



Potentiel de l'imagerie hyperspectrale de proximité pour le phénotypage rapide des cultures

Application à l'évaluation de la teneur en azote
sur blé dur

Nathalie Vigneau, Gilles Rabatel

Martin Ecartot, Pierre Roumet

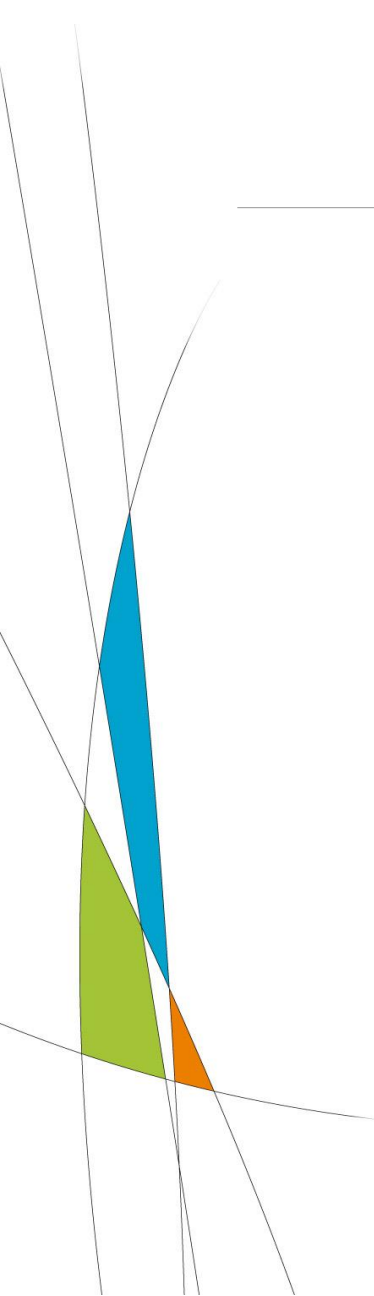


Colloque SFTH – 7-8 avril 2011 - Paris

► Plan de la présentation



- 1. Introduction**
- 2. Acquisition des images**
- 3. Prédiction de l'azote**
- 4. Conclusions et perspectives**



► 1. Introduction

-

**Pratiquer une sélection sur la base de l'information génotypique
→ ne retenir que les allèles favorables dans le génome sur la base des relations phénotype / génotype**





- Comparaison des moyennes phénotypiques pour chaque classe de marqueurs

► Un besoin générique: le phénotypage rapide

- Les techniques d'analyse génomique des plantes ont fait des progrès considérables, apportant une résolution fine pour la connaissance du génotype...
- ... mais parallèlement, la caractérisation des phénotypes associés (gènes + environnement) ne suit pas:
 - ▶ Mesures destructives et lentes
 - ▶ Informations trop globales (pesages, comptages...) réalisées sur des caractères peu nombreux et pas toujours pertinents → **goulot d'étranglement dans l'établissement des relations génotype phénotype**.



*Nécessité de mesurer de manière rapide et non destructive des informations phénotypique moins intégratives:
Teneur en azote, activité chlorophyllienne, etc..*

► Un support d'étude, le projet régional GARICC (2007-2010)

- **Projet labellisé par le pôle de compétitivité Q@lmed**
- **Objectif général: favoriser l'extension de la culture du blé dur dans la région Languedoc-Roussillon par:**
 - **L'inventaire des caractéristiques pédologiques existantes**
 - **La sélection génomique de variétés adaptées aux contraintes locales**



Travaux associés sur le phénotypage rapide

- *Financement d'une thèse sur l'approche par imagerie hyperspectrale (N. Vigneau, 2008-2010)*
- *Choix d'une mesure cible: la teneur en azote foliaire*

► Pourquoi l'imagerie hyperspectrale de proximité?

