



# Apport des capteurs pour la l'évaluation de l'efficience d'utilisation de l'azote

## Application au phénotypage haut débit au champ



B. de Solan, F. Baret et al.  
[b.desolan@arvalisinstitutduvegetal.fr](mailto:b.desolan@arvalisinstitutduvegetal.fr)

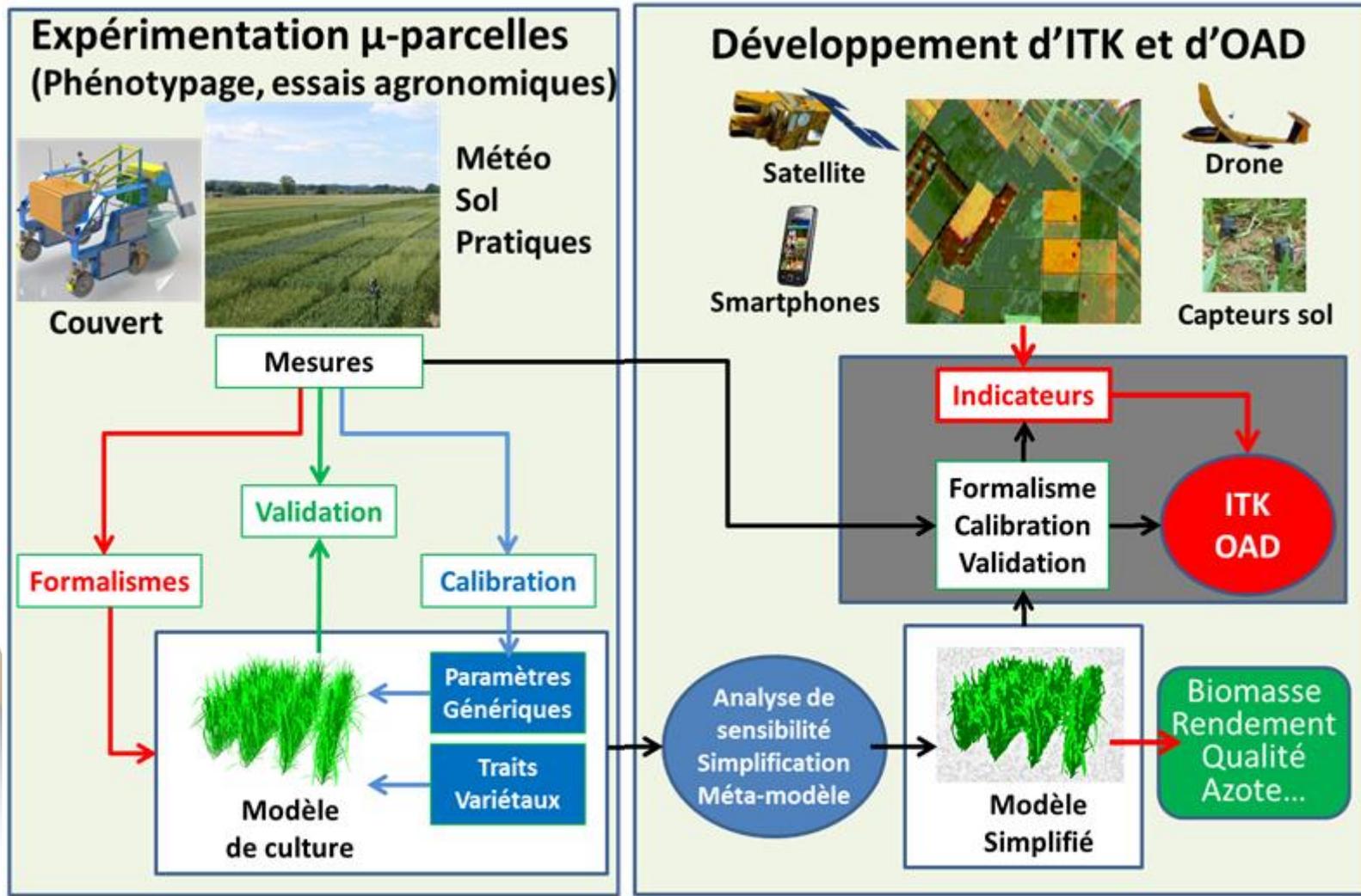


# UMT CAPTE

## Capteurs et télédétection

- ✓ **Développer des outils et méthodes pour**
  - l'acquisition,
  - le traitement et la gestion des données
  - l'intégration dans les applications
- ✓ **Permettant d'accéder à des variables d'état**
  - + Compartiment aérien
  - + Compartiment racinaire
- ✓ **Sur les grandes cultures** : blé, orge, colza, betterave, tournesol, maïs
- ✓ **Pour élaborer des méthodes de phénotypage et d'aide à la décision**
- ✓ **Assurer une veille technologique et identifier les nouvelles opportunités**

