model (Eq. [3]) using the $CI1_{red-edge}$ (25° FOV) values from both measurement years at about 55 DAP accounted for 76% of the variation in total tuber yield:

$$\text{Total tuber yield (Mg ha}^{-1}\text{)} = -60.55 + 1097.37 \times CI1_{red\ edge} - 3004.75 \times (CI1_{red\ edge})^2 \quad [3]$$

It is worth noting that this regression should be considered carefully because the potato total tuber yield occurs only around 125-135 DAP. Nevertheless, the $CI1_{red-edge}$ was found to be an efficient estimator of both potato CNS and total tuber yield. This finding represents an important practical consideration for growers and could optimize storage management and marketing planning during the growing season.

4 CONCLUSIONS

This study showed that HVIs can be used to assess potato CNS. Among all the HVIs tested in this 2-yr experiment, HVIs based on the reflectance in the red-edge spectral region were found to be the most reliable indicators for detecting in-season N stresses in a potato crop. Red-edge-based HVIs had the ability to correctly detect potato N stress starting at about 50 DAP. The use of a narrower FOV did not improve the discrimination capability of HVIs to detect early N stress in this study. Statistical analyses revealed that the $CI1_{\text{red-edge}}$ predicted the CNS as precisely as the NNI did, with the exception of the hilling stage in 2011. An optimization of this index at 40 DAP showed that optimal wavelengths were 629 and 434 nm. This result suggests that early N stress detection in a potato crop could also benefit from reflectance in the visible range of the spectrum, depending on the contribution of the soil background reflectance in the signal. Further research is required to evaluate the effects of climatic conditions, growth stage, and soil reflectance on the optimal wavelengths for potato CNS assessment. The $CI1_{\text{red-edge}}$ was also highly correlated to total tuber yield starting at 55 DAP. Yield prediction early in the growing season based on HVIs could help farm managers to optimize their storage management and marketing planning for potato processing.

This hyperspectral proximal sensing study will help in the development of future active sensors specific to potato. Those sensors are required to characterize the within-field spatial variability of CNS independently of illumination conditions so that the sensors could be adopted by growers for site-specific N fertilizer management. Furthermore, preference should be given to the use of a specific crop development model based on growing degree days instead of days after planting in order to better account for interseasonal effects on CNS.

5 ACKNOWLEDGMENTS

This project was funded by the Sustainable Agriculture Environmental Systems (SAGES) program of Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC). The authors wish to thank all members of the team at AAFC's Pedology and Precision Agriculture Laboratories, especially Mario Deschênes, Cédric Bouffard, and Yann Renaux, as well as Ferme Roger Cantin & Fils and the Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT).

RÉFÉRENCES

- Adams ML, Philpot WD & Norvell WA (1999) Yellowness index: An application of spectral second derivatives to estimate chlorosis of leaves in stressed vegetation. *International Journal of Remote Sensing* 20(18):3663-3675.
- Allaire SE, Cambouris AN, Lafond JA, Lange SF, Pelletier B & Dutilleul P (2014) Spatial Variability of Potato Tuber Yield and Plant Nitrogen Uptake Related to Soil Properties. *Agron. J.* 106(3):851-859.
- Bannari A, Asalhi H & Teillet PM (2002) Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS '02. 2002 IEEE International*, p 3053-3055.
- Bannari A, Morin D, Bonn F & Huete AR (1995) A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews* 13(1-2):95-120.
- Barnes E, Clarke T, Richards S, Colaizzi P, Haberland J, Kostrzewski M, Waller P, Choi C, Riley E & Thompson T (2000) Coincident detection of crop water stress, nitrogen status and canopy density using ground based multispectral data. *Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Unpaginated CD.*
- Bélanger G, Walsh JR, Richards JE, Milburn PH & Ziadi N (2000) Yield response of two potato cultivars to supplemental irrigation and N fertilization in New Brunswick. *Am. J. Pot Res* 77(1):11-21.
- Bélanger G, Walsh JR, Richards JE, Milburn PH & Ziadi N (2001) Critical Nitrogen Curve and Nitrogen Nutrition Index for Potato in Eastern Canada. *Am. J. Pot Res* 78(5):355-364.
- Bélanger G, Walsh JR, Richards JE, Milburn PH & Ziadi N (2002) Nitrogen fertilization and irrigation affects tuber characteristics of two potato cultivars. *Am. J. Pot Res* 79(4):269-279.
- Bélanger MC, Viau AA, Samson G & Chamberland M (2005) Determination of a Multivariate Indicator of Nitrogen Imbalance (MINI) in Potato Using Reflectance and Fluorescence Spectroscopy. *Agron. J.* (6):1515-1523.
- Ben-Dor E (2011) Characterization of Soil Properties Using Reflectance Spectroscopy. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, CRC Press, doi:10.1201/b11222-31. p 513-558.
- Blackburn GA (1998) Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: A test using senescent tree leaves. *International Journal of Remote Sensing* 19(4):657-675.
- Broge NH & Leblanc E (2001) Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment* 76(2):156-172.

- Cambouris AN, Zebarth BJ, Nolin MC & Laverdière MR (2007) Response to added nitrogen of a continuous potato sequence as related to sand thickness over clay. *Canadian Journal of Plant Science* 87(4):829-839.
- Cambouris AN, Zebarth BJ, Nolin MC & Laverdière MR (2008) Apparent fertilizer nitrogen recovery and residual soil nitrate under continuous potato cropping: Effect of N fertilization rate and timing. *Canadian Journal of Soil Science* 88(5):813-825.
- Centre canadien de télédétection (2014) *Notions fondamentales de télédétection.*, http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_f.pdf (Consulté le 30 janvier 2014)
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (2010) *Guide de référence en fertilisation*. 2e édition. 473 p
- Chambenoit C (2002) *Fertilisation azotée de la pomme de terre: guide pratique*. Editions Quae,
- Chambenoit C, Laurent F, Machet JM & Boizard H (2004) Development of a decision support system for nitrogen management on potatoes. *Decision Support Systems in Potato Production: Bringing Models to Practice*, Mackerron DKL & Haverkort AJ (Édit.) Wageningen Academic Publishers.
- Chappelle EW, Moon SK & McMurtrey JE, III (1991) The Red Edge Shift: An Explanation Of Its Relationship To Stress And The Concentration Of Chlorophyll A. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1991. IGARSS '91. Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management., International*. 3-6 Jun 1991, p 2287-2290.
- Clarke TR, Moran MS, Barnes EM, Pinter PJ, Jr. & Qi J (2001) Planar domain indices: a method for measuring a quality of a single component in two-component pixels. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International*, p 1279-1281 vol.1273.
- Clevers JGPW (1989) Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf Area Index by Correcting for Soil Moisture. *Remote Sensing of Environment* 29(1):25-37.
- Clevers JGPW & Kooistra L (2012) Using Hyperspectral Remote Sensing Data for Retrieving Canopy Chlorophyll and Nitrogen Content. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of* 5(2):574-583.
- Cohen Y, Alchanatis V, Zusman Y, Dar Z, Bonfil DJ, Karnieli A, Zilberman A, Moulin A, Ostrovsky V, Levi A, Brikman R & Shenker M (2010) Leaf nitrogen estimation in potato based on spectral data and on simulated bands of the VEN μ S satellite. *Precision Agric* 11(5):520-537.
- Conseil des productions végétales du Québec (2000) Utilisation rationnelle de l'engrais azoté dans la culture de la pomme de terre par des applications fractionnées de l'azote. Québec).

- Datt B (1999) A New Reflectance Index for Remote Sensing of Chlorophyll Content in Higher Plants: Tests using Eucalyptus Leaves. *Journal of Plant Physiology* 154(1):30-36.
- Daughtry CST (2001) Discriminating Crop Residues from Soil by Shortwave Infrared Reflectance. *Agron. J.* (1):125-131.
- Daughtry CST, Walthall CL, Kim MS, de Colstoun EB & McMurtrey lii JE (2000) Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment* 74(2):229-239.
- Duchenne T, Machet JM & Martin M (1997) Potatoes. Lemaire G (Édit.) Springer. p 119-130.
- Errebhi M, Rosen CJ, Gupta SC & Birong DE (1998) Potato Yield Response and Nitrate Leaching as Influenced by Nitrogen Management. *Agron. J.* (1):10-15.
- Ewing EE & Wareing PF (1978) Shoot, stolon, and tuber formation on potato (*Solanum tuberosum* L.) cuttings in response to photoperiod. *Plant Physiology* 61(3):348-353.
- Fitzgerald GJ, Rodriguez D, Christensen LK, Belford R, Sadras VO & Clarke TR (2006) Spectral and thermal sensing for nitrogen and water status in rainfed and irrigated wheat environments. *Precision Agric* 7(4):233-248.
- Fitzgerald GJ, Rodriguez D & O'Leary G (2010) Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index—The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Research* 116(3):318-324.
- Fortin JG, Anctil F, Parent L-É & Bolinder MA (2011) Site-specific early season potato yield forecast by neural network in Eastern Canada. *Precision Agric* 12(6):905-923.
- Giroux I (2003) Contamination de l'eau souterraine par les pesticides et les nitrates dans les régions en culture de pommes de terre - Campagne d'échantillonnage de 1999-2000-2001.
- Giroux I (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.
- Gitelson AA (2011) Nondestructive Estimation of Foliar Pigment (Chlorophylls, Carotenoids, and Anthocyanins) Contents. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, CRC Press, doi:10.1201/b11222-11. p 141-166.
- Gitelson AA & Merzlyak MN (1996) Signature Analysis of Leaf Reflectance Spectra: Algorithm Development for Remote Sensing of Chlorophyll. *Journal of Plant Physiology* 148(3-4):494-500.
- Goffart JP, Abras M & Ben Abdallah F (2013) Gestion de la fertilisation azotée des cultures de plein champ. Perspectives d'amélioration de l'efficacité d'utilisation de l'azote sur base du suivi du statut azoté de la biomasse aérienne. *Base* 17(1):221-230.

- Goffart JP, Olivier M & Frankinet M (2008) Potato Crop Nitrogen Status Assessment to Improve N Fertilization Management and Efficiency: Past–Present–Future. *Potato Res.* 51(3-4):355-383.
- Goffart JP, Olivier M, MacKerron DKL, Postma R & Johnson P (2000) Spatial and temporal aspects of sampling of potato crops for nitrogen analysis. *Management of Nitrogen and Water in Potato Production*, Havekort AJ & Mackerron DKL (Édit.) Wageningen Academic Publisher, The Netherlands. p 83-102.
- Greenwood DJ, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A & Neeteson JJ (1990) Decline in Percentage N of C3 and C4 Crops with Increasing Plant Mass. *Annals of Botany* 66(4):425-436.
- Griffin TS (2008) Nitrogen Availability. *Nitrogen in Agricultural Systems*, Schepers JS & Raun W (Édit.) ASA-CSSA-SSSA, Madison WI Vol 49. p 616-646.
- Groten SME (1993) NDVI—crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso. *International Journal of Remote Sensing* 14(8):1495-1515.
- Guyot G, Baret F & Jacquemoud S (1992) Imaging Spectroscopy for Vegetation Studies. *Imaging Spectroscopy: Fundamentals and Prospective Applications*, Toselli F & Bodechtel J (Édit.) Springer, Brussels. p 145-165.
- Haboudane D, Miller JR, Pattey E, Zarco-Tejada PJ & Strachan IB (2004) Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 90(3):337-352.
- Haboudane D, Miller JR, Tremblay N, Zarco-Tejada PJ & Dextraze L (2002) Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment* 81(2):416-426.
- Hendershot WH, Lalonde H & Duquette M (1993) Soil Reaction and Exchangeable Acidity. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Carter MR (Édit.) Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p 141-146.
- Herrmann I, Karnieli A, Bonfil DJ, Cohen Y & Alchanatis V (2010) SWIR-based spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields. *International Journal of Remote Sensing* 31(19):5127-5143.
- Horler DNH, Dockray M & Barber J (1983) The red edge of plant leaf reflectance. *International Journal of Remote Sensing* 4(2):273-288.
- Huete AR (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25(3):295-309.
- Institut de la statistique du Québec (2012) *Superficie, production, ventes hors secteur et recettes monétaires de la pomme de terre, par région administrative, Québec, 2012.*, <http://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/agriculture/pommes-terre/am221012.htm> (Consulté le 17 décembre 2013)
- Jackson RD & Huete AR (1991) Interpreting vegetation indices. *Preventive Veterinary Medicine* 11(3–4):185-200.