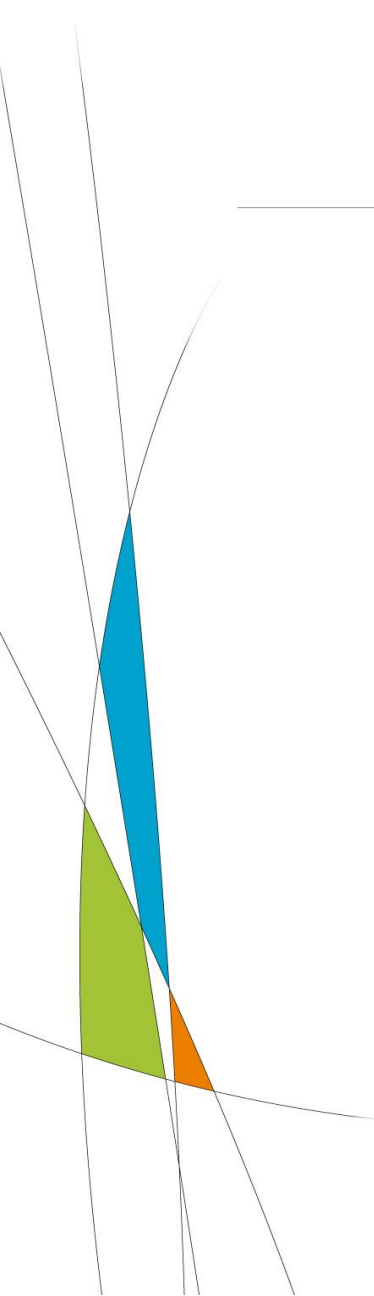
- Des travaux préliminaires ont prouvé l'accessibilité de l'azote par le spectre de réflectance des feuilles



FieldSpec®, Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD), Boulder, Colorado, USA

- L'imagerie hyperspectrale de proximité présente des avantages potentiels conséquents:
 - Information sur la distribution spatiale
 - Robustesse due à la multiplicité des échantillons spectraux

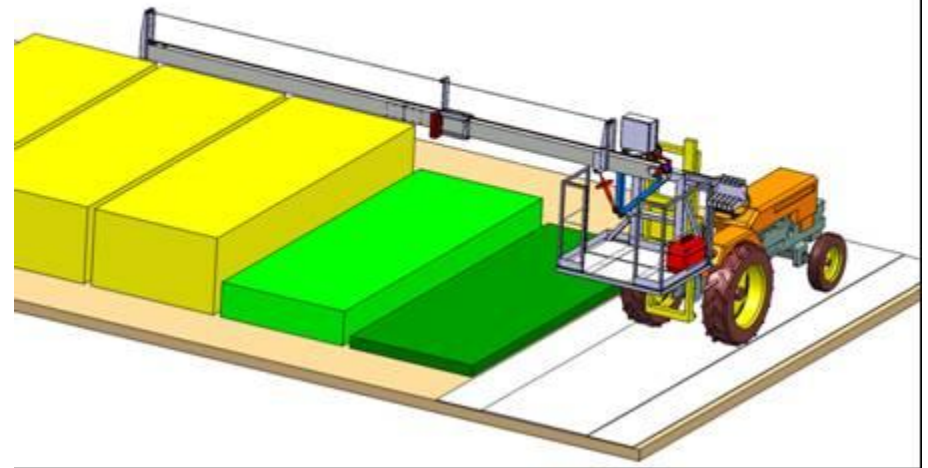
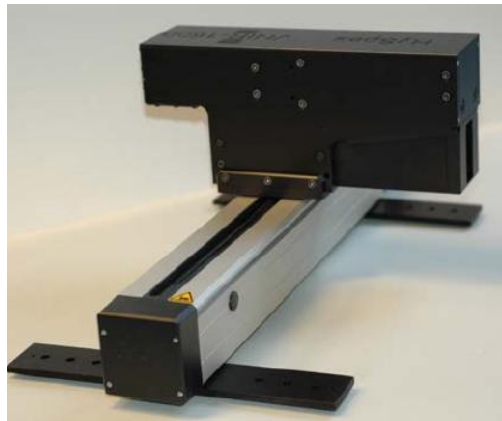
En contrepartie: difficultés dues à la variabilité de l'éclairement et à la géométrie 3D des scènes