# Démarche générale - 2 axes complémentaires



Modèle complet  
Mesures détaillées

Modèle simplifié  
Mesures intégrées

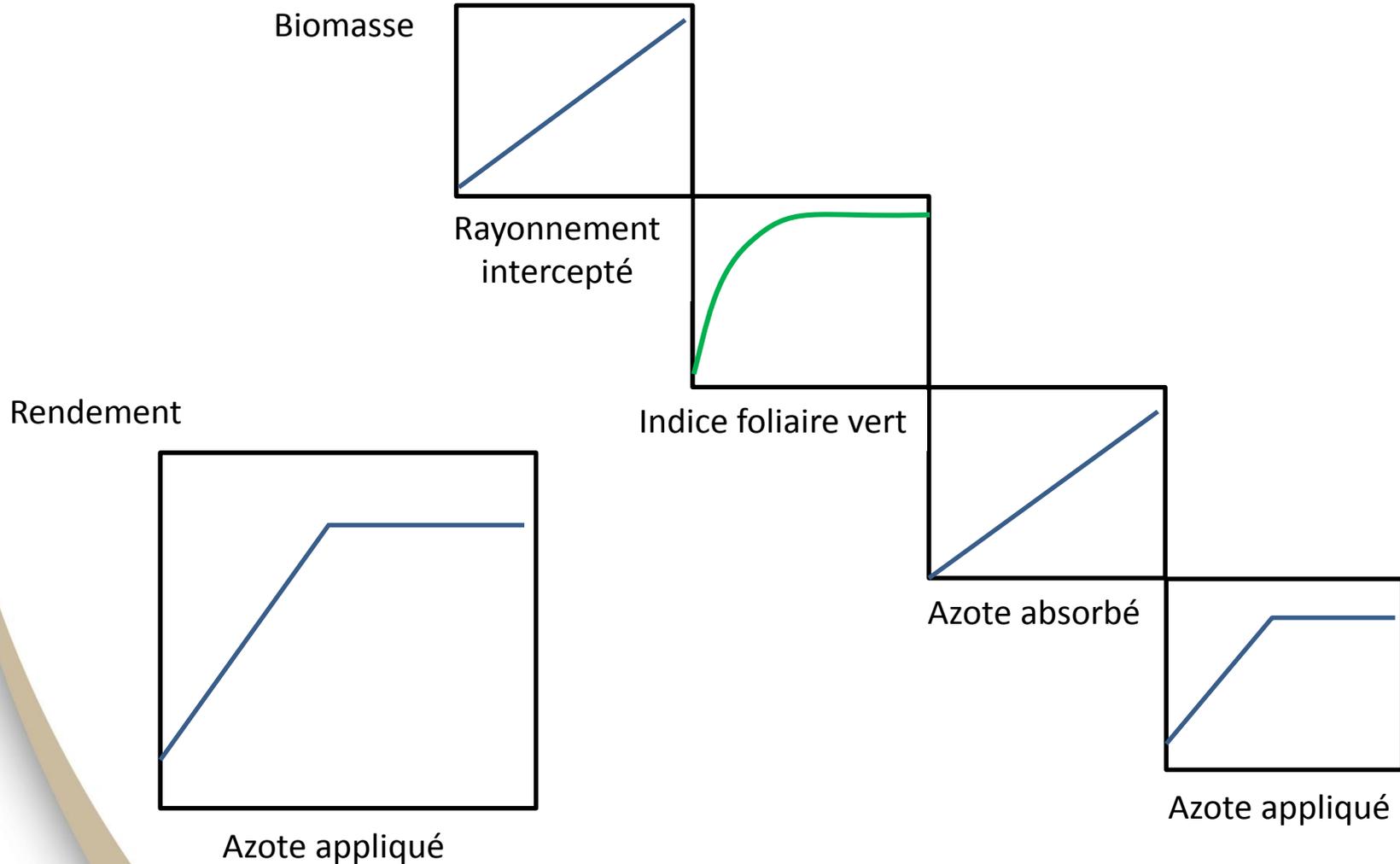


# Plan

- Quelles variables 'plante' sont pertinentes pour expliquer l'efficacité d'utilisation de l'azote ?
- Ces variables sont-elles mesurables par capteurs ?
- Exemple de mise en œuvre sur le terrain
- Perspectives



# Elaboration du rendement et efficience d'utilisation de l'azote

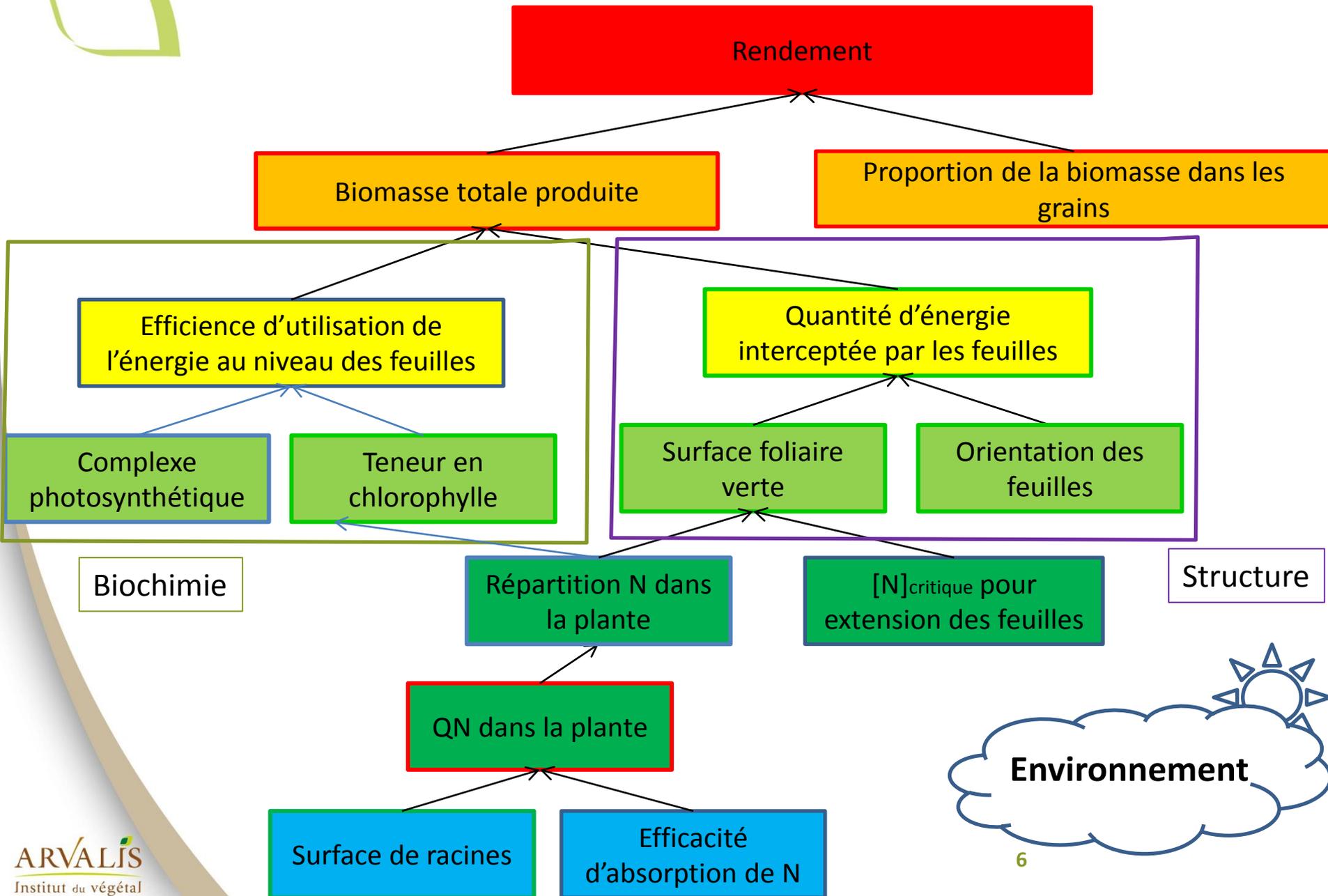


Efficience d'utilisation de l'azote (NUE)

$$NUE = \text{Rdt grain} / \text{QN appliqué}$$

Sylvester-Bradley, 1990

# Elaboration du rendement et efficacité d'utilisation de l'azote





## Architecture vs biochimie : qui a le plus de poids ?

$$\text{Biomasse}(j) = \text{PAR}_i(j) * \text{RIE}(j) * \text{RUE} * \text{Stress}(j)$$