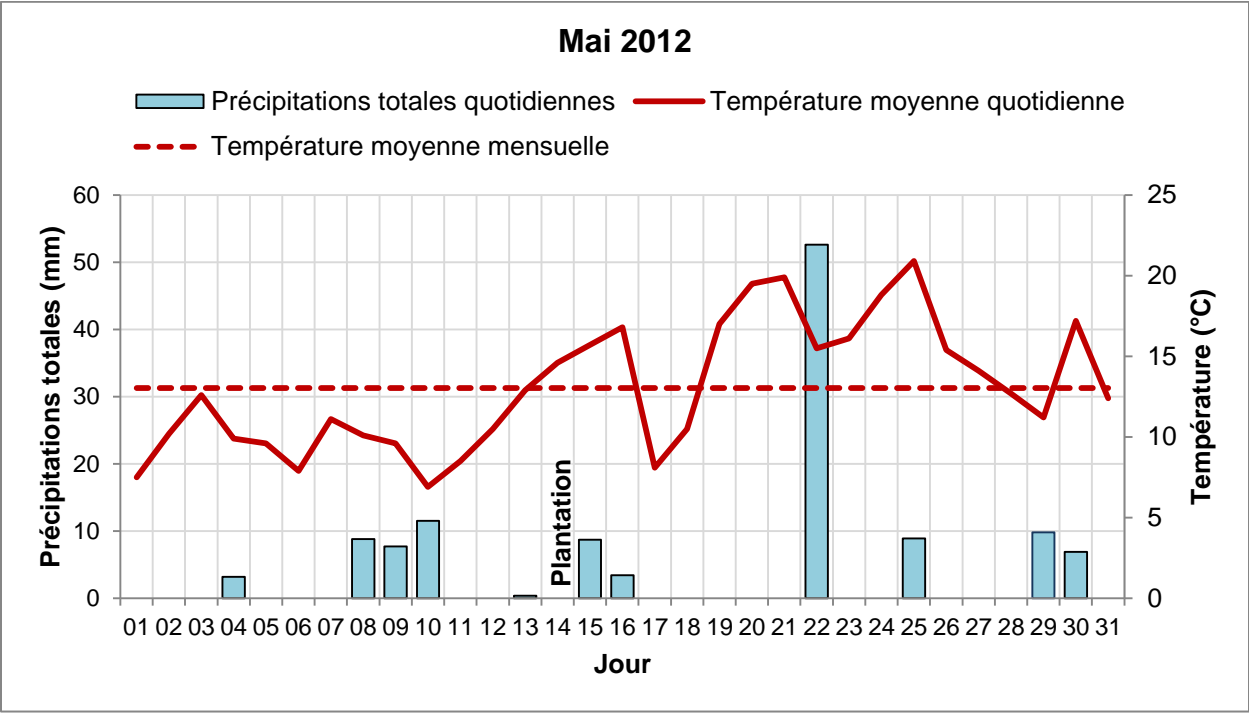
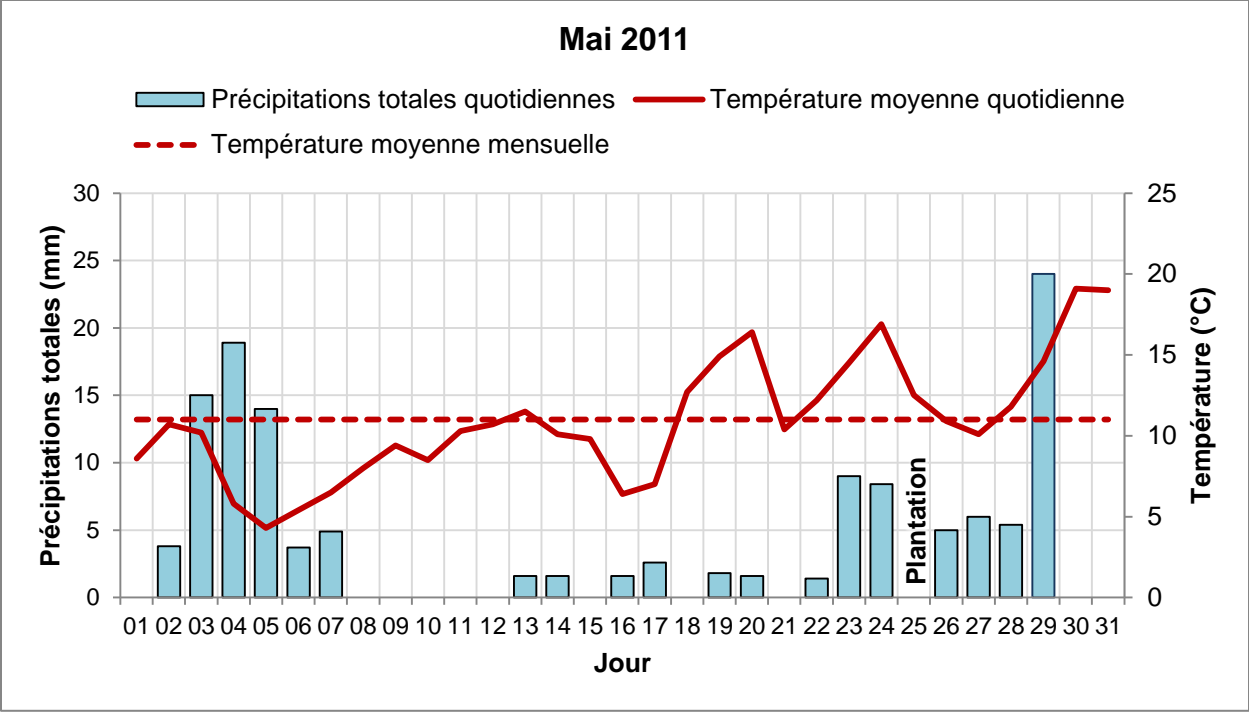
- Jain N, Ray S, Singh JP & Panigrahy S (2007) Use of hyperspectral data to assess the effects of different nitrogen applications on a potato crop. *Precision Agric* 8(4-5):225-239.
- Jensen JR (2007) *Remote Sensing Of The Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, 2nd. 608 p
- Jongschaap REE & Booij R (2004) Spectral measurements at different spatial scales in potato: relating leaf, plant and canopy nitrogen status. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 5(3):205-218.
- Kleinkopf GE, Westermann DT & Dwelle RB (1981) Dry Matter Production and Nitrogen Utilization by Six Potato Cultivars¹. *Agron. J.* (5):799-802.
- Lagunage.eu (2013) *Rayons ultra-violets.*, http://lagunage.eu/index.php?title=Rayons_ultra-violets (Consulté le 21 décembre 2013)
- Lemaire G & Gastal F (1997) N uptake and distribution in plant canopies. *Diagnosis of the nitrogen status in crops*, Lemaire G (Édit.) Springer, Berlin. p 3-43.
- Lemaire G, Salette J, Sigogne M & Terrasson J-P (1984) Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I. — Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4(5):423-430.
- Li F, Misteale B, Hu Y, Yue X, Yue S, Miao Y, Chen X, Cui Z, Meng Q & Schmidhalter U (2012) Remotely estimating aerial N status of phenologically differing winter wheat cultivars grown in contrasting climatic and geographic zones in China and Germany. *Field Crops Research* 138(0):21-32.
- Liang S (2004) *Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces*. John Wilcy & Sons, Inc. 534 p
- Lulai E & Orr P (1979) Influence of potato specific gravity on yield and oil content of chips. *American Potato Journal* 56(8):379-390.
- Lyon JG, Yuan D, Lunetta RS & Elvidge CD (1998) A change detection experiment using vegetation indices. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 64(2):143-150.
- Miller JS & Hopkins BG (2008) Checklist for a Holistic Potato Health Management Plan. *Potato health management*, Johnson DA (Édit.) American Phytopathological Society (APS Press), 2e Ed. p 7-10.
- Morot-Gaudry J-F (1997) *Assimilation de l'azote chez les plantes: aspects physiologique, biochimique et moléculaire*. Editions Quae. 422 p
- Munoz F, Mylavarapu RS & Hutchinson CM (2005) Environmentally Responsible Potato Production Systems: A Review. *Journal of Plant Nutrition* 28(8):1287-1309.
- Murphy J & Riley JP (1962) A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta* 27(0):31-36.
- Ojala JC, Stark JC & Kleinkopf GE (1990) Influence of irrigation and nitrogen management on potato yield and quality. *American Potato Journal* 67(1):29-43.

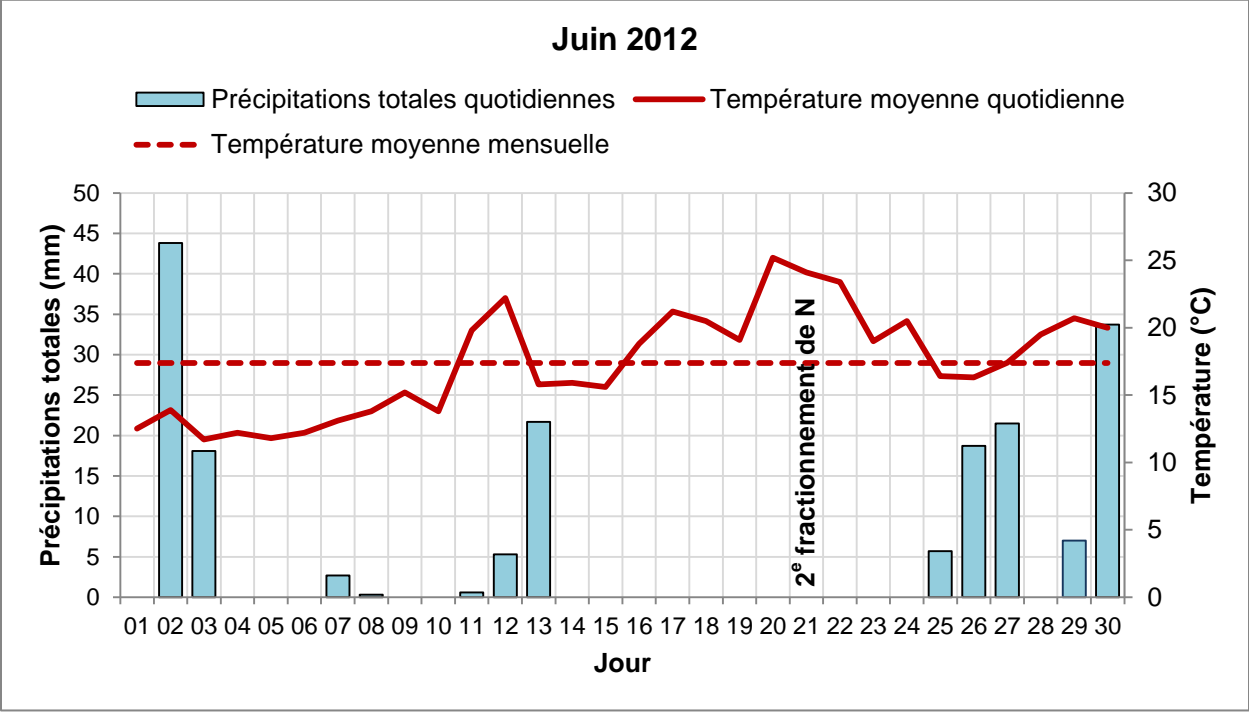
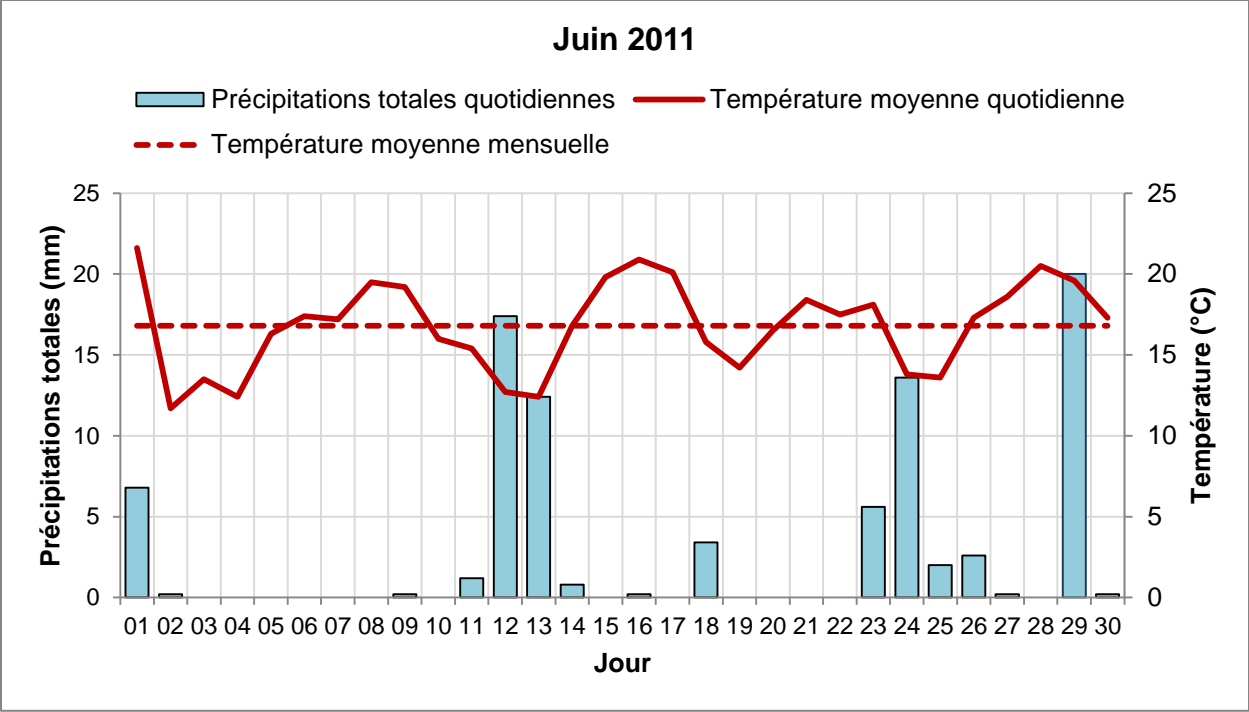
- Peñuelas J, Baret F & Filella I (1995a) Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll α ratio from leaf spectral reflectance. *Photosynthetica* 31:221-230.
- Peñuelas J, Filella I, Lloret P, Muñoz F & Vilajeliu M (1995b) Reflectance assessment of mite effects on apple trees. *International Journal of Remote Sensing* 16(14):2727-2733.
- Porter G & Sisson J (1993) Yield, market quality and petiole nitrate concentration of non-irrigated Russet Burbank and Shepody potatoes in response to sidedressed nitrogen. *American Potato Journal* 70(2):101-116.
- Price JC (1990) On the information content of soil reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment* 33(2):113-121.
- Qi J, Chehbouni A, Huete AR, Kerr YH & Sorooshian S (1994) A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 48(2):119-126.
- R Core Team (2012) R: A Language and Environment for Statistical Computing. (R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria).
- Rasmussen MS (1997) Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: Reduction of environmental and inter-annual variability. *International Journal of Remote Sensing* 18(5):1059-1077.
- Roberts DA, Roth KL & Perroy RL (2011) Hyperspectral Vegetation Indices. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, CRC Press, doi:10.1201/b11222-20. p 309-328.
- Roberts S, Cheng HH & Farrow FO (1991) Potato Uptake and Recovery of Nitrogen-15-Enriched Ammonium Nitrate from Periodic Applications. *Agron. J.* (2):378-381.
- Roberts S, Weaver WH & Phelps JP (1982) Effect of rate and time of fertilization on nitrogen and yield of Russet Burbank potatoes under center pivot irrigation. *American Potato Journal* 59(2):77-86.
- Rondeaux G, Steven M & Baret F (1996) Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 55(2):95-107.
- Rouse JW, A T, Center MURS, Haas RH, Center GSF & Schell JA (1974) *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (greenwave Effect) of Natural Vegetation*. Texas A & M University, Remote Sensing Center.
- SAS Institute Inc. (2004) SAS User's Guide. Cary, NC.
- Saxton A (1998) A macro for converting mean separation output to letter groupings in Proc Mixed. *Proceedings of the 23rd SAS Users Group International*:1243-1246.
- Schröder JJ, Neeteson JJ, Oenema O & Struik PC (2000) Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production?: Reviewing the state of the art. *Field Crops Research* 66(2):151-164.
- Serrano L, Peñuelas J & Ustin SL (2002) Remote sensing of nitrogen and lignin in Mediterranean vegetation from AVIRIS data: Decomposing biochemical from structural signals. *Remote Sensing of Environment* 81(2-3):355-364.

