



HAL
open science

Phenotypage en plein champ : apports des techniques basées sur les propriétés spectrales du couvert

Pierre Roumet, Frederic Baret, Benoît de Solan, Martin Ecartot, Gilles Rabatel, N. Vigneau, Ingrid Vilms

► To cite this version:

Pierre Roumet, Frederic Baret, Benoît de Solan, Martin Ecartot, Gilles Rabatel, et al.. Phenotypage en plein champ : apports des techniques basées sur les propriétés spectrales du couvert. *Sélectionneur Français*, 2011, 62, pp.75-83. hal-02642726

HAL Id: hal-02642726

<https://hal.inrae.fr/hal-02642726v1>

Submitted on 28 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PHENOTYPAGE EN PLEIN CHAMP : APPORTS DES TECHNIQUES BASEES SUR LES PROPRIETES SPECTRALES DU COUVERT

P. Roumet¹, F. Baret³, B. De Solan^{3,4}, M Ecarnot¹, G. Rabatel², N.Vigneau², I Vilmus⁵,

1 Inra, UMR Agap, Montpellier

2 Cemagref UMR Itap, Montpellier

3 Inra, UMR Emmah, Avignon

4 Arvalis – Institut du végétal

5 Syngenta Seeds

RÉSUMÉ

Accéder plus facilement à des traits phénotypiques plus nombreux et suivre leur dynamique via des approches non destructives s'avère indispensable pour le développement de disciplines telles que l'agronomie, la génétique ou l'écophysiologie. Le couplage entre les progrès générés par ces connaissances disciplinaires (connaissance du génome, biologie de la plante entière, capacités adaptatives de la diversité génétique en interaction avec l'environnement), est essentiel pour contribuer à la définition des systèmes de culture de demain les plus appropriés. Le développement de nouvelles techniques de phénotypage s'inscrit dans ce cadre. Dans cette présentation nous étudierons les potentialités des méthodes de phénotypage basées sur l'utilisation des propriétés spectrales du couvert.

1 - INTRODUCTION

Au cours du cycle cultural, la plante va exprimer différentes caractéristiques liées à sa croissance ou à son développement reproducteur. Les valeurs mesurées pour ces traits dépendent de la phénologie de la plante, des caractéristiques agronomiques et physiques de l'environnement, et, bien sûr, de son génotype. La collecte de ces informations, le phénotypage, va mettre en oeuvre des techniques très différentes selon l'échelle de mesure (cellule, tissu, organe, plante, peuplement) et la nature du caractère mesuré (physique / biochimique notamment).

Le phénotypage va ainsi se situer à l'interface entre des disciplines telles que l'écophysiologie, l'agronomie et la génomique. Ces connaissances seront essentielles pour documenter les relations génotype / phénotype en interaction avec l'environnement, et préciser la gamme de variation des différents paramètres intervenant dans la modélisation éco physiologique.

Réussir ce couplage entre connaissance du génome, diversité génétique et fonctionnement de la plante implique que les dynamiques technologiques et conceptuelles pour chacune de ces disciplines progressent à des rythmes comparables. Malheureusement, l'évolution des techniques de phénotypage n'a pas suivi celle, très rapide, des technologies de génotypage / séquençage. Ces dernières permettent de disposer d'une quantité et d'une qualité d'informations qui nous incitent à faire évoluer fortement nos modes classiques d'évaluation agronomique. De fait, les techniques de phénotypage disponibles pour de grandes séries génotypiques ne permettent de mesurer facilement qu'un nombre réduit de caractères, souvent complexes (rendement en grains, biomasse, composition des tissus, descripteurs de l'état sanitaire), via des techniques destructives rendant impossible tout suivi temporel d'élaboration des traits concernés. Ce faible nombre de caractères mesurés, la complexité de leur élaboration, auxquels nous pouvons ajouter l'interaction avec les effets environnementaux, vont se conjuguer pour brouter les relations génotype / phénotype.