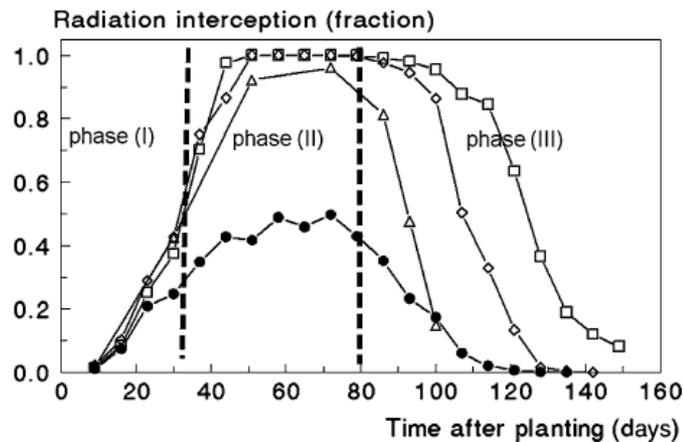
- PAR : rayonnement solaire (météo)
- RIE : proportion du rayonnement intercepté (architecture)
- RUE : efficacité d'utilisation du rayonnement (biochimie)

Différentes stratégies possibles pour les plantes, en contexte de ressources limitantes (azote en particulier) (Vos et al., 2005) :

- Privilégier la quantité de rayonnement intercepté (RIE,  $\epsilon_i$ )
- Maximiser l'utilisation du rayonnement intercepté (RUE,  $\epsilon_b$ )

# Exemple de la pomme de terre

Fig. 3 Fraction radiation interception, practically equivalent to fraction of soil covered with green plant material, as a function of time after planting for three rates of fertiliser nitrogen supply: zero N control (circle), 50 kg ha<sup>-1</sup> N (triangle), 200 kg ha<sup>-1</sup> N (diamond) and 400 kg ha<sup>-1</sup> N (square). Data from 1990 in Vos (1997)



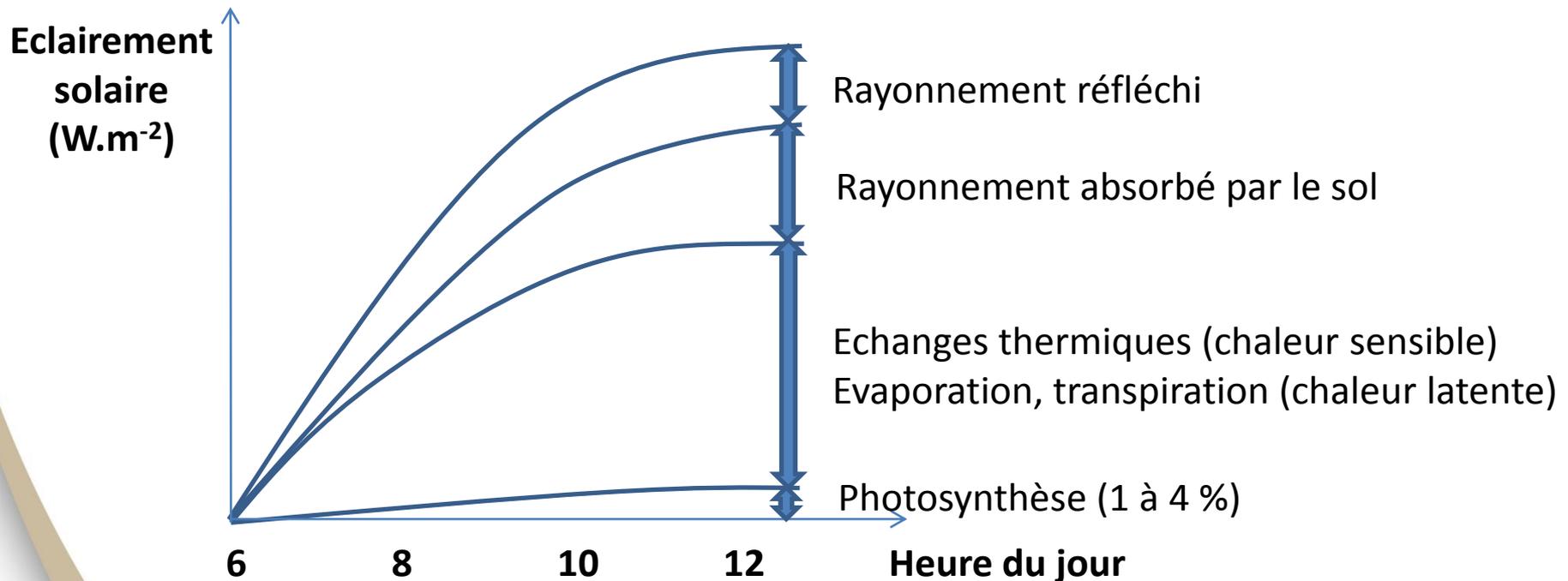
- Effet de l'azote sur la croissance de la pomme de terre (Vos et al., 2009)
  - Effet fort sur la vitesse d'extension des feuilles et sur la durée d'émission des feuilles
  - Peu d'effet sur la teneur en azote des feuilles et sur l'épaisseur des feuilles
  - Peu d'effet sur le ratio poids de feuille/poids de tige
- On peut s'intéresser en priorité à l'évolution de :
  - l'indice foliaire
  - au rayonnement intercepté



# La plante est un capteur

Elle réagit aux signaux lumineux, en quantité ou qualité de lumière :