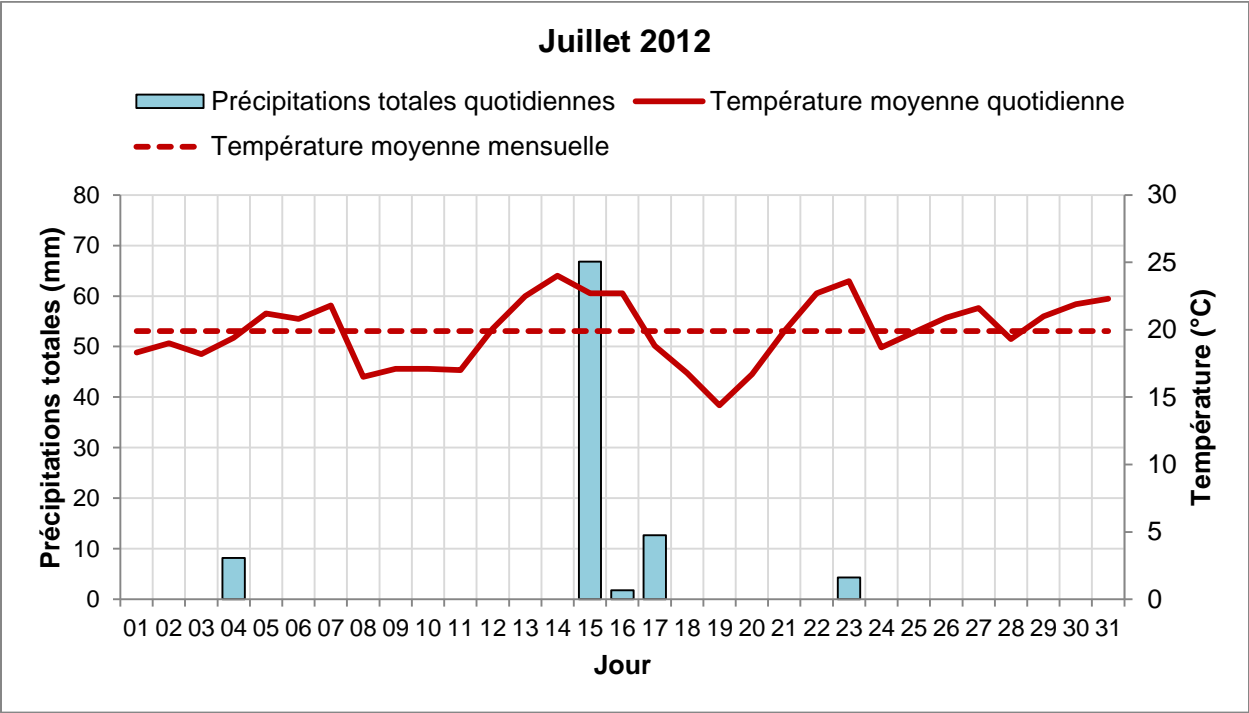
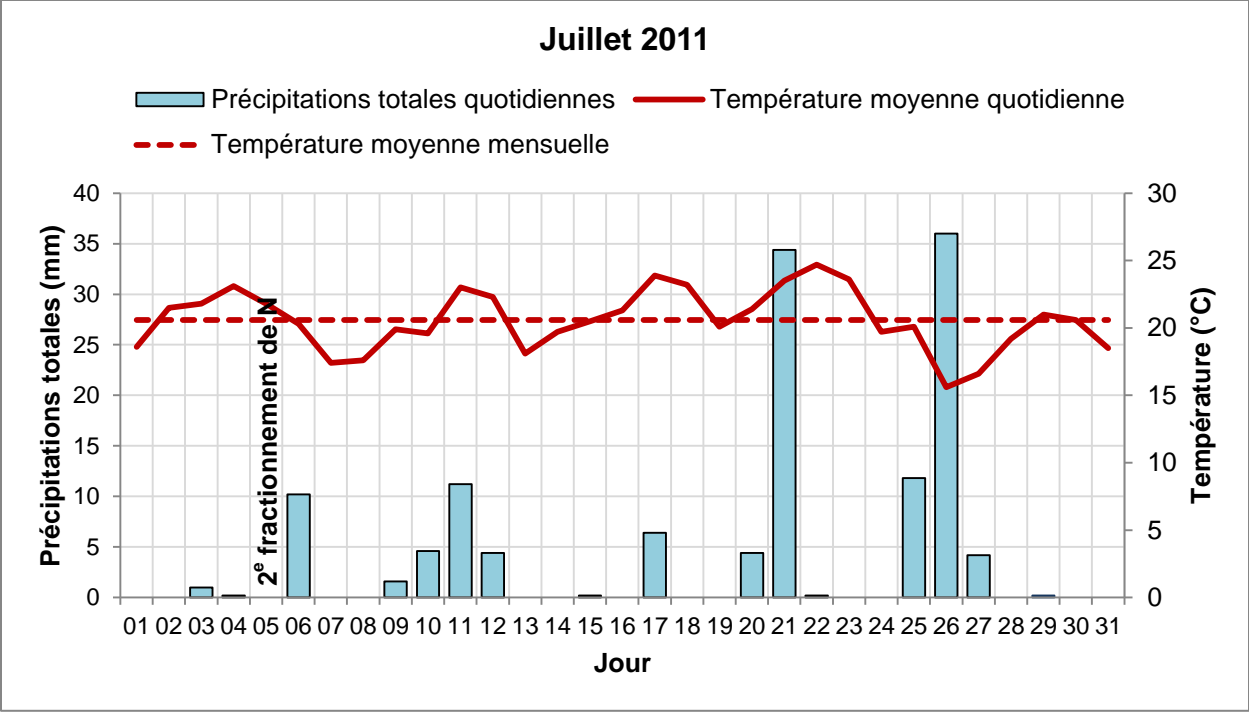
- Shanahan JF, Kitchen NR, Raun WR & Schepers JS (2008) Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 61(1):51-62.
- Shepherd MA & Postma R (2000) Forms of soil nitrogen. *Management of Nitrogen and Water in Potato Production*, Havekort AJ & Mackerron DKL (Édit.) Wageningen Academic Publisher, The Netherlands. p 111-120.
- Soil Classification Working Group (1998) *The Canadian System of Soil Classification*. Agriculture and Agri-Food Canada Publication 1646, 3rd. 187 p
- St. Luce M, Whalen JK, Ziadi N & Zebarth BJ (2011) Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Advances in Agronomy* 112:55-102.
- Stalham MA & Allen EJ (2001) Effect of variety, irrigation regime and planting date on depth, rate, duration and density of root growth in the potato (*Solanum tuberosum*) crop. *The Journal of Agricultural Science* 137(03):251-270.
- Stark J & Westermann D (2008) Managing Potato Fertility. *Potato health management*, Johnson DA (Édit.) American Phytopathological Society (APS Press), 2e Ed. p 55-66.
- Thenkabail PS, Enclona EA, Ashton MS & Van Der Meer B (2004) Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. *Remote Sensing of Environment* 91(3-4):354-376.
- Thenkabail PS, Lyon JG & Huete A (2011) Advances in Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation and Agricultural Croplands. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, CRC Press, doi:10.1201/b11222-3. p 3-36.
- Thenkabail PS, Smith RB & De Pauw E (2000) Hyperspectral Vegetation Indices and Their Relationships with Agricultural Crop Characteristics. *Remote Sensing of Environment* 71(2):158-182.
- Tiessen H & Moir JO (1993) Total and Organic Carbon. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Carter MR (Édit.) Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p 187-200.
- Tran TS & Giroux M (1991) Effects of N rates and harvest dates on the efficiency of ¹⁵N-labelled fertilizer on early harvested potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Canadian Journal of Soil Science* 71(4):519-532.
- Tran TS & Simard RR (1993) Mehlich III-Extractable Elements. *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Carter MR (Édit.) Lewis Publishers, Boca Raton, FL. p 43-50.
- van Evert FK, Booij R, Jukema JN, ten Berge HFM, Uenk D, Meurs EJJ, van Geel WCA, Wijnholds KH & Slabbekoorn JJ (2012) Using crop reflectance to determine sidedress N rate in potato saves N and maintains yield. *European Journal of Agronomy* 43(0):58-67.
- Vogelmann JE, Rock BN & Moss DM (1993) Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *International Journal of Remote Sensing* 14(8):1563-1575.