Le développement de techniques rapides, non invasives et non destructives, facilitant l'accès à des caractères nouveaux est donc une priorité afin d'accroître la pertinence des caractères mesurés, d'accéder aux variations temporelles et spatiales de l'expression de ces caractères.

Les techniques basées sur l'utilisation des propriétés spectrales des matrices (organes entiers, couverts végétaux) [encadré 1] ont ces potentialités : elles sont non destructives, rapides et non invasives. Elles offrent ainsi l'opportunité d'avoir un suivi temporel de l'élaboration d'un trait rendant possible l'analyse des gènes impliqués dans l'élaboration de ces caractères au cours des différentes phases de la vie de la plante.

Dans cet article nous aborderons successivement, 1) les techniques basées sur l'imagerie et la proxi-détection et les échelles concernées, 2) les principales approches pour modéliser et interpréter le signal spectral, et 3) différents exemples illustrant ces approches.

Encadré 1 : Spectroscopie proche infra rouge : Technologies et variables cibles

La spectrométrie visible et proche infra rouge se base sur l'utilisation du spectre électro magnétique compris dans l'intervalle de 400 à 2500 nm ; le proche infra rouge étant défini par l'American Society of Testing and Materials comme la région comprise entre 780 et 2526 nm (Reich, 2005).

Chacune des liaisons chimiques (CH, NH, OH, SH...) possèdent des bandes d'absorptions spécifiques dans cette gamme spectrale. L'absorption d'un rayonnement visible / infrarouge par le matériau analysé dans une de ces bandes d'absorption nous renseigne sur la composition de ce matériau pour cette liaison chimique. L'évolution technique depuis les années 90 a permis de disposer d'appareils permettant de travailler au laboratoire sur des composés broyés grossièrement, voire entiers (grains), afin d'en estimer différentes caractéristiques physiques ou biochimiques. Depuis un peu plus de 10 ans des appareils peuvent être embarqués sur des engins de récolte et travailler directement « on line » au cours des chantiers de récolte (Montes et al, 2007).

Il y a moins de 10 ans sont apparus les spectromètres portables ; ils correspondent à des déclinaisons transportables ou portables des spectromètres de laboratoire. Du fait de leur robustesse, ils peuvent être utilisés en plein champ, en serre, en chambre de culture. Ces appareils sont dotés de leur propre source lumineuse et travaillent avec des gammes spectrales étendues allant de 350 nm jusqu'à 2500 nm. Ils sont utilisés principalement pour des collectes de scans à l'échelle de l'organe. A ce jour, les calibrations développées avec ces appareils concernent la teneur en azote, la chlorophylle, l'efficacité de fonctionnement de l'appareil photosynthétique, la sénescence, la masse surfacique.

Cette technique peut être couplée à des imageurs. Ces derniers peuvent être très simples (appareils photographiques classiques équipés avec des grands angles), voire plus complexes. Dans ce derniers cas, il est possible d'obtenir des images sur des gammes de plages spectrales plus étendues (400-1000 nm et 1000-2000 nm, voir dans l'infra rouge thermique). Contrairement aux systèmes précédents (spectroscopie seule), ils permettent d'obtenir des données spectrales à l'échelle du pixel et non de la matrice, ce qui permet de spatialiser l'information à l'échelle d'une parcelle ou d'une plate forme. Ces systèmes ne sont pas dotés de source lumineuse interne. Ils peuvent être embarqués sur des vecteurs différents (terrestres, aériens) permettant des collectes de données à des échelles spatiales variables. Les variables cibles diffèrent selon les technologies : paramètres d'architecture du couvert (LAI, angle d'insertion foliaire), fraction de rayonnement photosynthétiquement actif absorbé par le couvert (fAPAR), température foliaire, teneurs en azote, en chlorophylle.