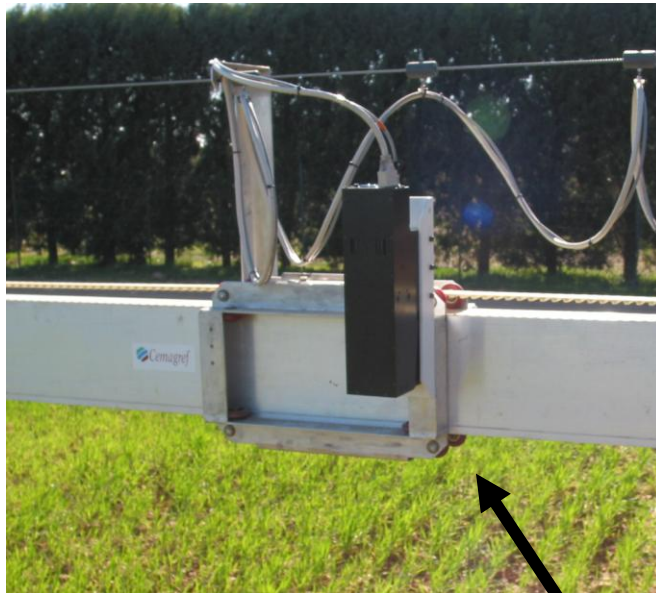
► 2. Acquisition des images

► Prototype d'acquisition

- Principe: déplacement d'une caméra push-broom sur un rail motorisé à 1 mètre au-dessus des cultures



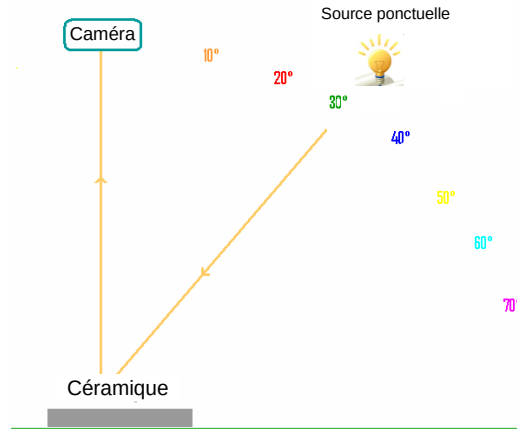
► Prototype d'acquisition (2)



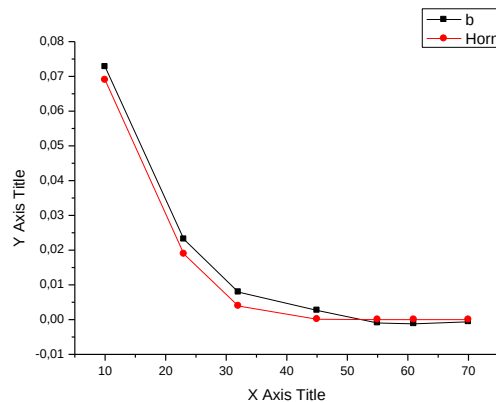
Caméra HySpex VNIR 1600, Norsk Elektro Optikk, Norway

Matrice CCD: 1600 pixels spatiaux, 160 bandes spectrales de **450 à 1000 nm**.
Résolution spatiale à 1 mètre: **0.2 mm**

Correction en réflectance

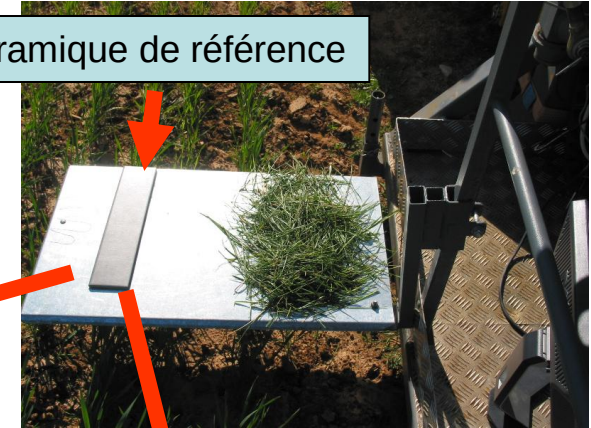


Identification sur modèle de Horn:
 $BRDF(\lambda, \theta) = RH(\lambda)/\pi + b \cdot \cos^n(\theta)$



Etalonnage au laboratoire

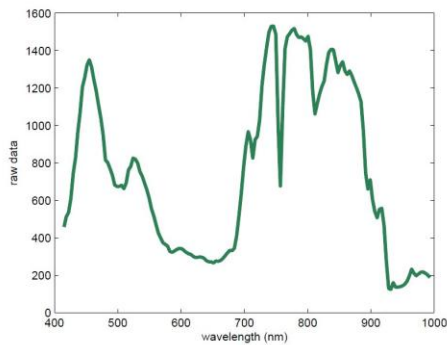
Céramique de référence



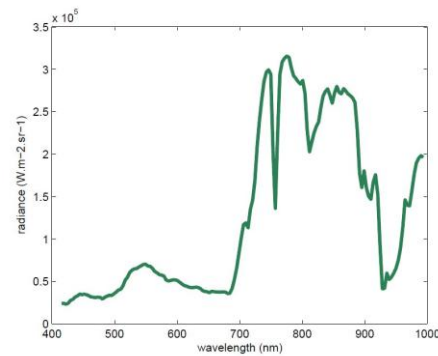
Correction en réflectance des images

$$R(x, y, \lambda) = L(x, y, \lambda) \frac{RH(\lambda)}{\langle L_{\text{céramique}}(\lambda) \rangle}$$