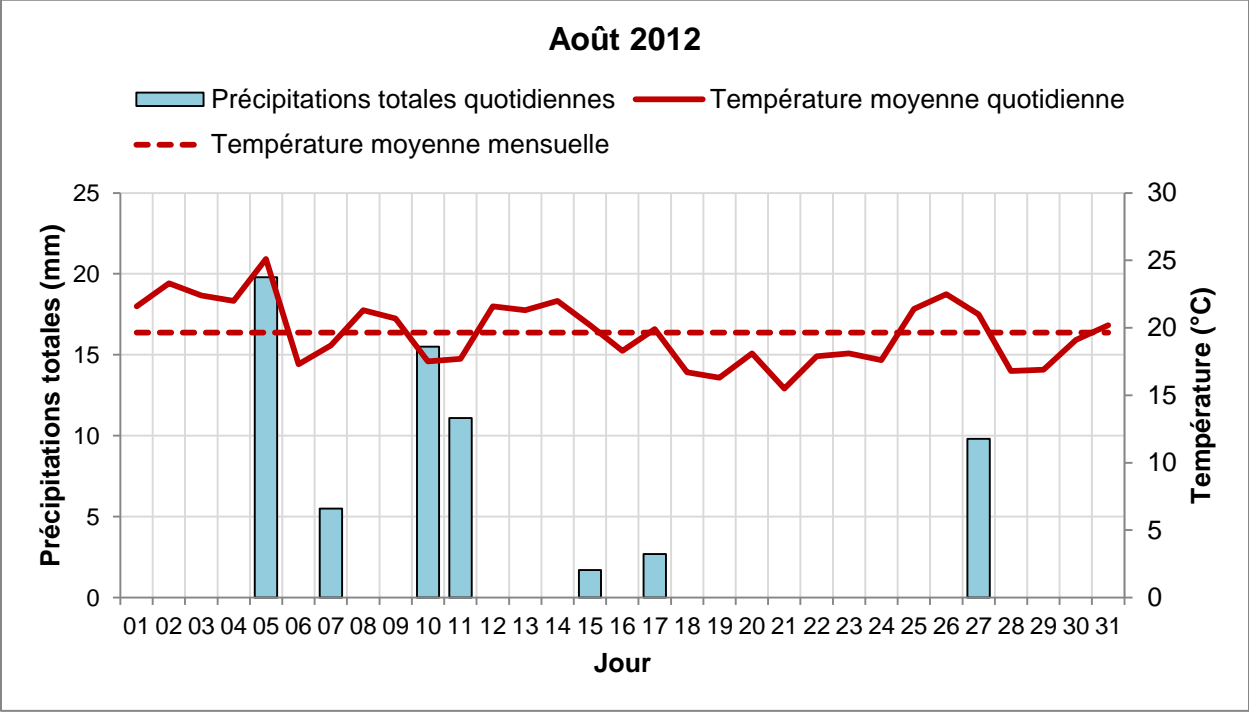
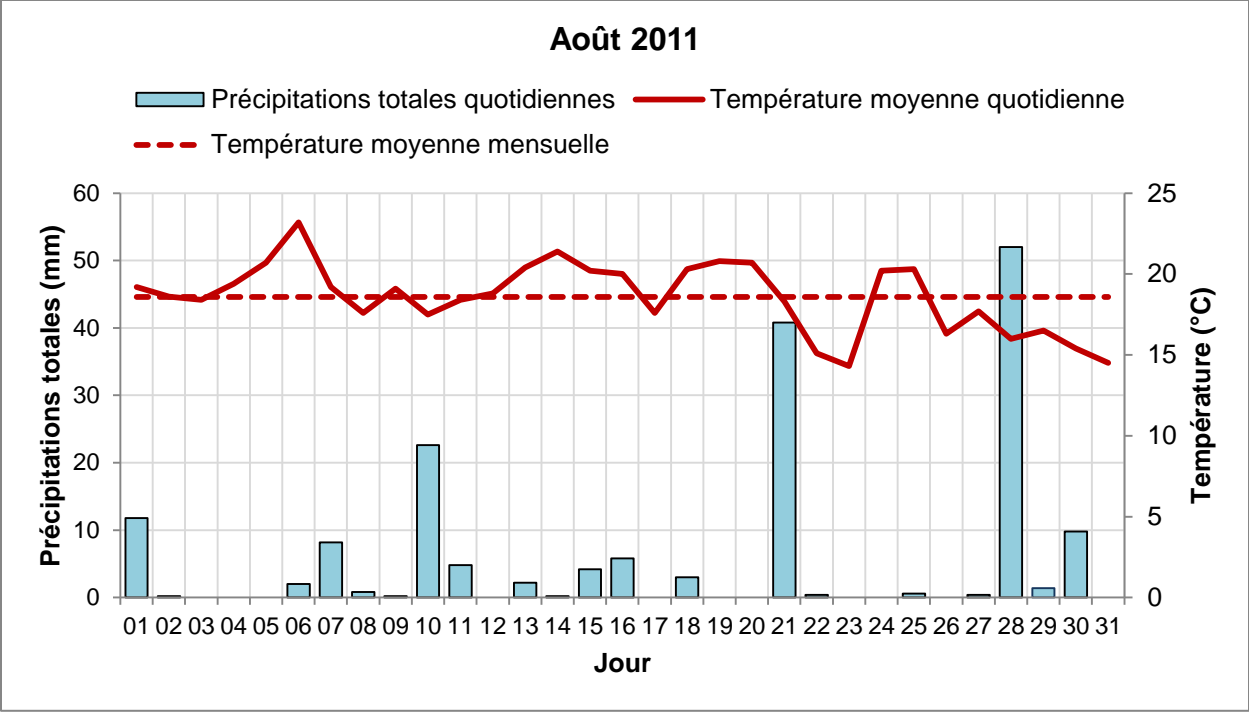
- Vos J & MacKerron DKL (2000) Basic concepts of the management of supply of nitrogen and water in potato production. *Management of Nitrogen and Water in Potato Production*, Havekort AJ & Mackerron DKL (Édit.) Wageningen Academic Publisher, The Netherlands. p 15-33.
- Westermann D, Kleinkopf G & Porter L (1988) Nitrogen fertilizer efficiencies on potatoes. *Am. J. Pot Res* 65(7):377-386.
- World Bank (2013) *World Bank Commodity Price Data (The Pink Sheet)*., http://siteresources.worldbank.org/INTPROSPECTS/Resources/334934-1304428586133/pink_data_m.xlsx (Consulté le 17 décembre 2013)
- Yao H, Tang L, Tian L, Brown R, Bhatnagar D & Cleveland T (2011) Using Hyperspectral Data in Precision Farming Applications. *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*, CRC Press, doi:10.1201/b11222-35. p 591-608.
- Zarco-Tejada PJ, Miller JR, Morales A, Berjón A & Agüera J (2004) Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing of Environment* 90(4):463-476.
- Zarco-Tejada PJ, Miller JR, Noland TL, Mohammed GH & Sampson PH (2001) Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on* 39(7):1491-1507.
- Zebarth BJ, Bélanger G, Cambouris AN & Ziadi N (2012) Nitrogen Fertilization Strategies in Relation to Potato Tuber Yield, Quality, and Crop N Recovery. *Sustainable Potato Production: Global Case Studies*, He Z, Larkin R & Honeycutt W (Édit.) Springer Netherlands, 10.1007/978-94-007-4104-1_10. p 165-186.
- Zebarth BJ, Drury CF, Tremblay N & Cambouris AN (2009) Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Canadian Journal of Soil Science* 89(2):113-132.
- Zebarth BJ, Rees H, Tremblay N, Fournier P & Leblon B (2003) Mapping spatial variation in potato nitrogen status using the N Sensor. *Acta Hort.* 627:267-273.
- Zebarth BJ & Rosen CJ (2007) Research perspective on nitrogen bmp development for potato. *Am. J. Pot Res* 84(1):3-18.
- Ziadi N, Zebarth B, Bélanger G & Cambouris A (2012) Soil and Plant Tests to Optimize Fertilizer Nitrogen Management of Potatoes. *Sustainable Potato Production: Global Case Studies*, He Z, Larkin R & Honeycutt W (Édit.) Springer Netherlands, 10.1007/978-94-007-4104-1_11. p 187-207.

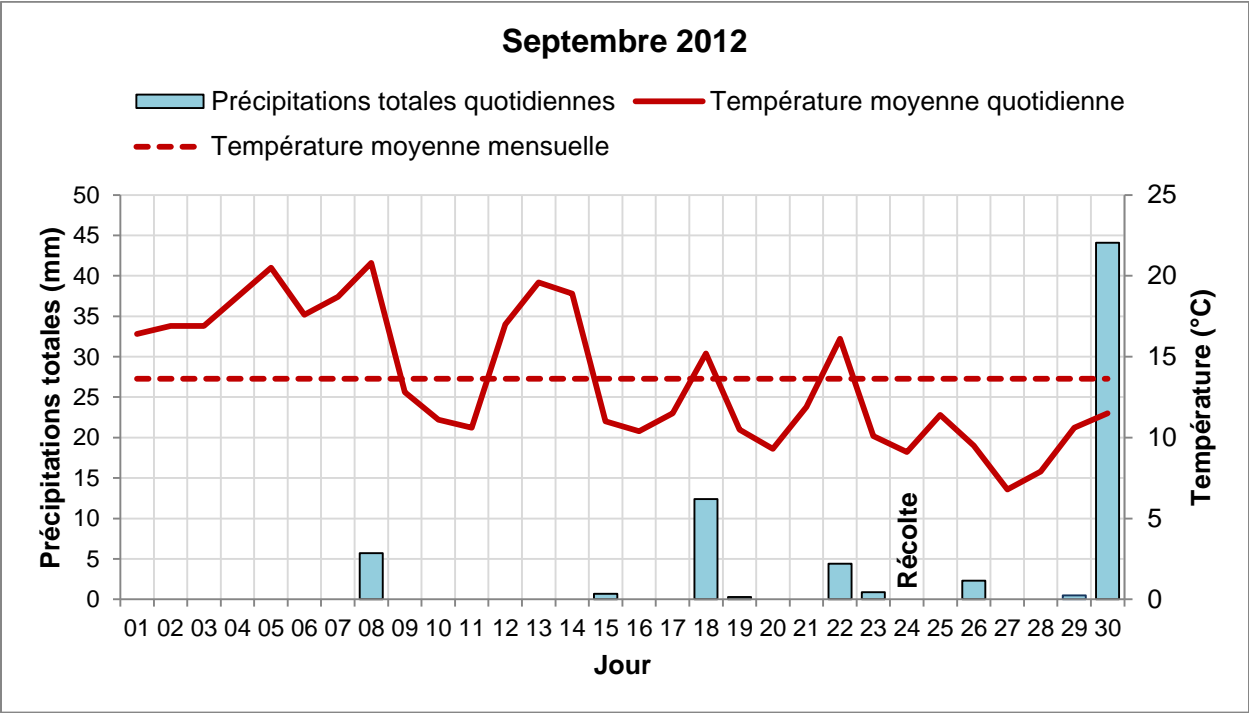
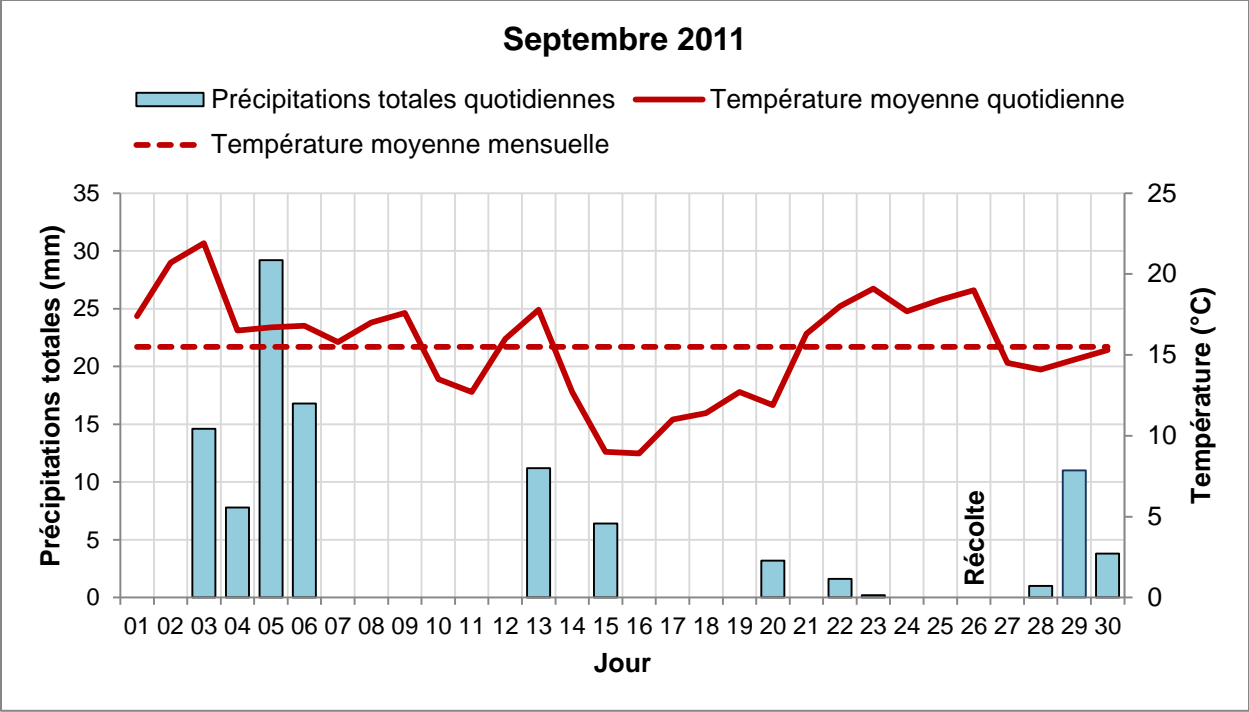
ANNEXE A : DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES QUOTIDIENNES