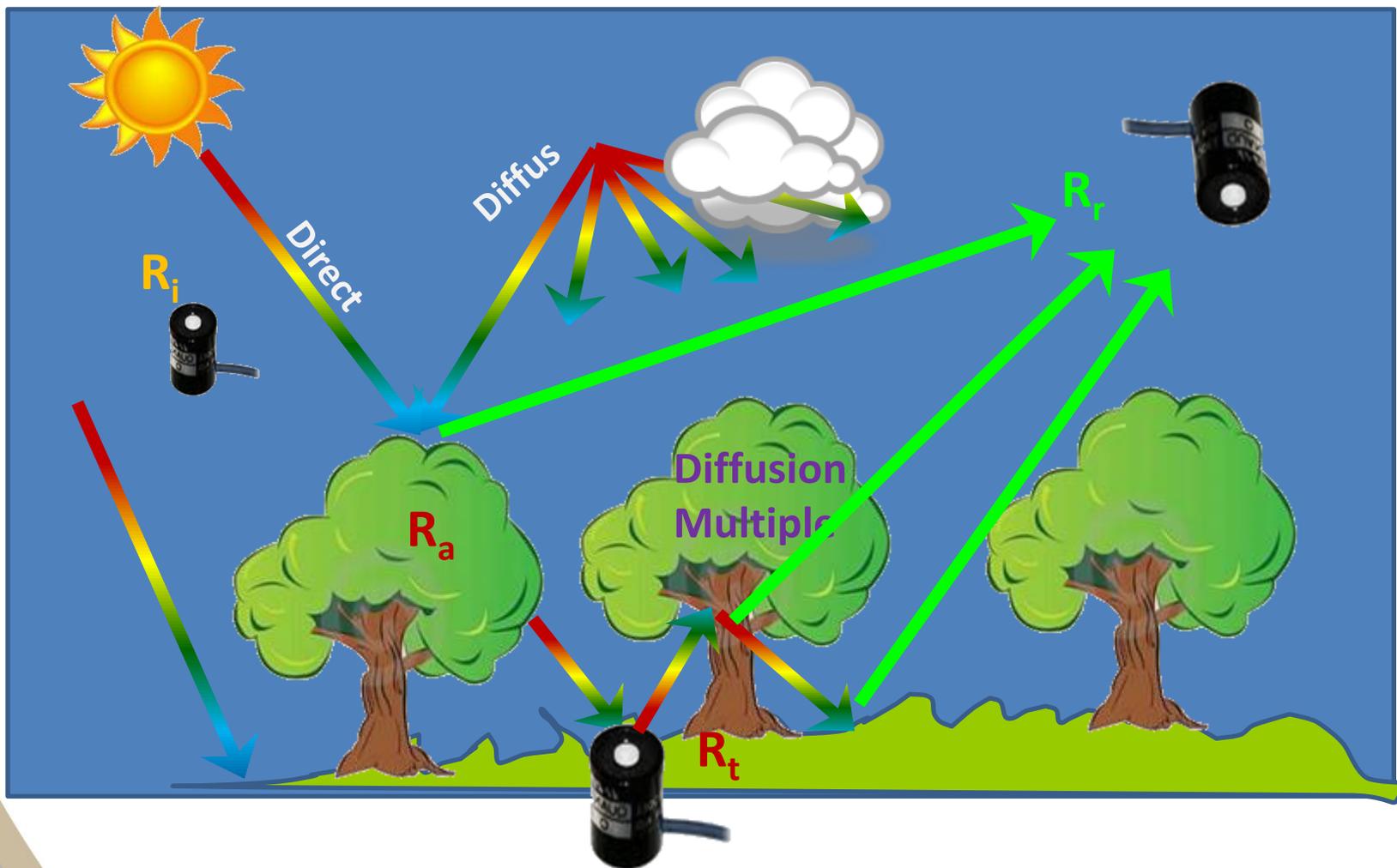
- Quantitativement, par rapport à l'énergie solaire incidente



- Qualitativement (composition spectrale) : photomorphogénèse



# Interaction de la lumière avec la végétation





# Plan

- Quelles variables 'plante' sont pertinentes pour expliquer l'efficacité d'utilisation de l'azote ?
- Ces variables sont-elles mesurables par capteurs ?
- Exemple de mise en œuvre sur le terrain
- Perspectives



# Les capteurs photoniques permettent de caractériser l'interaction de la plante avec la lumière

Vision pour détection d'objets, couleur : caméras, appareils photo



Réflexion de la lumière pour estimation du contenu biochimique : spectroradiomètres, NIRS



Temps de vol pour mesure de distance, caractérisation de la structure de la végétation : lidar