2 - PROPRIETES OPTIQUES DES FEUILLES ET TECHNIQUES BASEES SUR L'IMAGERIE ET LA PROXI-DETECTION ET LES ECHELLES CONCERNEES.

Les caractéristiques optiques d'une feuille sont déterminées par sa structure interne, le contenu de ses constituants absorbants (pigments, eau, etc.) mais aussi par son état de surface. Ces propriétés optiques caractérisent la capacité des feuilles à absorber, réfléchir ou transmettre la lumière. La figure 1 présente un spectre de réflectance représentatif des propriétés optiques d'une feuille verte.

Dans le visible (400-750 nm), la réflectance est très faible du fait de la forte absorbance des pigments foliaires. Dans le proche IR, les phénomènes d'absorption restants sont liés principalement à la structure anatomique des feuilles : réflexion de surface et diffusion interne due aux structures cellulaires. La zone de transition entre ces deux domaines spectraux, le 'red edge' (680-750 nm) est très abrupte. Au delà de 1400 nm, le domaine du moyen infrarouge est principalement marqué par l'absorption par l'eau liquide avec des pics d'absorption aux longueurs d'ondes 1450, 1950 et 2500 nm. Au cours de la sénescence, ces pics absorptions deviennent beaucoup moins marqués du fait du dessèchement des feuilles.

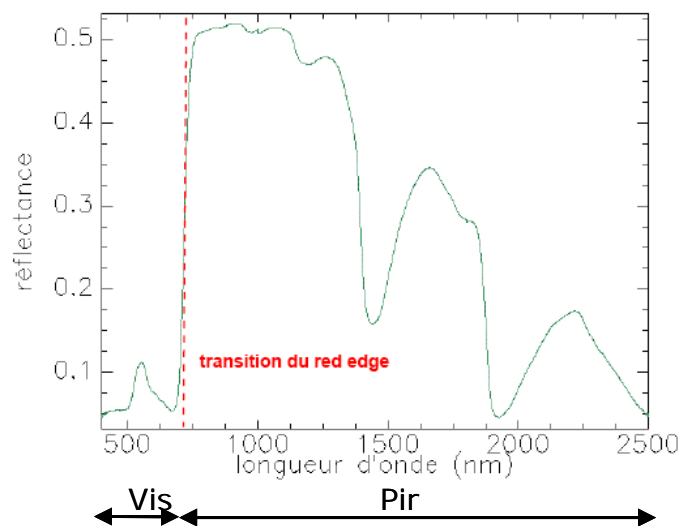


Figure 1 : Propriétés spectrales d'une feuille photosynthétiquement active : réflectance dans le visible et le proche infra rouge (Vis / Pir : régions correspondant aux rayonnements visible et proche infra rouge définis par l'American Society of Testing and Materials)

Parmi les outils disponibles, nous distinguerons les systèmes dits actifs ou passifs, (dotés ou non de leur propre source lumineuse), imageurs ou non, échantillonnant le spectre de manière continue ou non. En fonction des outils retenus, la collecte spectrale va s'effectuer à différentes échelles spatiales : organe, groupe de plantes, parcelle élémentaire ou plateforme.

3 - ACQUISITION ET NORMALISATION DU SIGNAL

3.1 - Systèmes passifs / actifs

Les appareils dits « passifs » ne sont pas dotés de leur propre source lumineuse et utilisent la lumière solaire. Cette source n'est constante ni dans le temps ni dans l'espace (intensité, direction d'incidence, fraction diffuse, zones ombrées / éclairées au sein du couvert). Le signal enregistré par le capteur –la luminance- va donc être fonction des propriétés optiques de la végétation, de l'éclairage reçu, et des propriétés du capteur. Pour comparer les données collectées sur couverts végétaux, et accéder aux propriétés intrinsèques de réflectance de chacun de ces couverts, il va être nécessaire de corriger le signal reçu. La prise en compte des propriétés du capteur, et la présence dans chaque scène d'une référence interne dont les propriétés optiques sont connues permet de normaliser cette information (Vigneau, 2010).