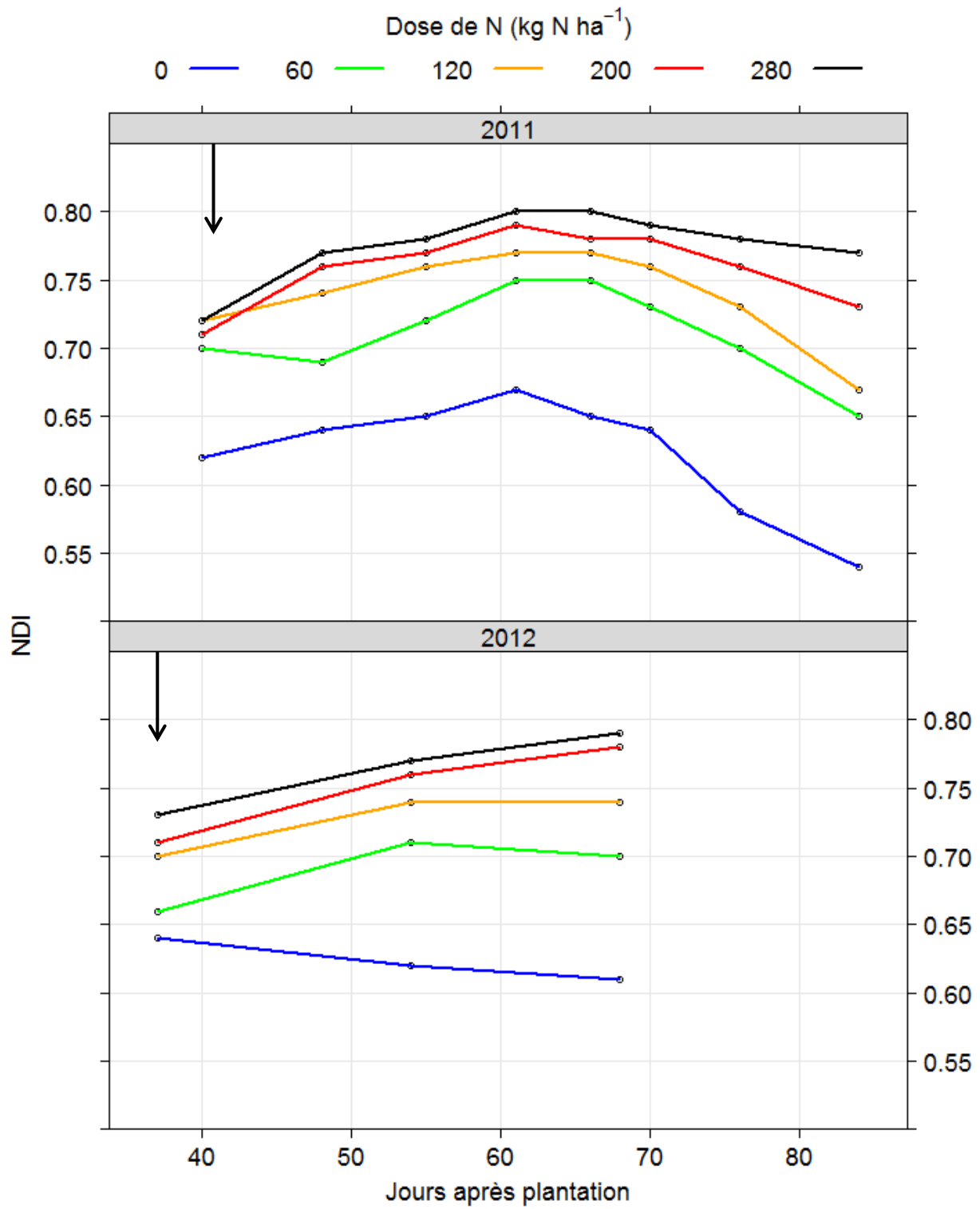




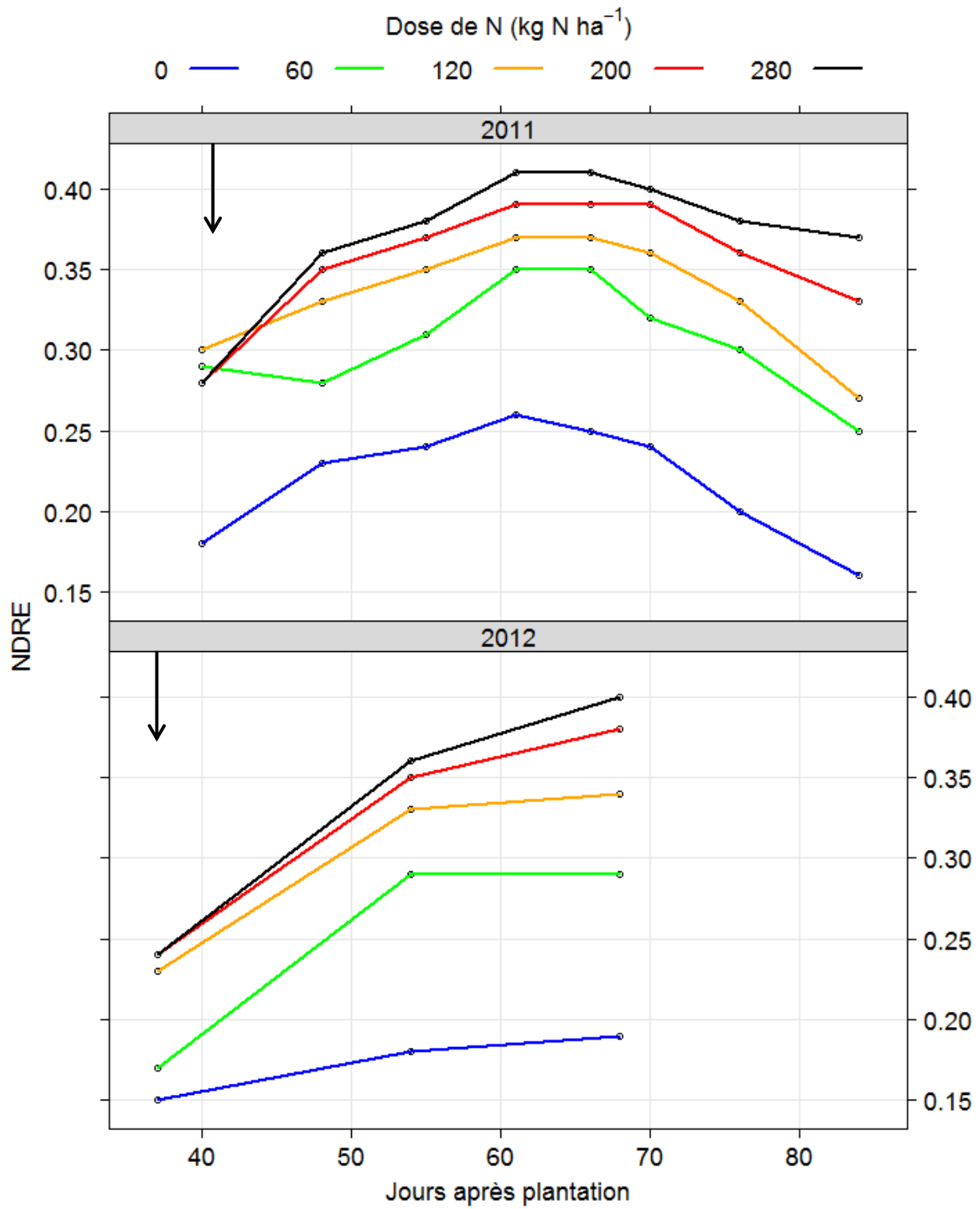




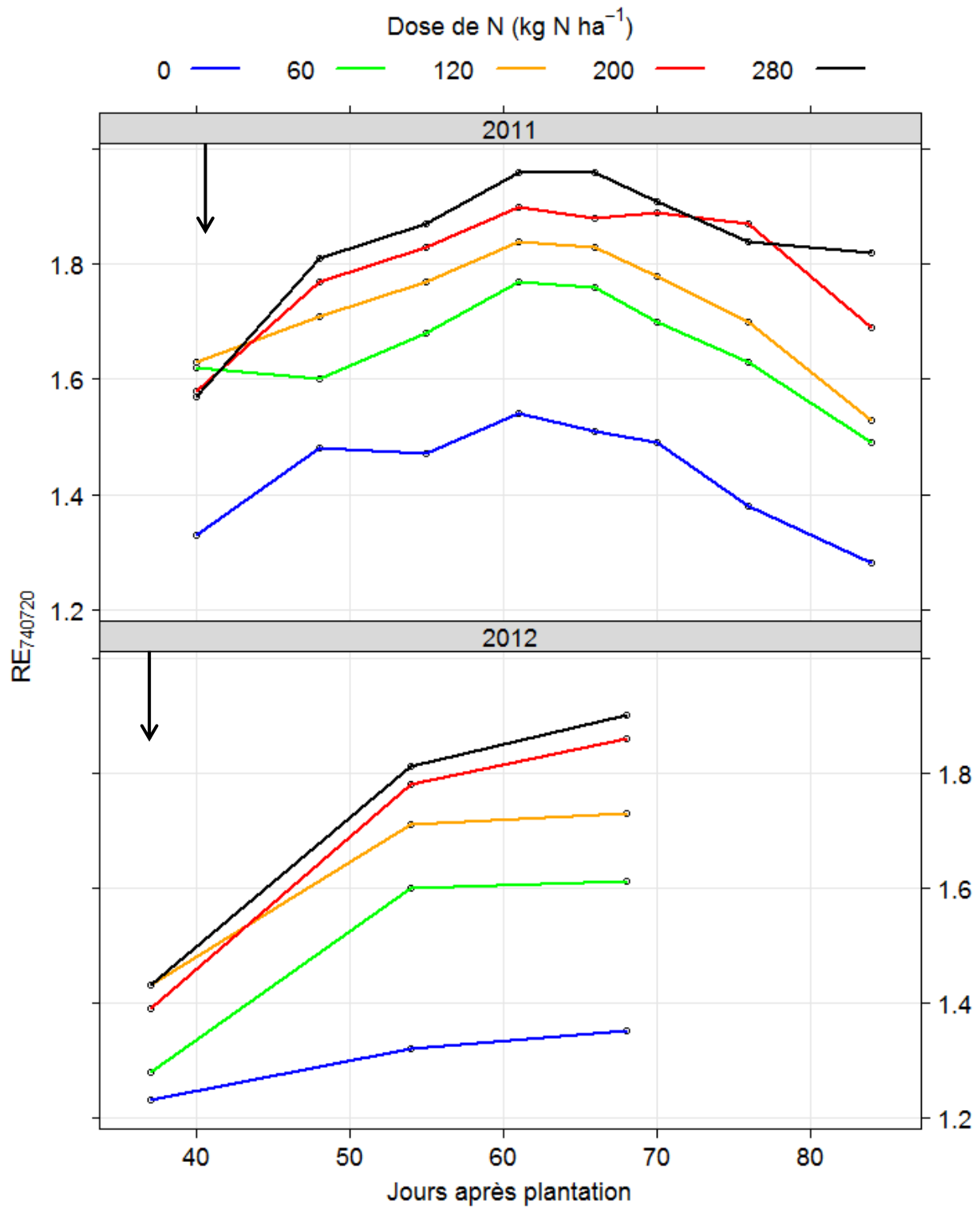
**ANNEXE B : ÉVOLUTION INTRASAISSONNIÈRE DES INDICES DE
VÉGÉTATION HYPERSPECTRAUX UTILISANT LE CHAMP DE
VISÉE 25° EN 2011 ET 2012**