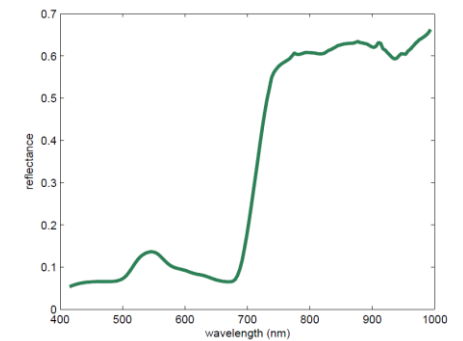
► Exemple de correction en réflectance



Signal brut CCD 12 bits



Spectre de luminance



Spectre de réflectance

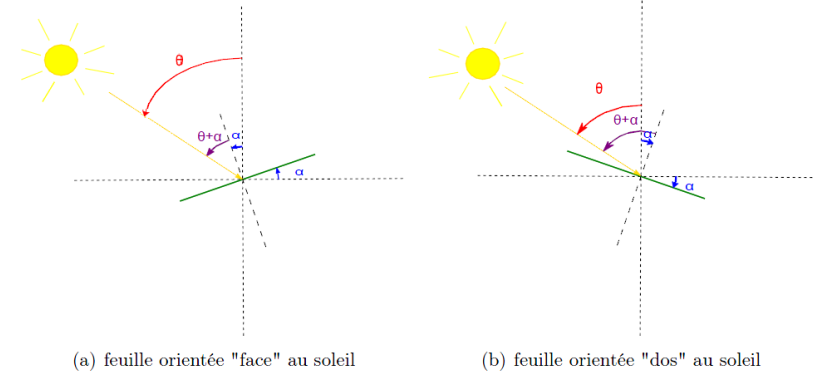
Correction sensibilité capteur

Correction via céramique

► Effet de l'inclinaison aléatoire des feuilles

- Facteur multiplicatif k_1 sur l'éclairement par rapport à celui de la céramique

$$\text{Rapparent} = k_1 \cdot R$$

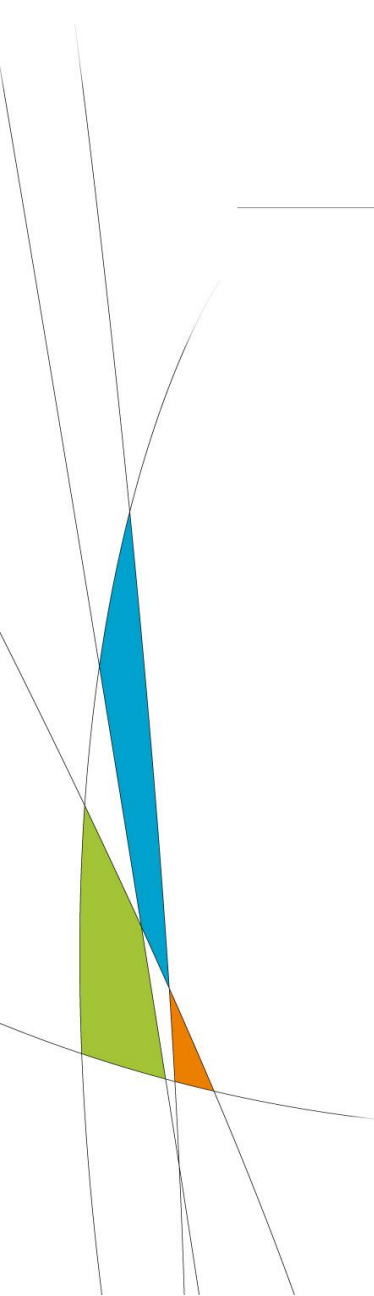


- Possibilité de réflexion spéculaire
→ facteur additif k_2 sur le spectre mesuré