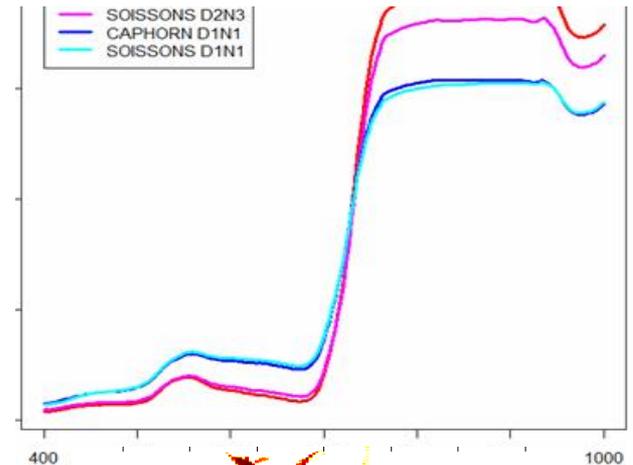


# Variables accessibles

Fraction de couverture, surface foliaire



Contenu en Chl du couvert



Hauteur, densité du couvert



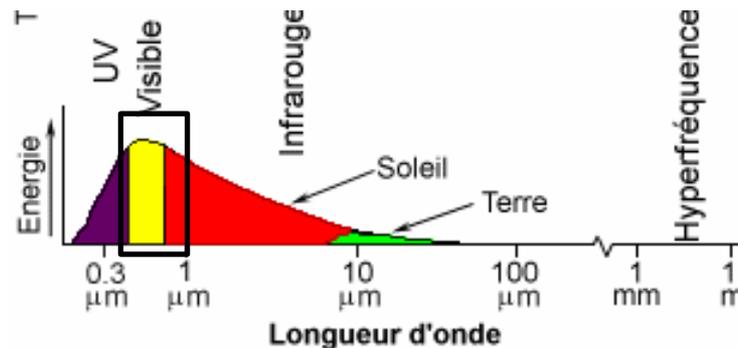


# Quels indicateurs sont mesurables par les capteurs ?

- A l'échelle de la feuille
  - Teneur en chlorophylle, matière sèche, eau
  - Quelques autres composés (caroténoïdes, pigments bruns, ...)
  - Mesure directe de la teneur en azote difficile, mais étalonnage possible
- A l'échelle du couvert végétal
  - Fraction de couverture verte
  - Surface foliaire, angle des feuilles
  - Hauteur du couvert
  - Densité du couvert
  - Contenu total en chlorophylle
  - Azote absorbé, biomasse : mesure directe impossible par télédétection (estimation possible via lien avec chlorophylle ou indice foliaire)

# Spectroradiomètres

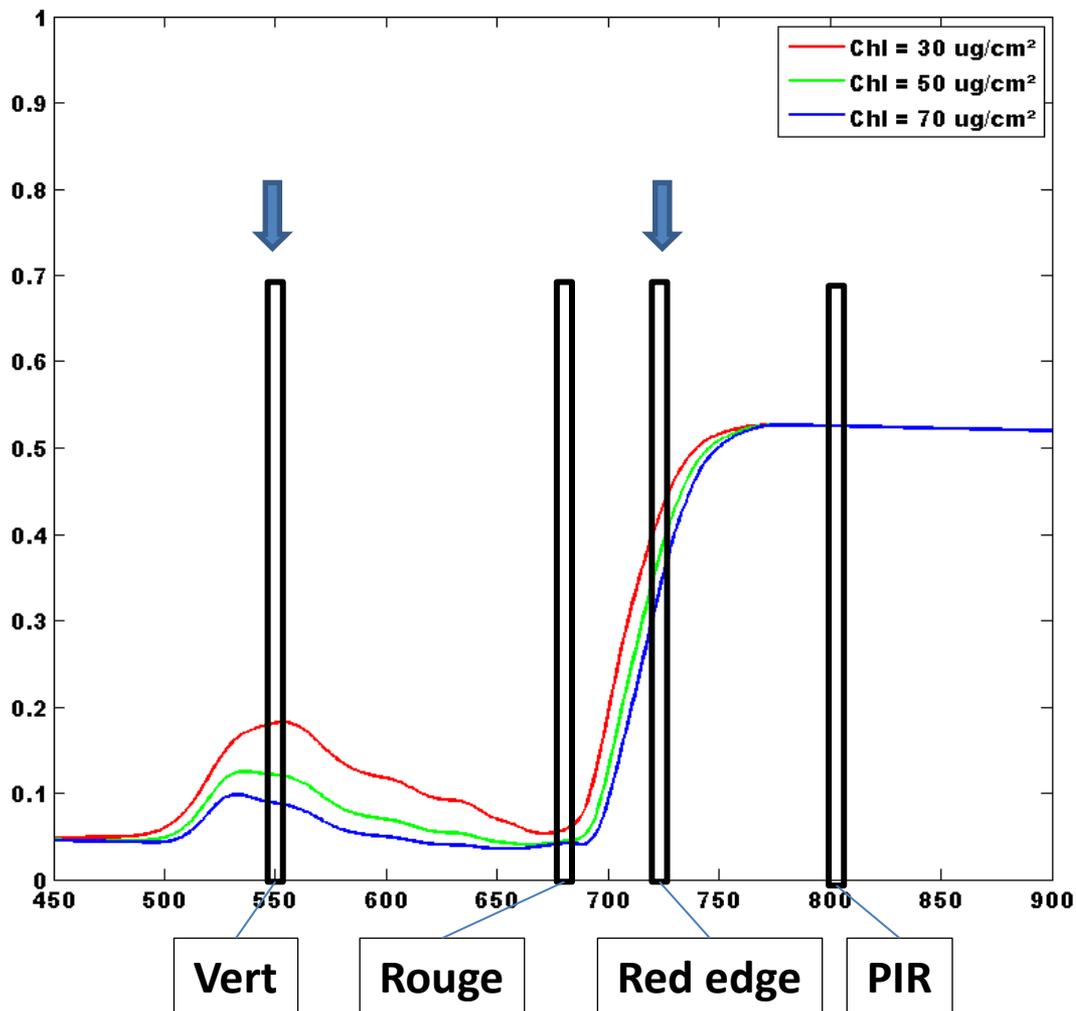
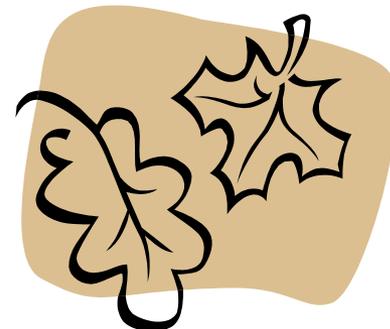
- Mesurent la réflectance de la culture : proportion du rayonnement incident réfléchi par la végétation
- Dépend :
  - Du contenu biochimique des éléments (chlorophylle, eau, ...)
  - De l'architecture spatiale des éléments (surface de feuilles, orientation, ...)
- Mesuré dans un ensemble de longueurs d'ondes