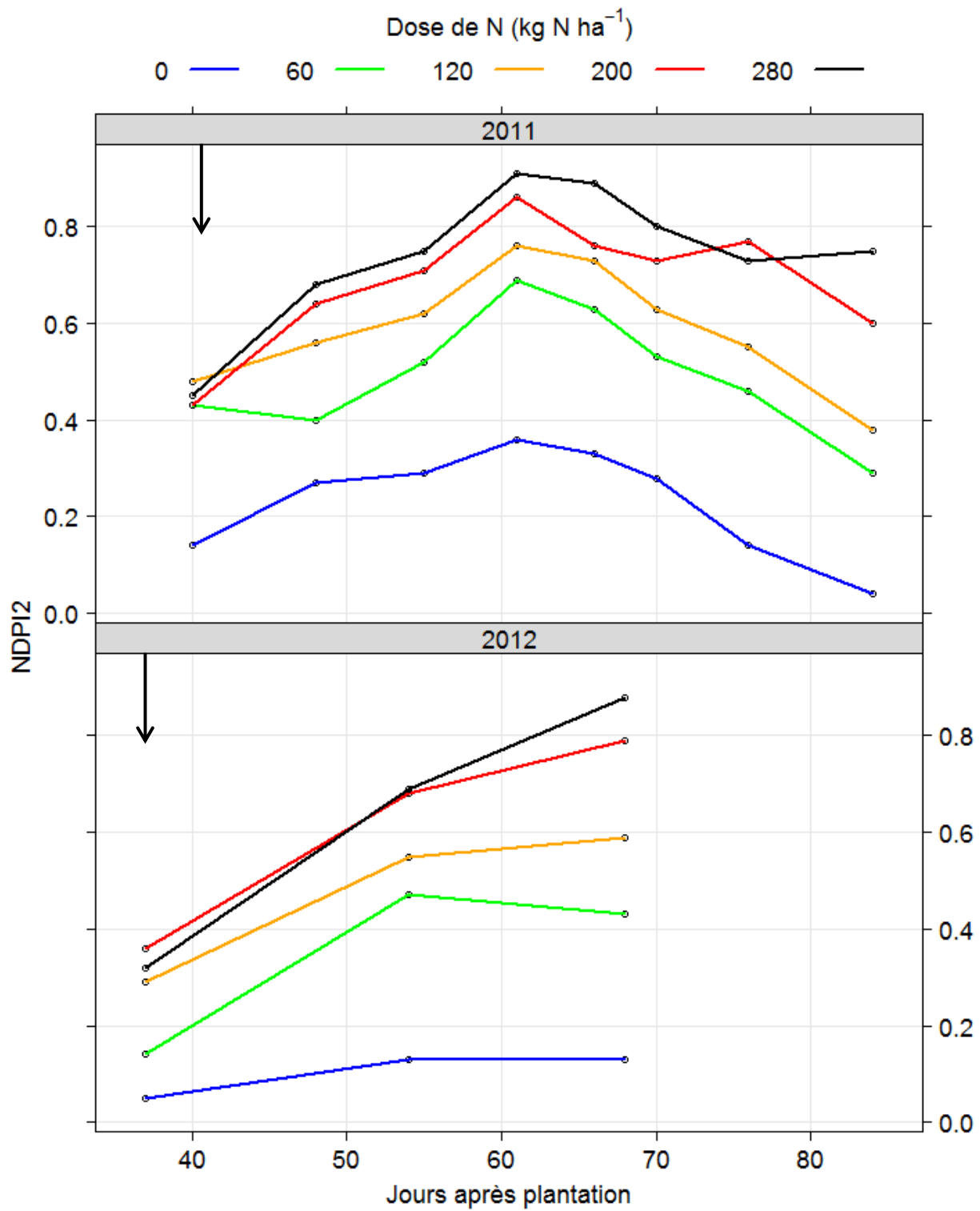
Note : Le moment du 2^e fractionnement des engrais azotés est identifié par la flèche.



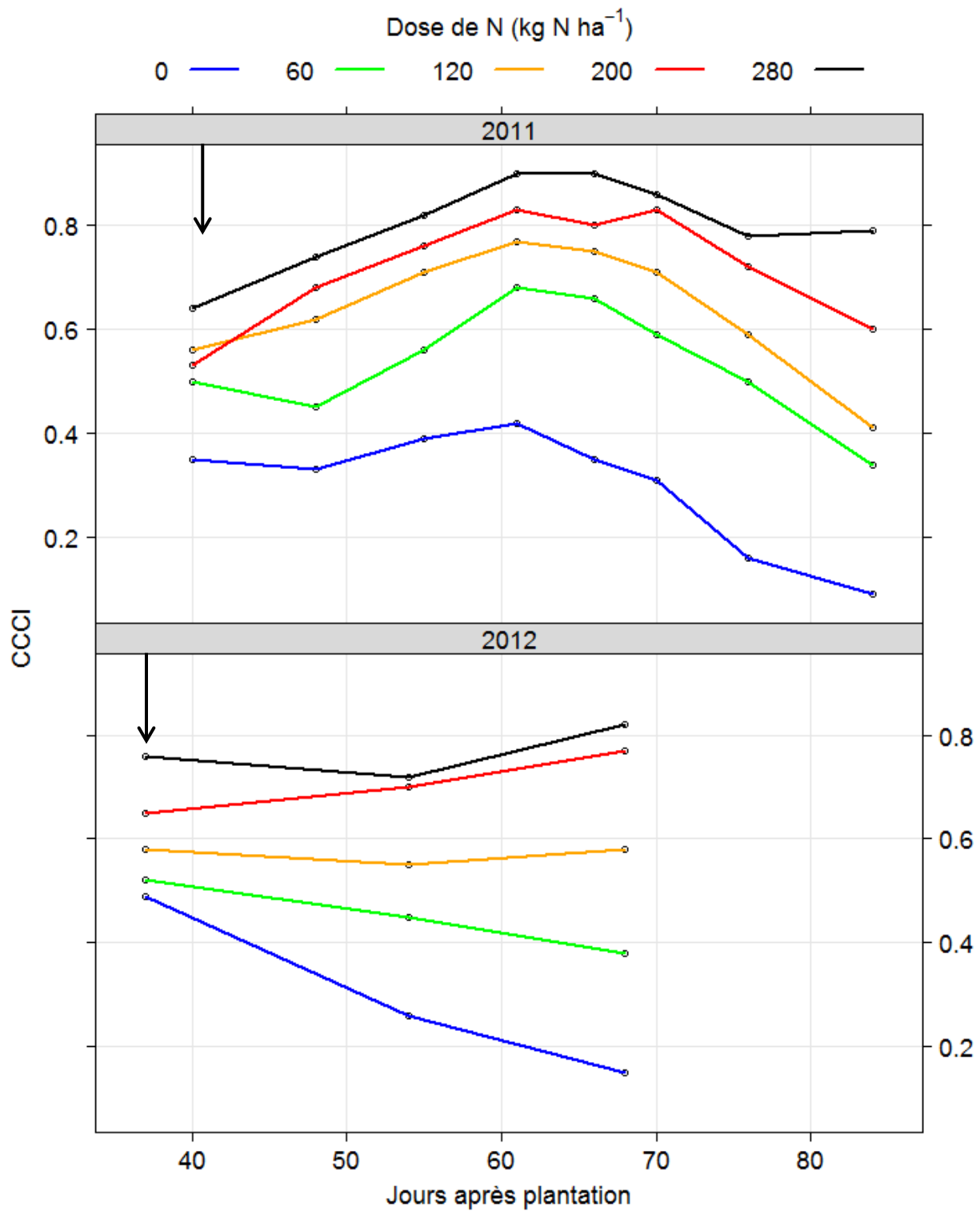
Note : Le moment du 2^e fractionnement des engrais azotés est identifié par la flèche.



Note : Le moment du 2^e fractionnement des engrais azotés est identifié par la flèche.



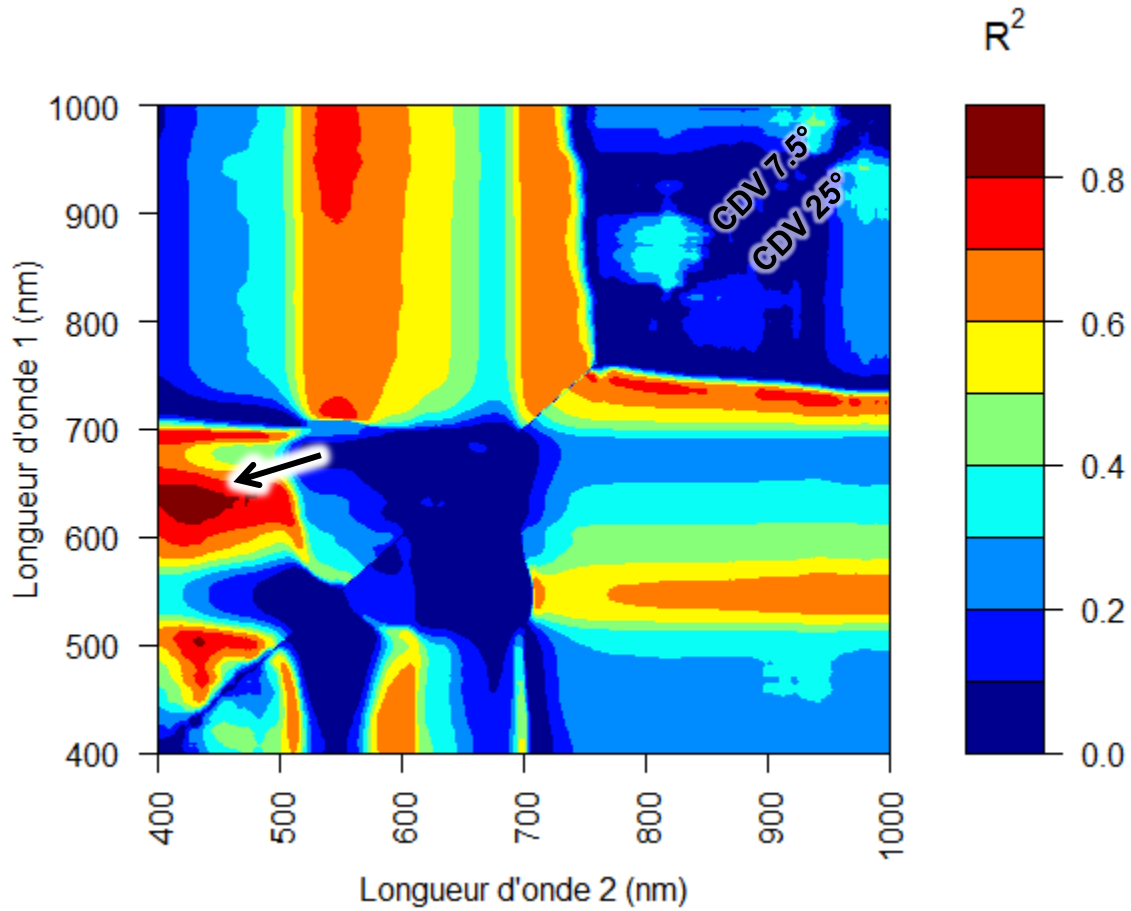
Note : Le moment du 2^e fractionnement des engrais azotés est identifié par la flèche.



Note : Le moment du 2^e fractionnement des engrais azotés est identifié par la flèche.