$$\text{Rapparent} = k_1 \cdot R + k_2$$

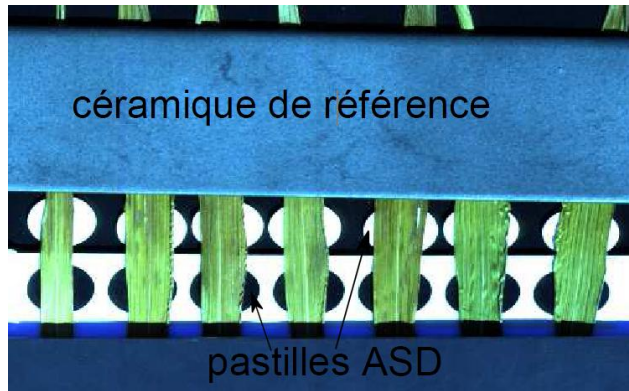


**Prétraitement systématique des spectres par SNV
(centrage + normalisation)**

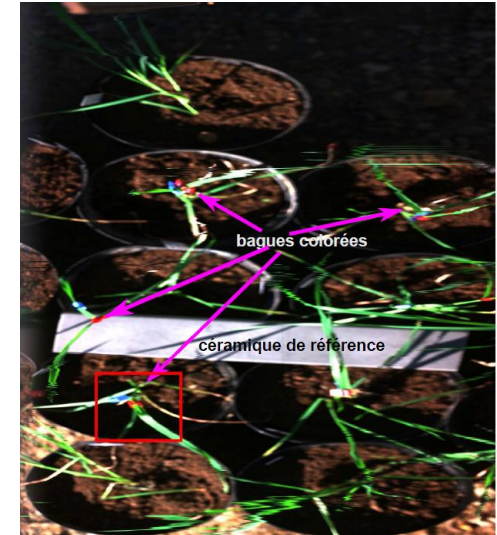


▶ 3. Prédiction de l'azote

► Trois types d'expérimentation



Feuilles isolées à plat



Plantes en pot (serres)



Plantes au champ

Mélange de quatre génotypes

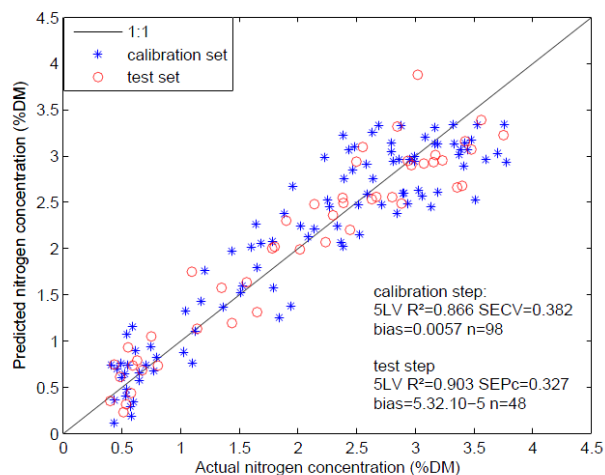
► Etablissement du modèle de prédiction

- **Référence: mesure de la concentration en azote des feuilles arrachées et broyées (méthode Dumas – CEFE – Montpellier)**
- **Modélisation chimiométrique : PLS-1 (Partial Least Square)**
 - ▶ Pour rappel: méthode itérative permettant d'extraire des axes principaux expliquant au mieux la covariance entre entrées (spectres) et sorties (teneurs N)
 - ▶ Le nombre d'axes (variables latentes) détermine la parcimonie du modèle (typiquement de 3 à 8)
 - ▶ Au final, la PLS fournit un jeu de coefficients assurant la prédiction d'azote pour un spectre donné par une relation linéaire:

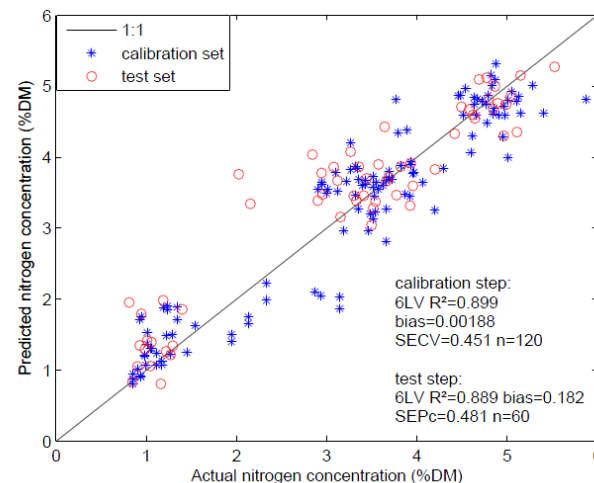
$$Y = B^T.X + b_0$$

- ▶ Construction du modèle sur un sous-ensemble d'apprentissage par cross-validation
- ▶ Validation sur un sous-ensemble de test distinct.