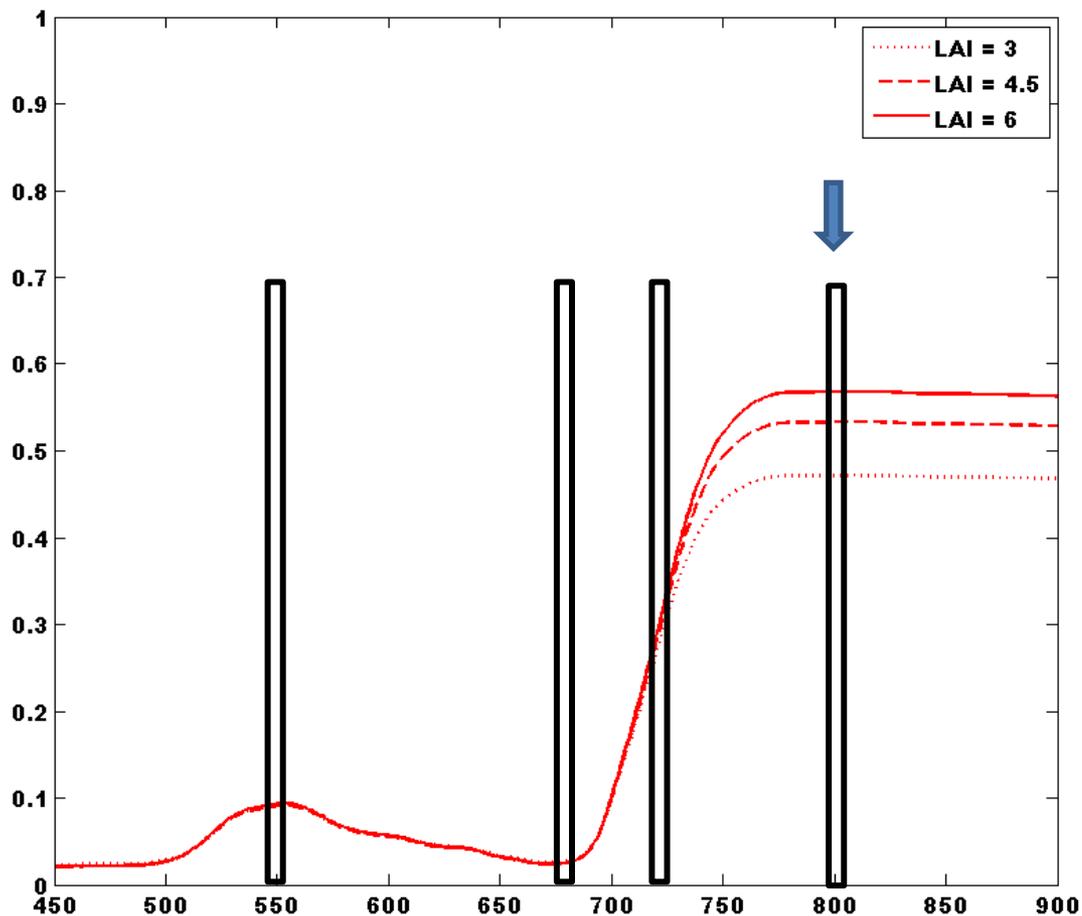
# Echelle de la feuille

## Effet de la teneur en chlorophylle



# Echelle du couvert végétal

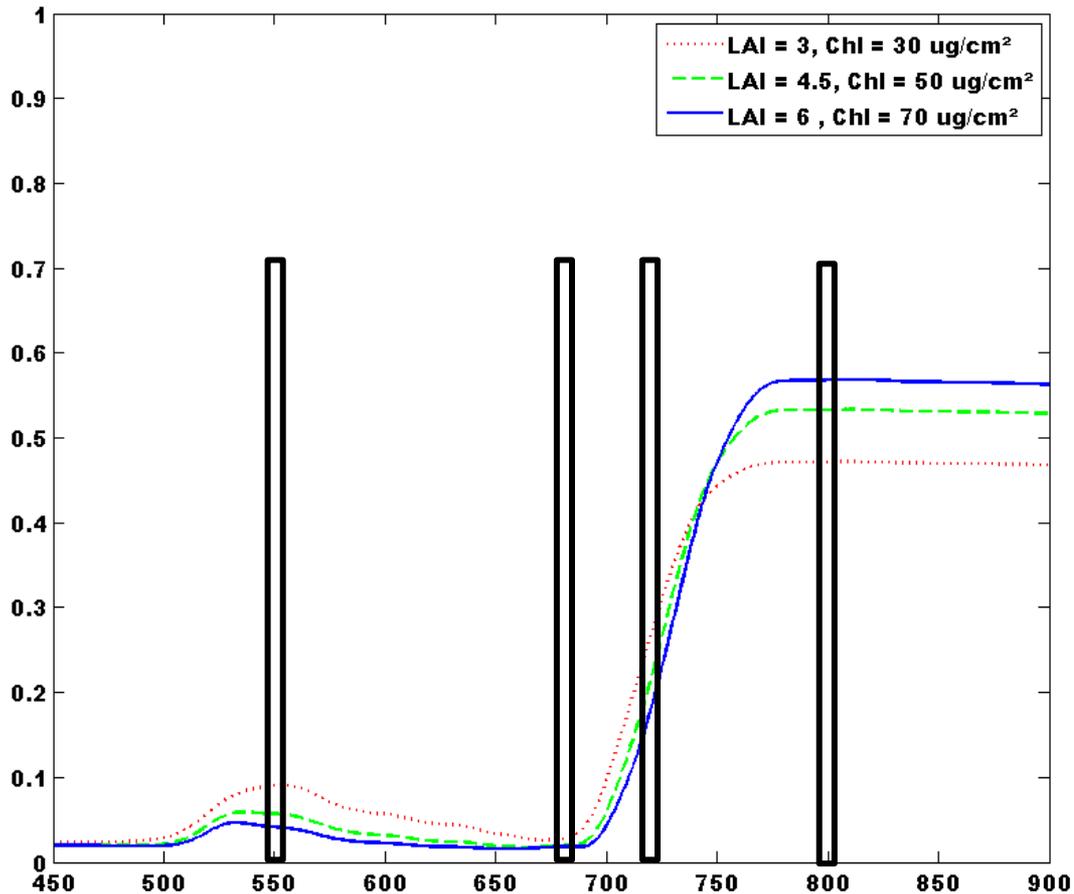
## Effet de l'indice foliaire



# Echelle du couvert végétal

Effet du LAI et de la teneur en chlorophylle

- Modification de l'ensemble du spectre



# Quels indicateurs de l'état de la culture ?

- **Indices sensibles au LAI :**

f(vert, rouge, PIR)