Contrairement aux précédents, les systèmes « actifs » ont leur source lumineuse ; ils ne sont donc pas soumis aux mêmes contraintes. Les mesures en réflectance sont directement normalisées et exploitables.

3.2 - Les vecteurs

L'observation à partir de capteurs embarqués sur des avions ou des drones permet d'embrasser dans une même image une plateforme expérimentale complète avec une résolution spatiale (taille des points élémentaires de l'image) de l'ordre de quelques centimètres, ou quelques dizaines de centimètres, compatible avec la taille des parcelles (de l'ordre de la dizaine à quelques dizaines de m²). Dans un avenir proche, cette capacité permettra sans aucun doute d'apporter des solutions intéressantes notamment sur les aspects liés au débit de ces mesures. Toutefois, la nouveauté des systèmes d'acquisition nécessite des étalonnages qui doivent, dans un premier temps, permettre :

- i*) de quantifier l'impact des paramètres architecturaux sur les propriétés optiques des couverts végétaux ;
- ii*) de mesurer de façon précise différentes caractéristiques de la culture comme la surface foliaire ou le contenu en chlorophylle, et
- iii*) d'accéder à des caractéristiques liées à la distribution spatiale des paramètres qui constituent une information jusqu'à maintenant non accessible. Les chaînes opérationnelles, ou actuellement en test, utilisent principalement des vecteurs terrestres (tel que la Phenomobile développée par le Csiro), ou des appareils portables.

4 - INTERPRETATION DU SIGNAL

4.1 - Statistique

Des indices de végétation basés sur des rapports entre les données spectrales mesurées à différentes longueurs d'ondes ont été construits pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse, l'indice de surface foliaire, la fraction de rayonnement photosynthétique actif, *etc.* L'indice le plus ancien –et le plus connu– est le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, Rouse et Haas, 1973). Cet indice, basé sur les propriétés d'absorption de la feuille est construit à partir de données collectées dans la zone spectrale d'absorption de la chlorophylle (N_{red}) et du proche infra rouge (N_{nir}). Ainsi, $NDVI = \frac{N_{nir} - N_{red}}{N_{nir} + N_{red}}$. Il permet de caractériser la végétation et va avoir des valeurs qui tendent vers 1 pour les pixels contenant uniquement des végétaux photosynthétiquement actifs. De nombreux autres indices ont été proposés, (Girard et Girard, 1999 pour revue).

L'imagerie hyperspectrale et les spectro-radiomètres de terrain donnent accès à plusieurs centaines de bandes spectrales et dans de nombreux cas, l'utilisation d'indices apparaît comme une approche trop réductrice pour valoriser cette abondante information. Les approches correspondant à des régressions basées sur l'exploration de l'ensemble de la gamme spectrale sont classiquement utilisées. Afin de prendre en compte les propriétés de la matrice incidente (dimension importante, présence de corrélations entre les données spectrales), les approches multivariées et, en particulier, la PLS (*Partial Least Square Regression*) sont les plus fréquentes. La PLS génère des variables latentes, non corrélées entre elles, qui sont utilisées dans la régression. Les relations entre les combinaisons linéaires des variables latentes et les données à prédire sont testées sur un jeu de données partitionné en 2 sous ensembles : un jeu d'étalonnage sur lequel l'opérateur va construire la relation entre données spectrales et variables à prédire, et, un jeu de validation utilisé pour tester cette relation. En sortie, des statistiques mesurant l'adéquation entre données prédites et observées (R^2), l'erreur moyenne de prédiction (SE) en relation entre le nombre de variables latentes utilisées dans le modèle, le biais, les ratios entre écart type de la variable Y à prédire et le SE, seront calculés. Évaluées sur les jeux d'étalonnage et/ou de validation, elles permettront de juger de la pertinence (robustesse, précision) du modèle statistique construit.