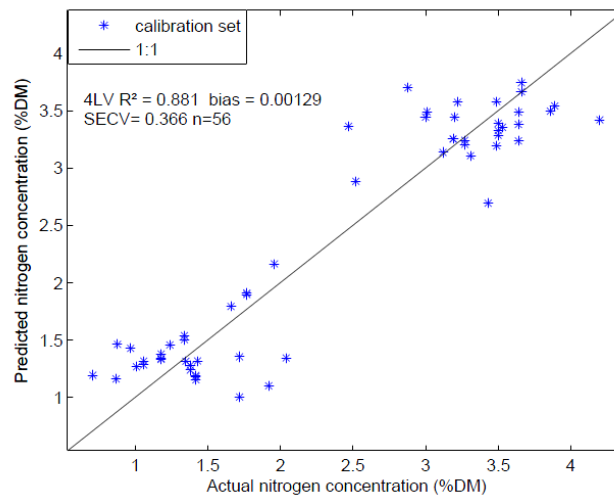
► Résultats par type d'expérimentation



Feuilles à plat (5 VL)

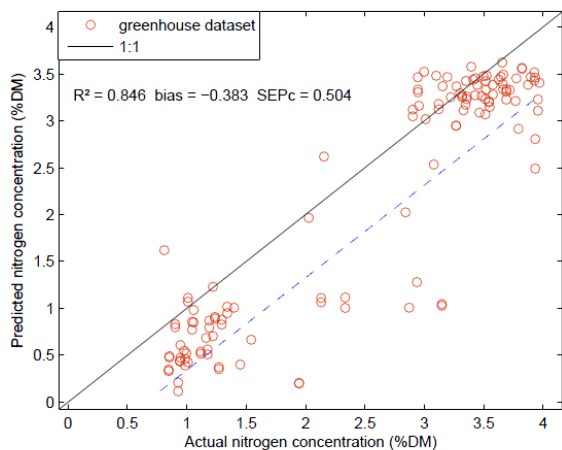


Plantes en pot (6 VL)

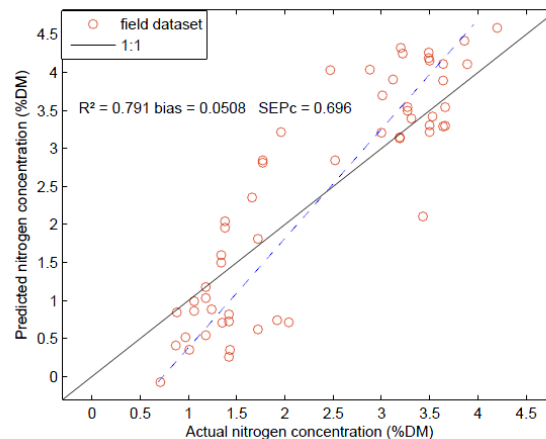


Plantes au champ (4 VL)

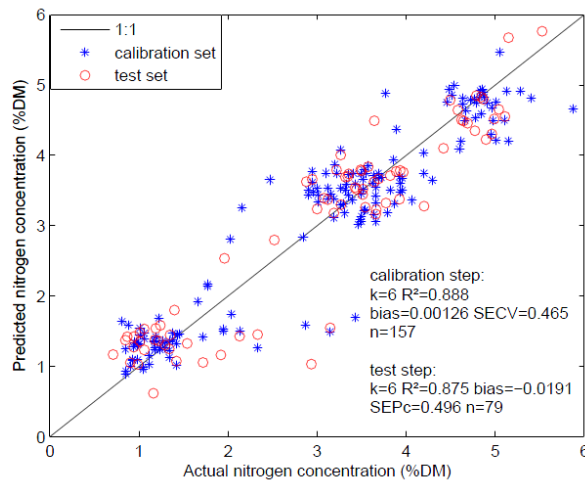
► Croisement des modèles



Modèle plantes au champ
appliqué aux plantes en pot



Modèle plantes en pot
appliqué aux plantes au champ



Modèle global:
plantes en pot
+ plantes au champ
(6 VL)