-> Greenseeker, Cropcircle, satellite SPOT, photos

- **Indices sensibles à la quantité totale de chlorophylle :**

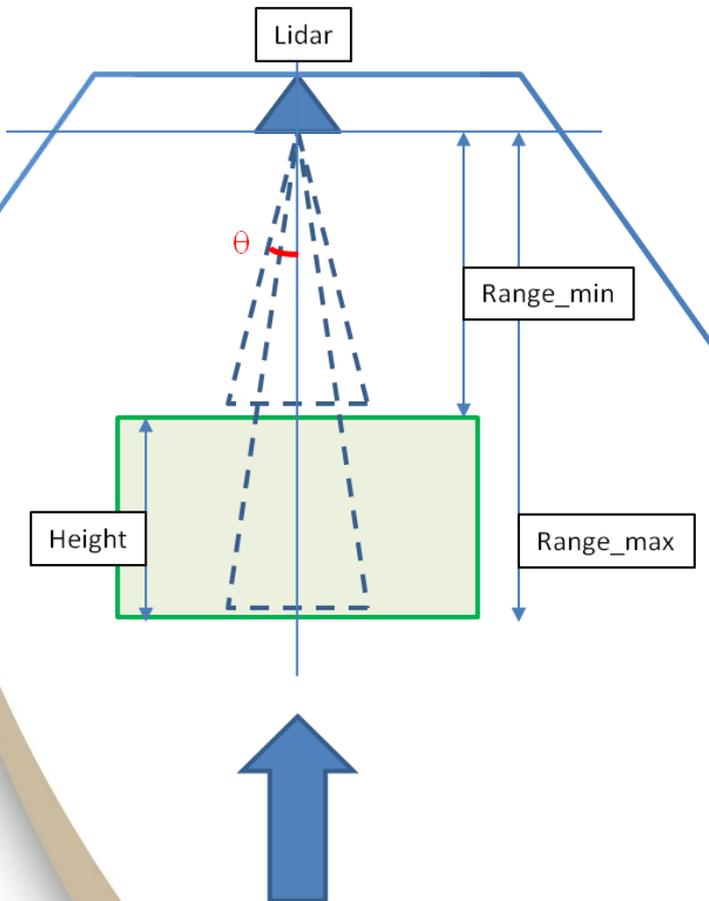
f(rouge, red edge, PIR)

-> Cropscan, Nsensor, futurs satellites (Sentinel), drones ?



# Lidar

## (Light induced detection and ranging)



Emission : Source laser dans une longueur d'onde

Réception :

- Temps de retour du signal (temps de vol) -> distance au capteur
- Intensité du signal retourné -> réflectivité de l'objet détecté

Ici : laser scanner 2D, laser + miroir rotatif 1 axe

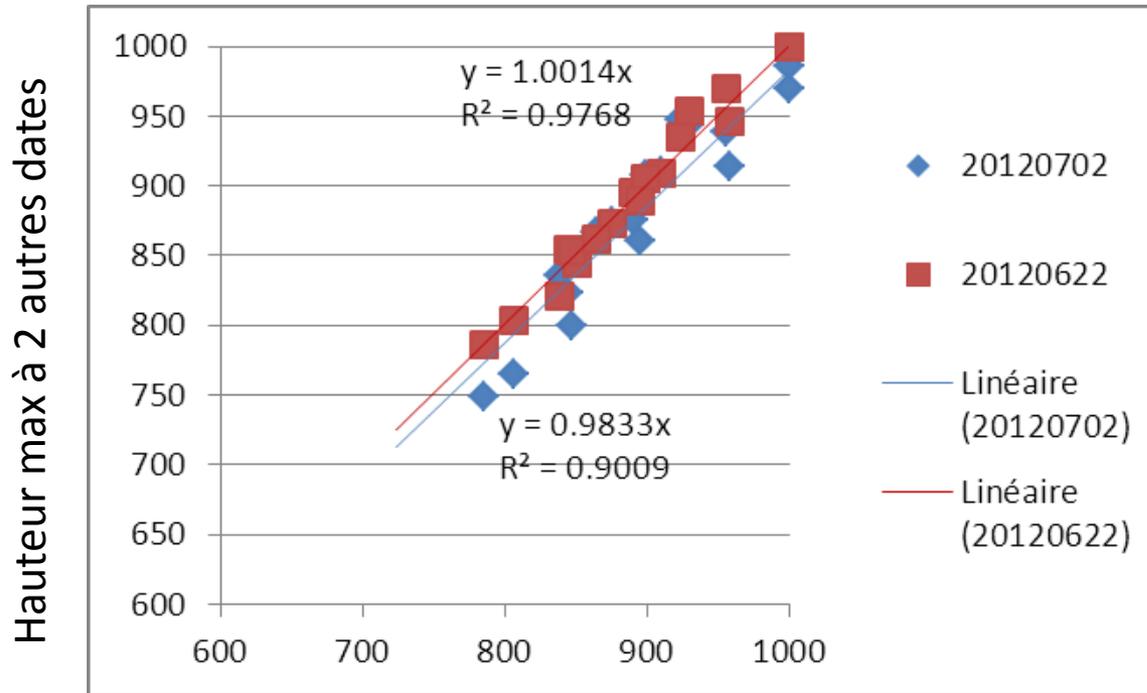
On souhaite apporter un complément aux informations déjà disponibles.

Variables visées :

- Hauteur du couvert
- Profil vertical d'interception par le couvert
- Densité de végétation (liée à la biomasse)
- Accès à la phénologie par l'analyse de la dynamique (montaison, floraison)



# Estimation de la hauteur de végétation 1 D

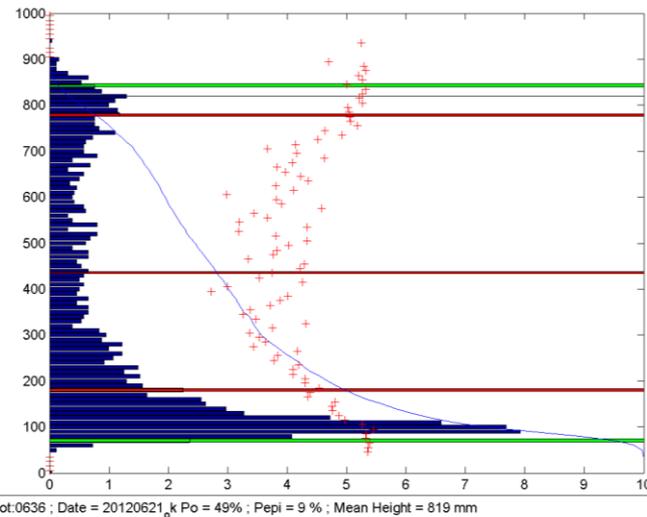
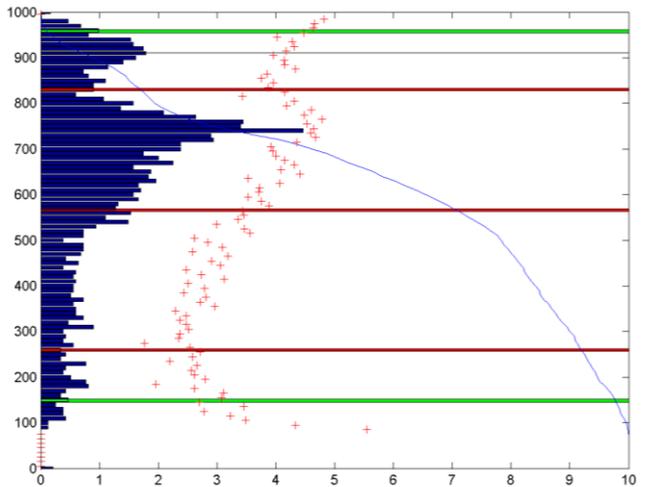