4.2 - Physique : Les modèles de transfert radiatif

La structure du couvert décrite principalement par la surface des éléments (feuilles, tiges, épis), leur orientation et arrangement spatial détermine, d'une part, la transmission de la lumière

jusqu'au sol et, d'autre part, la fraction de rayonnement solaire réfléchi par la culture (réflectance). Cette dernière est donc dépendante de la lumière incidente, de la structure du couvert ainsi que des propriétés optiques des éléments qui varient, en particulier, selon leur contenu en chlorophylle.

La modélisation de la réflectance de la végétation peut se faire à l'échelle du couvert ou de la feuille. Cette matrice détermine la résolution spatiale : la canopée, comme la feuille, sont considérées dans leur ensemble et non pas point par point. Parmi tous les modèles de transfert radiatif à l'échelle de la feuille, le modèle PROSPECT (Jacquemoud et Baret, 1990) est très couramment utilisé. Pour le couvert, le modèle de référence est SAIL ; un couplage entre SAIL et PROSPECT a été proposé par Jacquemoud et al., (2006).

Les paramètres d'entrée de ce modèle décrivent l'état physiologique (pigments chlorophylliens, teneur en eau, structure cellulaire) et ne donnent pas accès directement à des indicateurs agronomiques (azote par ex). Les modèles sont plus généralement utilisés en mode inverse : l'approche consistera à identifier la valeur d'un, ou plusieurs, paramètres physiologiques à partir d'un signal de réflectance enregistré.

5 - EXEMPLES D'APPLICATIONS : SPECTROMETRIE ET IMAGERIE HYPERSPECTRALE

Le dispositif mis en place à l'Inra de Montpellier avait pour objectif de développer des systèmes permettant l'acquisition de données spectrales sur des dispositifs de plein champ à différentes échelles spatiales : l'organe, la parcelle élémentaire et la plateforme. Nous n'évoquerons ici que les 2 premiers points. Pour les aborder, deux types d'équipements ont été utilisés : spectromètres portables (système actif), caméra hyperspectrale (système passif). Dans le premier cas, les spectromètres commerciaux ont été directement utilisés tels quels.

Par contre, l'utilisation de la caméra Hyperspectrale (Hypex 1600, Norsk Electro Optik, Norvège), une nouveauté technologique jamais exploitée encore dans le contexte de proxi-détection en extérieur, a nécessité la mise en place d'une chaîne d'acquisition (Figure 2). Cette chaîne permettait l'acquisition des images à deux dimensions lors du déplacement de la caméra le long d'un rail support motorisé.

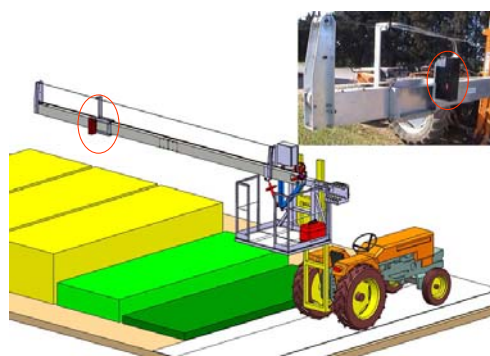


Figure 2 : Conception et réalisation de la chaîne d'acquisition faites par le Cemagref. La caméra hyperspectrale est entourée d'un cercle rouge.

5.1 - Prédiction de la teneur en azote foliaire à l'échelle de l'organe

Les spectres foliaires obtenus à l'aide d'un spectromètre de terrain (ASD LabSpec®) ont été traités avec une approche de type PLS. Nous avons obtenu un étalonnage unique pour prédire la teneur en azote foliaire pour l'espèce blé dur (*Triticum turgidum ssp*) ; il a été validé sur un échantillon de

génotypes représentant la diversité génétique de l'espèce et s'est avéré robuste vis-à-vis d'une large gamme de situations culturales. L'adéquation entre les données prédites par le modèle et les mesures directes d'azote foliaire est très correcte ($R^2 > 0.92$). Cette calibration, qui sera étendue prochainement à d'autres espèces, permet de caractériser la dynamique de cet azote foliaire notamment au cours de la phase de post floraison (Figure 3).