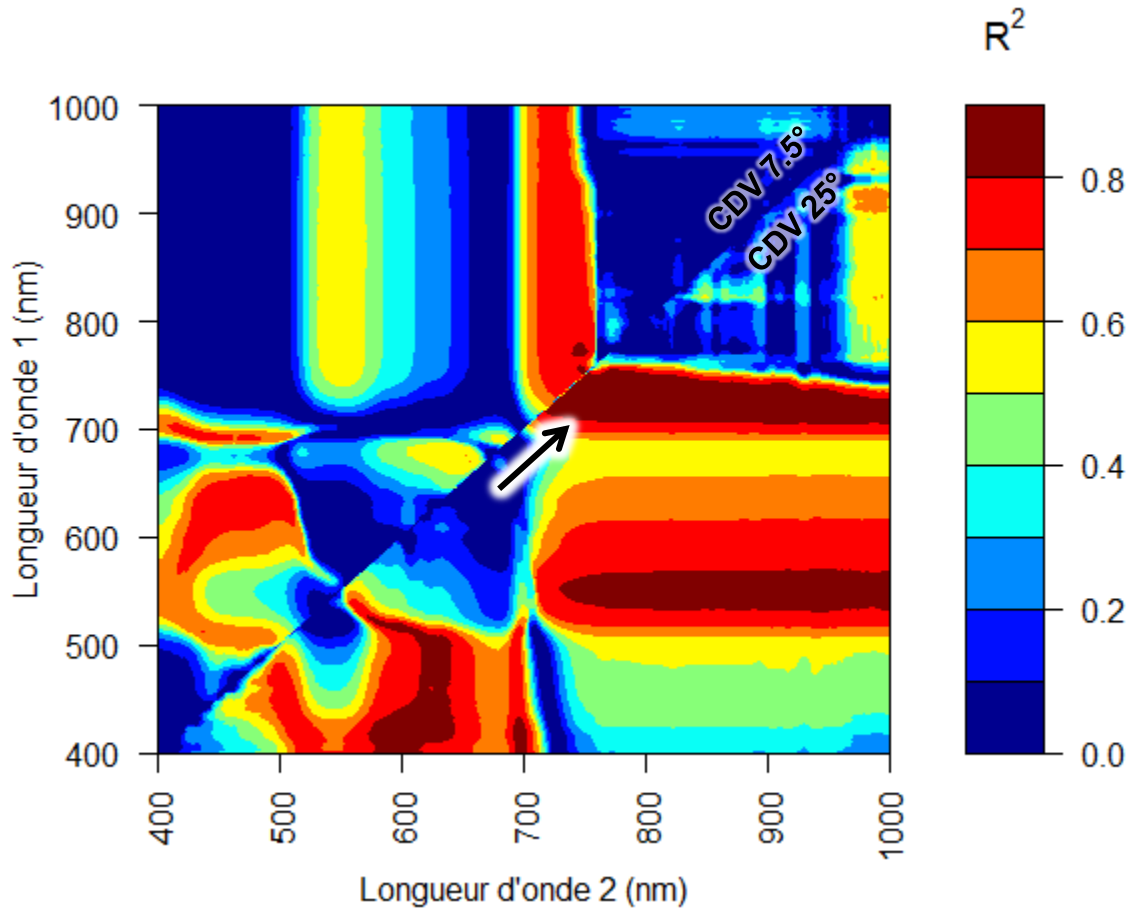
**ANNEXE C : MATRICES DE COEFFICIENTS DE DÉTERMINATION (R^2)
POUR LES RELATIONS LINÉAIRES ENTRE LE HTBVI ET L'INDICE
DE NUTRITION AZOTÉE À DIFFÉRENTES DATES EN 2011 ET 2012**

2011
40 JAP



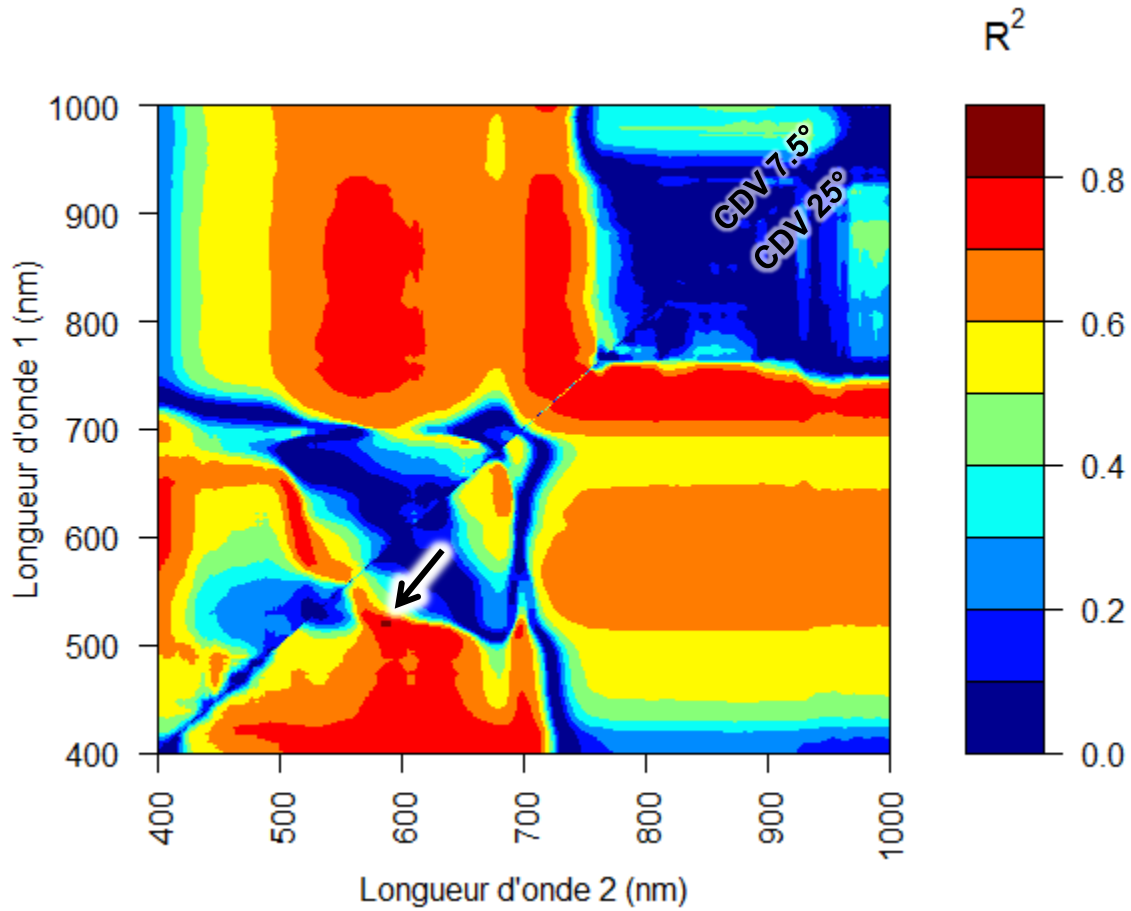
Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.

2011
55 JAP



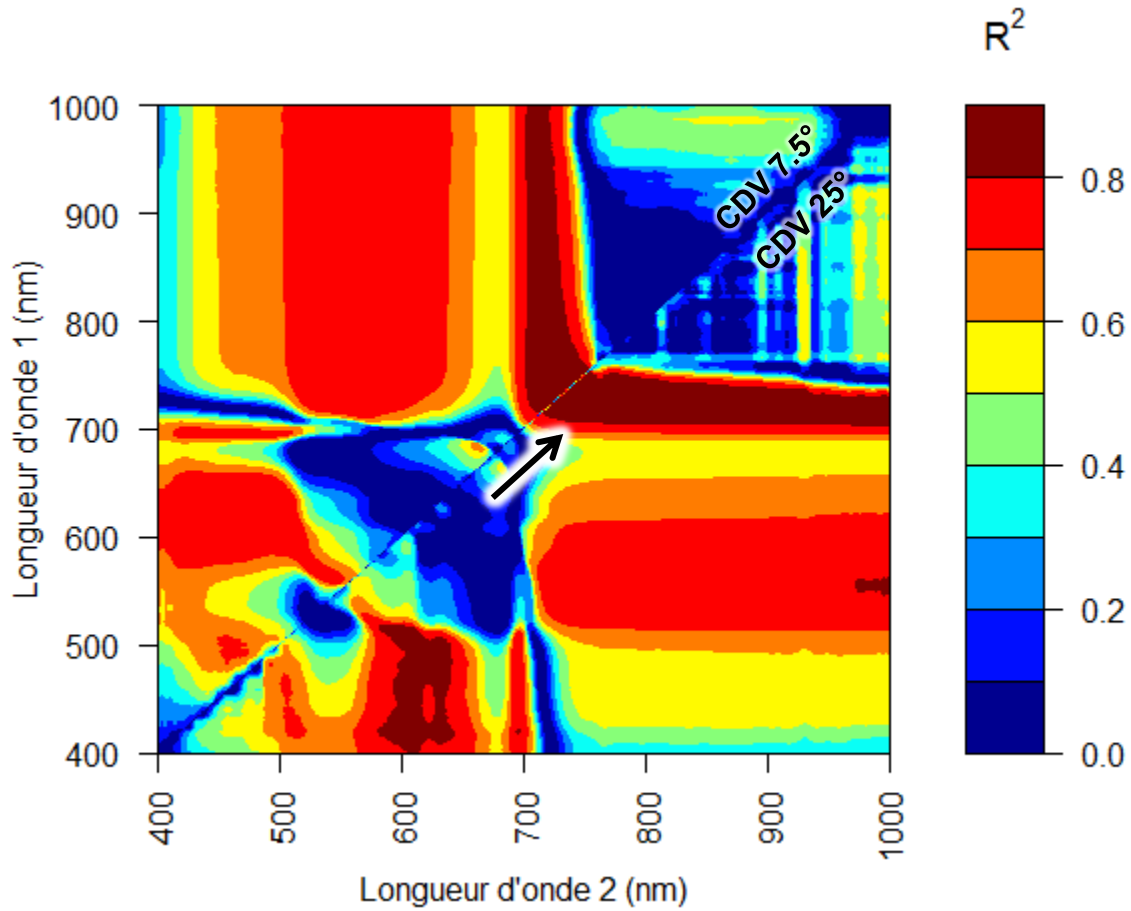
Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.

2011
70 JAP



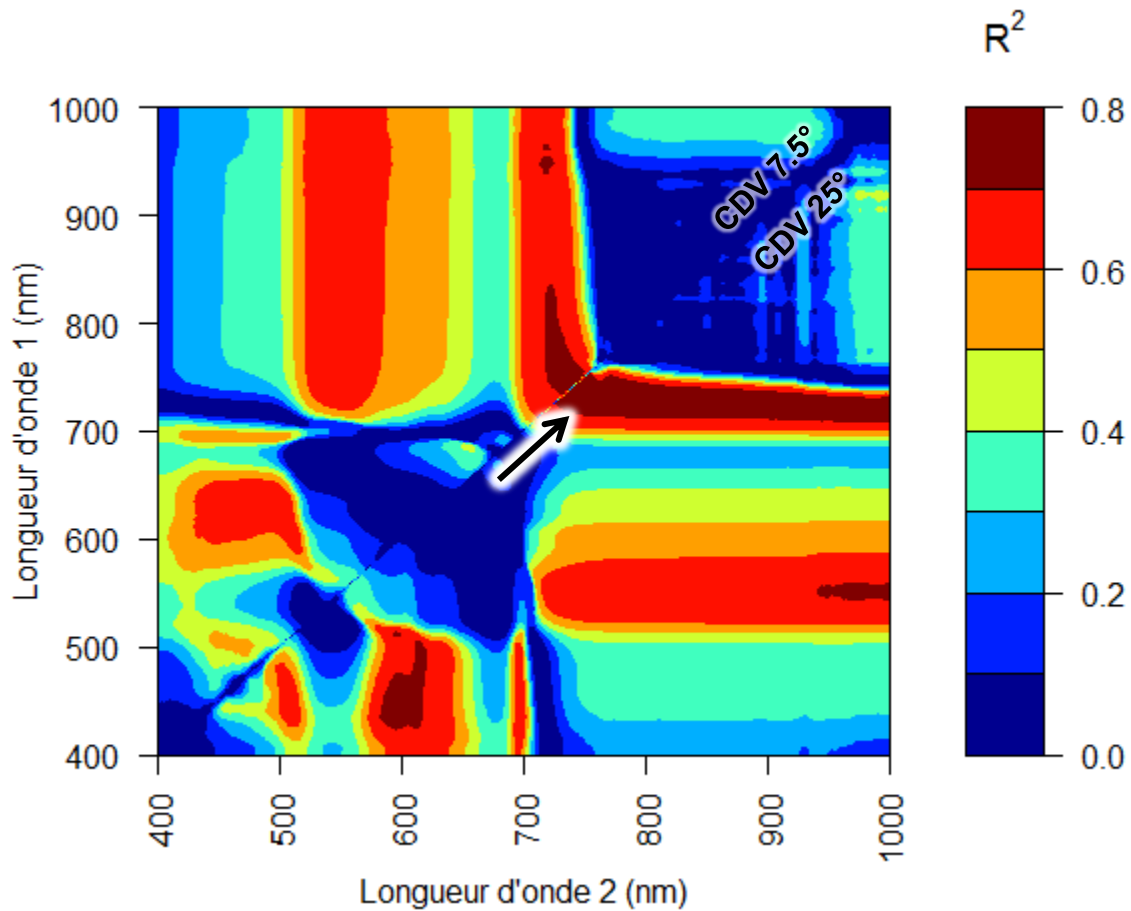
Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.