► En résumé

- **Pour chaque type de condition culturelle, un modèle de prédiction acceptable peut être construit**
- **Un modèle construit dans des conditions culturelles données n'est pas utilisable dans d'autres conditions**

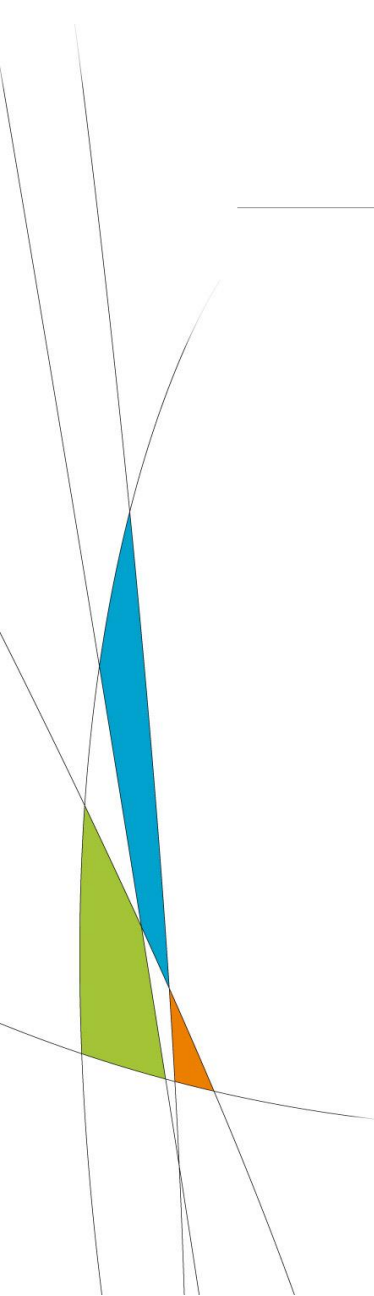
MAIS...

- **Un modèle dont les données d'apprentissage regroupent diverses conditions culturelles peut rester performant pour l'ensemble de ces conditions**

► Interprétation

- Dans le domaine spectral 450-1000 nm, l'azote « accessible » est celle qui est liée à la chlorophylle → dispositif N-tester (mesure de 2 longueurs d'onde)
- Mais la relation chlorophylle-azote est très fortement dépendante de la variété et des conditions → nécessité de parcelles de référence
- Par l'utilisation d'une information spectrale plus complète, la PLS permet d'intégrer dans le modèle la variabilité de la relation chlorophylle-azote

En contrepartie, un étalonnage lourd réunissant le maximum variétés et de conditions culturales doit être réalisé



► 4. Conclusions et perspectives

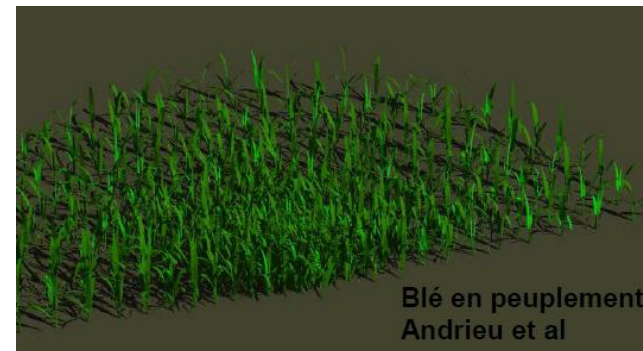
► Conclusions et perspectives (1)

- Par la richesse de son information spectrale, l'imagerie hyperspectrale de proximité devrait permettre, y compris dans le domaine 450-1000 nm (Si), d'établir un modèle de prédiction d'azote indépendant des variétés et des conditions de culture
- Des prétraitements adaptés à l'influence de la disposition des feuilles doivent être mises en œuvre
- Un étalonnage aussi exhaustif que possible doit être mené.