L'analyse génétique de ce caractère, ainsi que l'étude des relations avec l'expression de la teneur en protéines du grain deviennent ainsi possibles sur des populations représentant des effectifs de plusieurs centaines de génotypes.

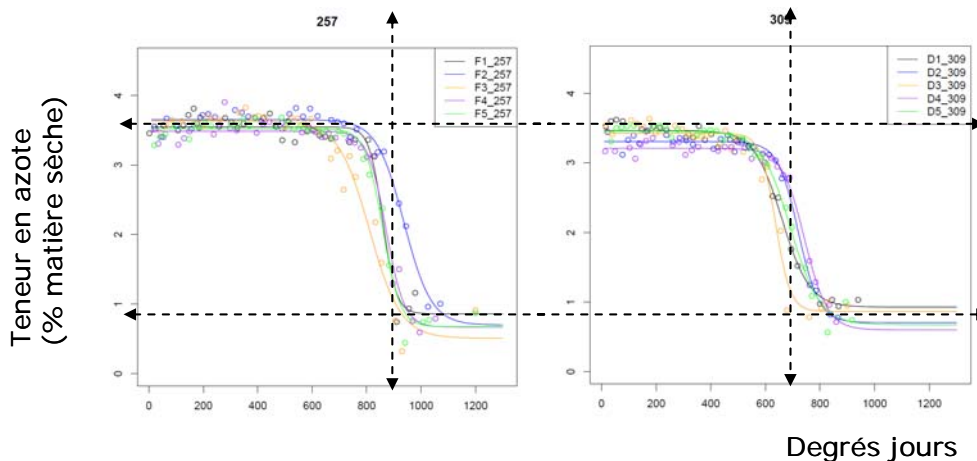


Figure 3 : Dynamique de la résorption d'azote de 2 génotypes de blé dur (5 répétitions/ génotype). Les mesures ont été effectuées de la floraison (t=0) jusqu'à la maturité du grain sur la feuille drapeau.

5.2 - Prédiction de la teneur en azote foliaire à l'échelle du peuplement

A l'aide de la chaîne opérationnelle décrite ci-dessus (Figure 2), les données spectrales ont été traitées afin de développer des indicateurs liés à la nutrition azotée d'un couvert de blé (Vigneau et al., 2011). Les difficultés liées à la gestion du système passif utilisé ont été prises en compte *via* différentes corrections basées notamment sur l'utilisation d'une référence interne calibrée pour ses propriétés radiométriques. Compte tenu de la nouveauté du système utilisé, des étalonnages ont été développés pas à pas sur des matrices de complexité croissante : feuilles excisées, plantes isolées et en situation de peuplement. L'ajustement aux données observées des différents modèles statistiques obtenus s'est révélé satisfaisant ($0.875 < R^2 < 0.903$) ; il permet d'envisager l'utilisation de cette chaîne pour acquérir des informations en proxi-détection. Des expérimentations complémentaires sont en cours afin de compléter le référentiel utilisé, de réduire l'erreur de prédiction et de générer des relations statistiques robustes.

6 - EXEMPLES D'APPLICATIONS : IMAGERIE ET SPECTRO RADIOMETRIE

6.1 - Description du système

Un prototype a été construit et expérimenté sur la plateforme expérimentale de l'INRA de Toulouse. La configuration géométrique et spectrale (choix des bandes de longueur d'onde) du système de mesure a été optimisée pour accéder de manière précise et robuste à la surface foliaire verte et au contenu en chlorophylle. Il est composé de (Figure 4) :

- Deux appareils photographiques dont l'un est disposé verticalement et l'autre incliné à 57° par rapport à la verticale et orienté perpendiculairement aux rangs permettent de mesurer les fractions

vues de végétation verte et de sol nu. Les flashes permettent d'obtenir des images de bonne qualité indépendamment des conditions d'éclairage.