2011
84 JAP



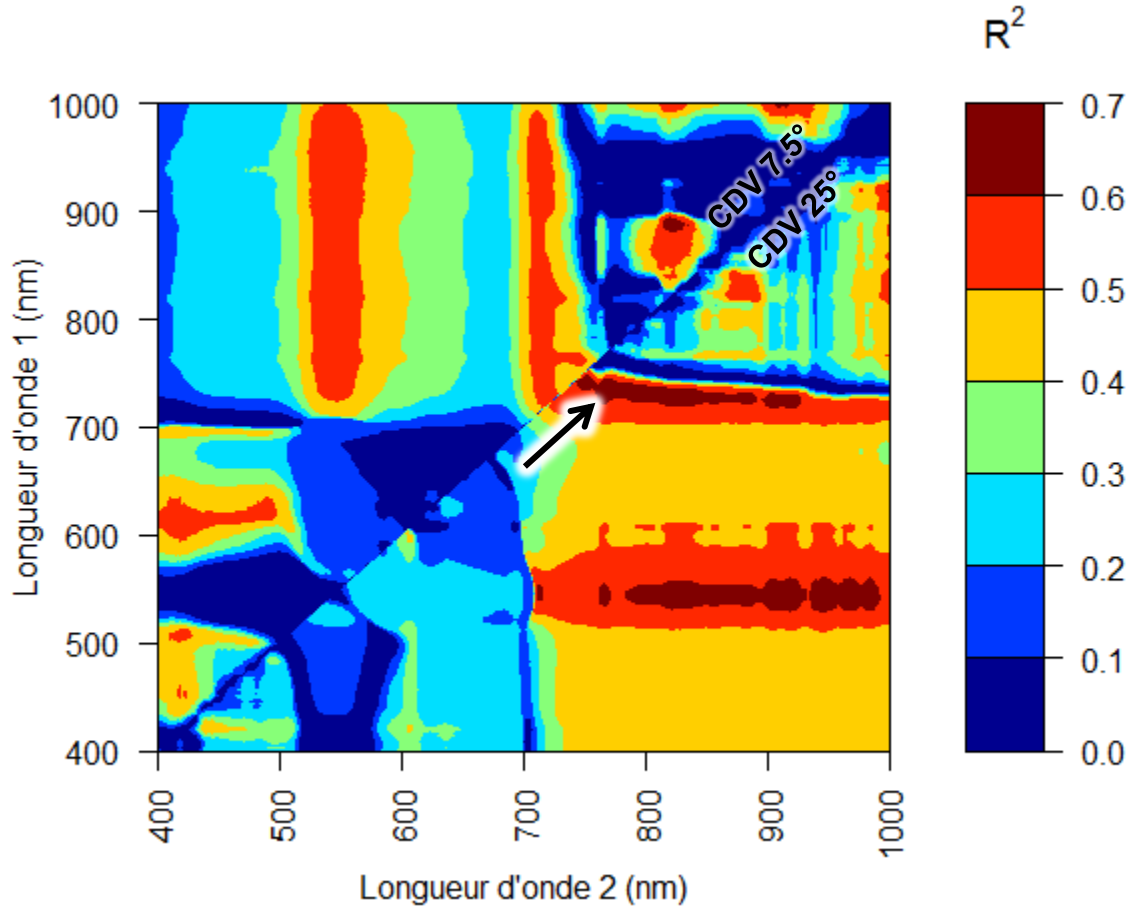
Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.

2011
40, 55, 70 & 84 JAP



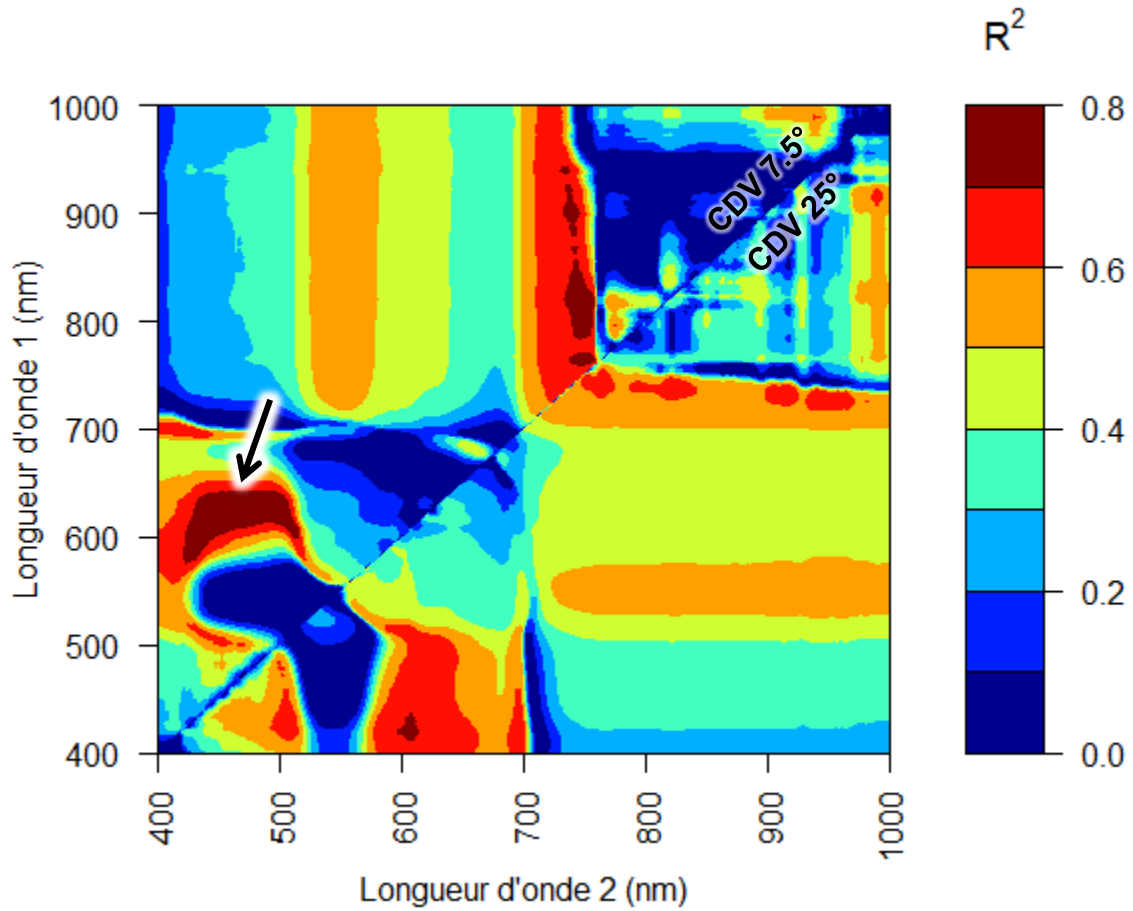
Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.

2012
37 JAP



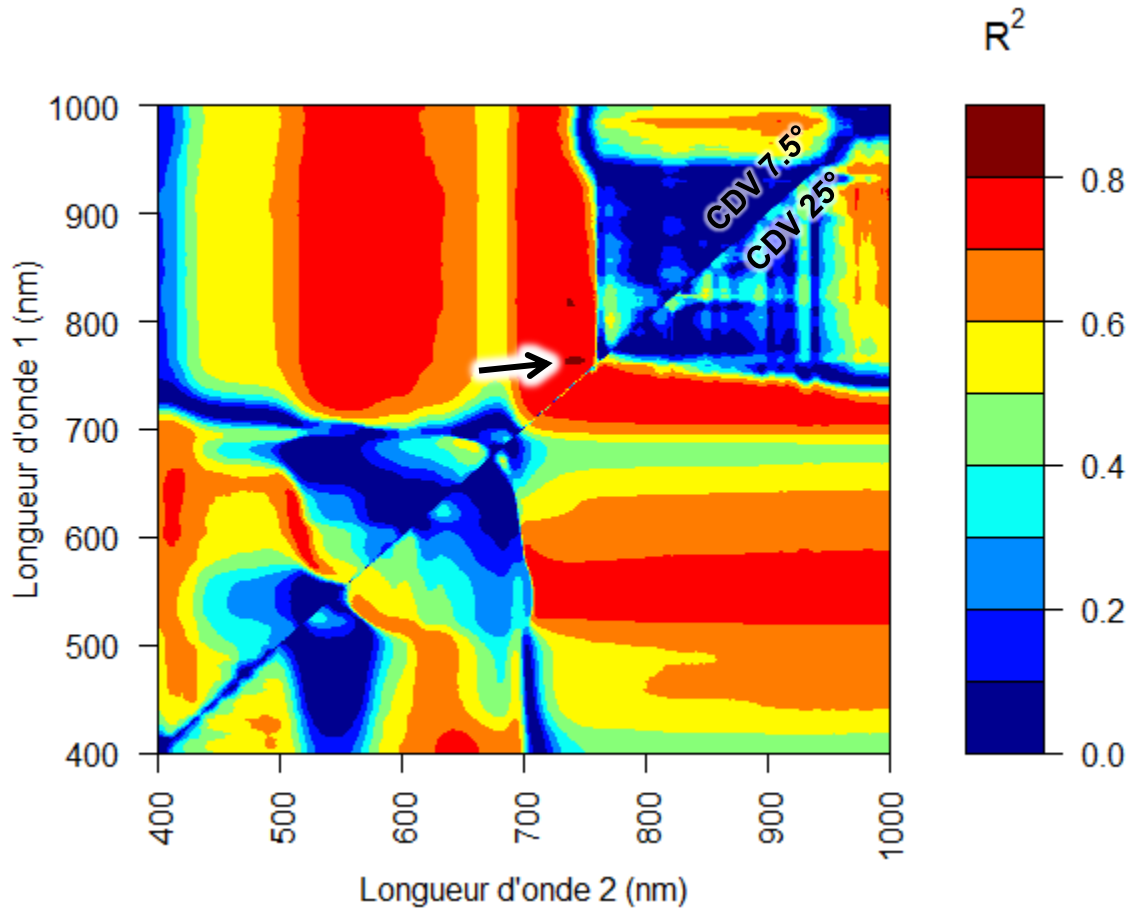
Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.

2012
54 JAP



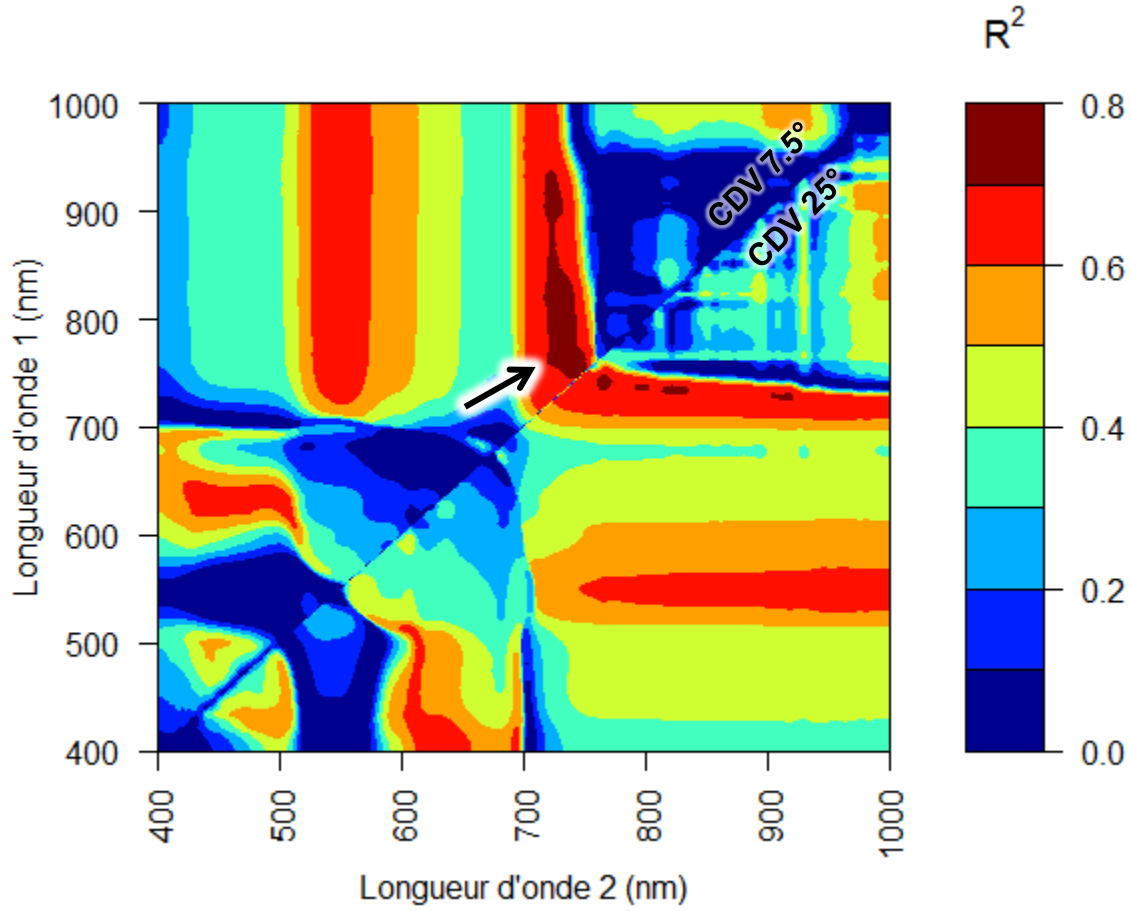
Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.

2012
68 JAP



Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.

2012
37, 54 & 68 JAP



Note : La région spectrale la plus corrélée à l'INA est identifiée par la flèche.