Procédure envisagée:

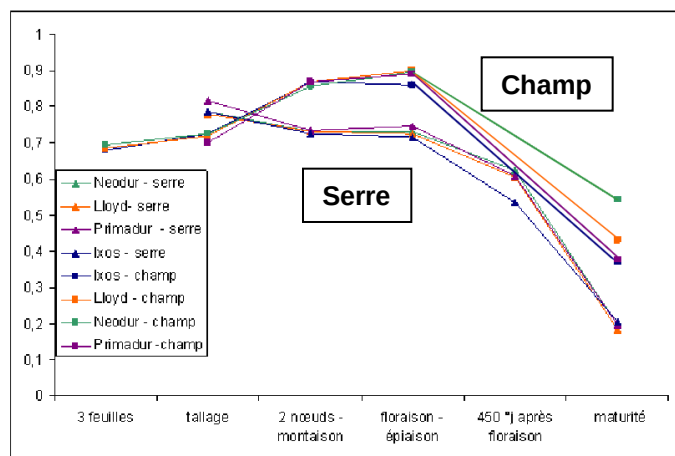
- ▶ Mesure de spectres sur feuilles cueillies (pour raisons pratiques) et à plat.
- ▶ Simulation de spectres réelles par modélisation 3D

Modèle ADEL-blé
plateforme Openaléa

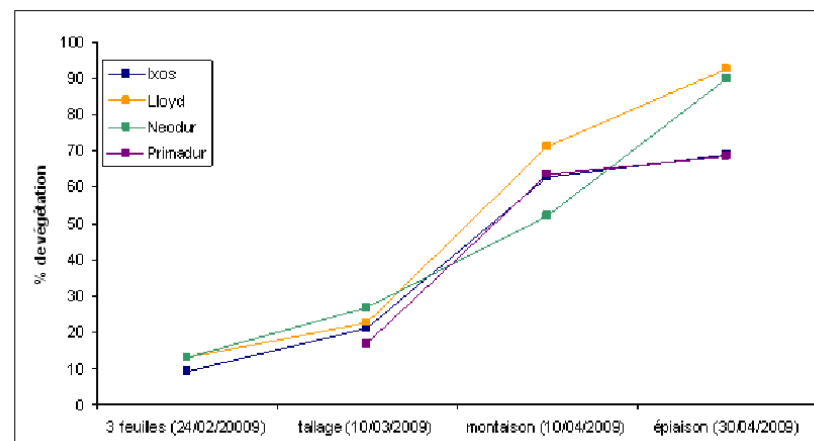


► Conclusions et perspectives (2)

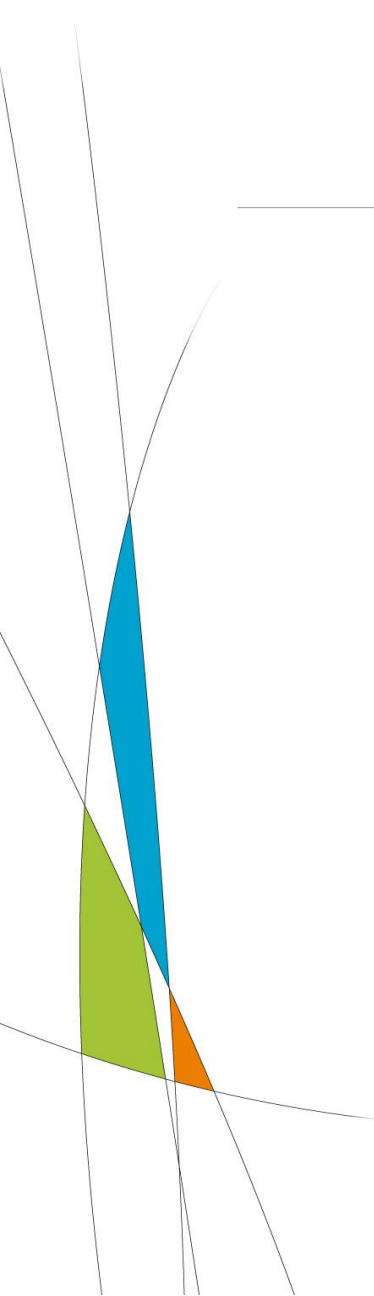
- Une fois le modèle établi, la résolution spatiale ouvrira de nouvelles possibilités d'investigation agronomique (distribution et migration de l'azote dans la plante)
- D'autres apports de la résolution spatiale élevée sont d'ores et déjà utilisables → mesure précise du NDVI et de la fermeture du couvert (après segmentation sol/plante)



NDVI



Fermeture du couvert



► **Merci de votre attention...**