- Trois spectroradiomètres sensibles au rayonnement visible (400-700nm) et proche infrarouge (700-900nm) dont l'un est disposé verticalement et les deux autres inclinés à 57° et orientés en opposition perpendiculairement aux rangs. Un quatrième spectroradiomètre mesure le rayonnement incident de manière à calculer la réflectance (rapport entre les rayonnements réfléchi et incident).

Les mesures sont réalisées à la 'volée' à environ 2km/h. Il faut donc environ une heure pour échantillonner une centaine de parcelles.



Figure 4 : Le système supportant 3 spectroradiomètres et 2 appareils photos équipés de flashes, le tout porté par un tracteur.

6.2 - Premiers résultats : Estimation de la surface foliaire verte

Cette surface foliaire verte détermine le potentiel photosynthétique de la culture. L'exploitation des images prises à 57° permet d'estimer de manière précise la surface foliaire verte de la culture. La figure 5 montre en effet une très bonne relation entre la fraction de surface verte mesurée sur le terrain et celle estimée à partir des images numériques. La dynamique de la surface foliaire renseigne également sur la phénologie des cultivars mais aussi sur leur fonctionnement, voire leur susceptibilité aux maladies qui réduisent la surface foliaire verte. La combinaison des photographies prises verticalement et à 57° offre l'avantage de mieux caractériser le port foliaire et de réaliser ainsi une typologie variétale. Ces informations sont importantes pour évaluer la capacité du couvert à absorber la lumière solaire (potentiel de photosynthèse, recouvrement pour les mauvaises herbes), mais aident également à interpréter les mesures de réflectance des spectroradiomètres.

6.3 - Estimation du contenu en azote *via* le contenu chlorophyllien : approche par construction et combinaison d'indices de végétation

Si les mesures spectroradiométriques sont principalement sensibles au contenu en chlorophylle, elles permettent d'accéder au contenu en azote au travers des relations fortes entre azote et chlorophylle. La figure 6 montre la capacité du système à estimer la quantité d'azote de la culture de manière non destructive et rapidement. Des travaux complémentaires sont en cours pour améliorer la précision de l'estimation, en prenant en compte de manière plus explicite les relations entre chlorophylle et azote au niveau des feuilles, la distribution de l'azote dans la plante et les effets dus aux différences variétales de structure sur le signal réfléchi.

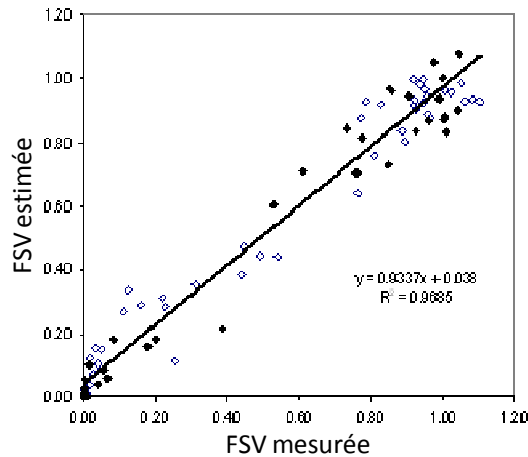


Figure 5 : Comparaison entre les fractions de surface verte (FSV) mesurées (planimétrie couplée à une notation visuelle dynamique au cours de la phase post floraison du blé) et celles estimées à partir des photographies.

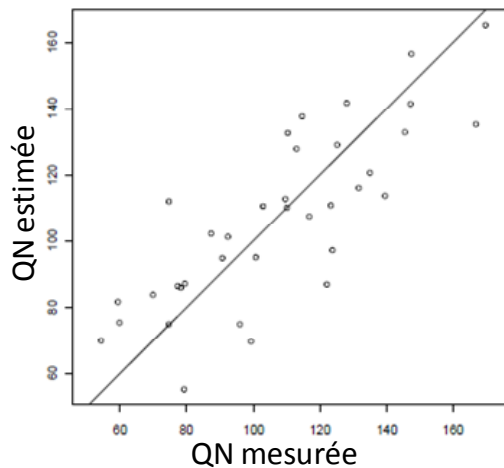


Figure 6 : Relation montrant le bon accord entre la quantité d'azote (QN) mesurée par méthode destructive et celle estimée à partir des spectroradiomètres.

7- PERSPECTIVES

Les techniques de spectroradiométrie, d'imagerie hyperspectrale permettent de disposer de différentes technologies qui, seules ou en tandem les unes avec les autres, facilitent l'accès à des traits tels que la surface foliaire, la teneur en azote, le contenu en chlorophylle à différentes échelles spatiales. Etant non destructives, ces méthodes proposent également des accès nouveaux à la dynamique de mise en place de ces caractères, voire un accès à l'hétérogénéité de leur distribution au sein du couvert (cas de la caméra hyperspectrale).

Pour le moment au stade de la recherche, ces technologies, doivent être simplifiées dans les années à venir pour faciliter leur mise en œuvre opérationnelle. Les progrès porteront, d'une part, sur le développement d'étalonnages robustes à l'image des systèmes Nirs « on line » présents sur les engins de récolte, et d'autre part, sur la miniaturisation des capteurs (qui deviendront de plus en plus portables) ainsi que sur le développement de capteurs « low cost ».

Une technique ne pourra pas permettre, à elle seule, d'avoir accès aux différents caractères d'intérêt agronomiques. La réalisation de vecteurs permettant de « multiplexer » ces capteurs sera sans aucun doute la solution retenue. Si les vecteurs terrestres sont aujourd'hui privilégiés dans les approches mises en œuvre, il est difficile d'imaginer que ceux-ci pourront répondre efficacement aux contraintes du haut débit : avec ces techniques, il est envisageable de gérer des chantiers de l'ordre de la centaine de parcelles. La réalité des effectifs des populations 'd'apprentissage' développées pour l'étude des relations génotype / phénotype, imposera de franchir un ou deux ordres de grandeur. Des systèmes dédiés sur d'autres vecteurs (aériens par ex.) devront être développés pour franchir un tel saut quantitatif.

“Journée ASF du 3 février 2011”
" Génétique d'association et Amélioration des Plantes :
Evolution des outils de génotypage et de phénotypage à haut débit "

BIBLIOGRAPHIE

- Girard M.C. et Girard C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris.
- Jacquemoud S. et Baret F. 1990. PROSPECT : A model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment*, **34** (2):75–91.
- Jacquemoud S., Zarco-Tejada P. J., Verhoef W., Asner G. P., Ustin S. L., Baret F. et François C. (2006). PROSPECT+SAIL : 15 Years of use for land surface characterization. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* : 1992–1995.
- Montes J. M., Melchinger A., Reif J. C., 2007. Novel throughput phenotyping platforms in plant genetic studies. *Trends in Plant Science*, **12**, 433-436.
- Reich G., 2005. Near-infrared spectroscopy and imaging: Basic principles and pharmaceutical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, **57**: 1109– 1143.
- Rouse J.W. and Haas R.H. 1973. Monitoring vegetation systems in the great plain with ERTS. *Third ERTS Symposium*, 1973, 1, 309-317. - Washington DC: NASA.
- Vigneau N, 2010. Potentiel de l'imagerie hyperspectrale de proximité comme outil de phénotypage : application à la concentration en azote du blé. Thèse, Univ Montpellier, 160 p.
- Vigneau N., Ecartot M., Rabatel G., Roumet P. 2011. Potential of field hyperspectral imaging as a non destructive method to assess leaf nitrogen content in Wheat. *In press, Field Crop Research*.