Hauteur max au 21/06/2012



# Interception du rayonnement – Structure

## Profil moyen en Z

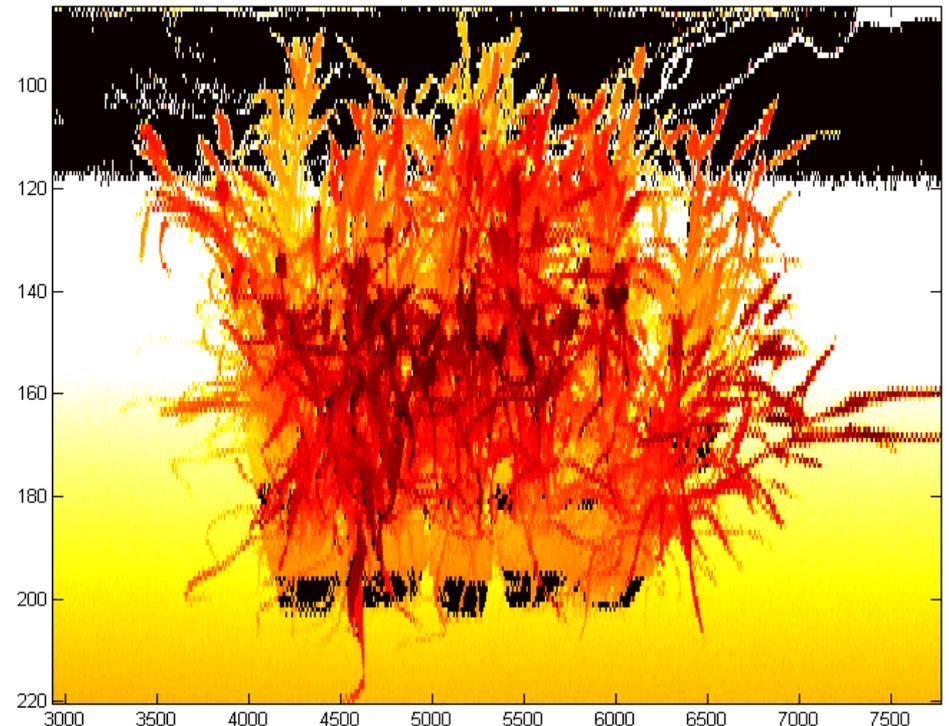
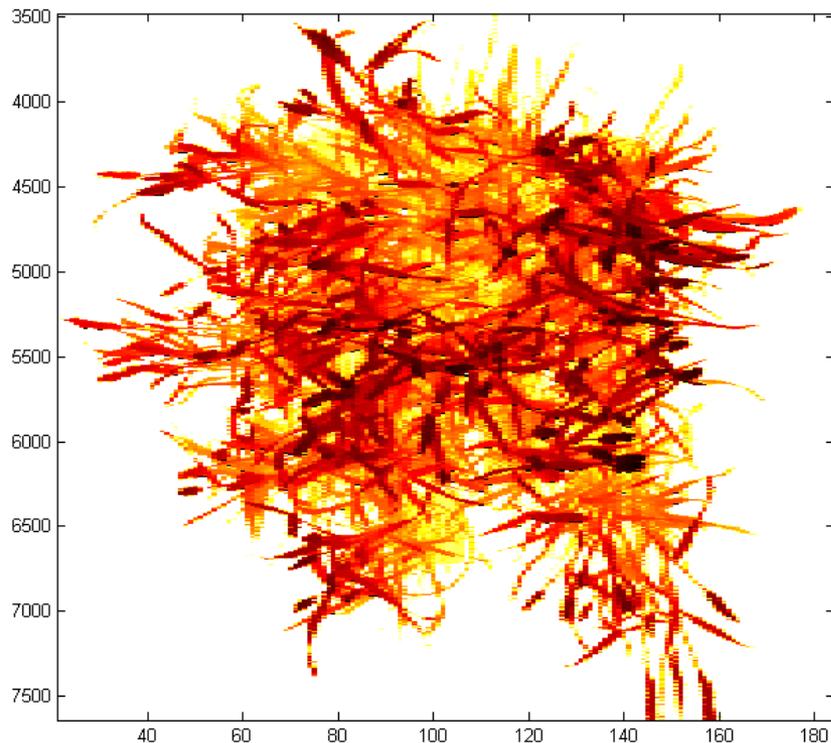




# Interception du rayonnement – Profil 2D

On souhaite également pouvoir extraire des informations sur les tailles de feuilles, épis, ...

Possible avec les Lidar haute résolution. Expl du blé :





# Plan

- Quelles variables 'plante' sont pertinentes pour expliquer l'efficacité d'utilisation de l'azote ?
- Ces variables sont-elles mesurables par capteurs ?
- Exemple de mise en œuvre sur le terrain
- Perspectives



# Comment mettre en œuvre ces mesures par capteurs sur le terrain ?

- Test de capteurs existants
  - Simple mais peu de contrôle sur les mesures, évolutions
- Définir son propre système de mesure
  - Choix des capteurs (caméra, radiomètre, laser, ...)
  - Choix du système porte capteur (perche, tracteur, robot, drone, ...)
  - Configuration de mesure (orientation, position)
  - Référencement des mesures
  - Traitement des données acquises

# Exemple d'expérimentation

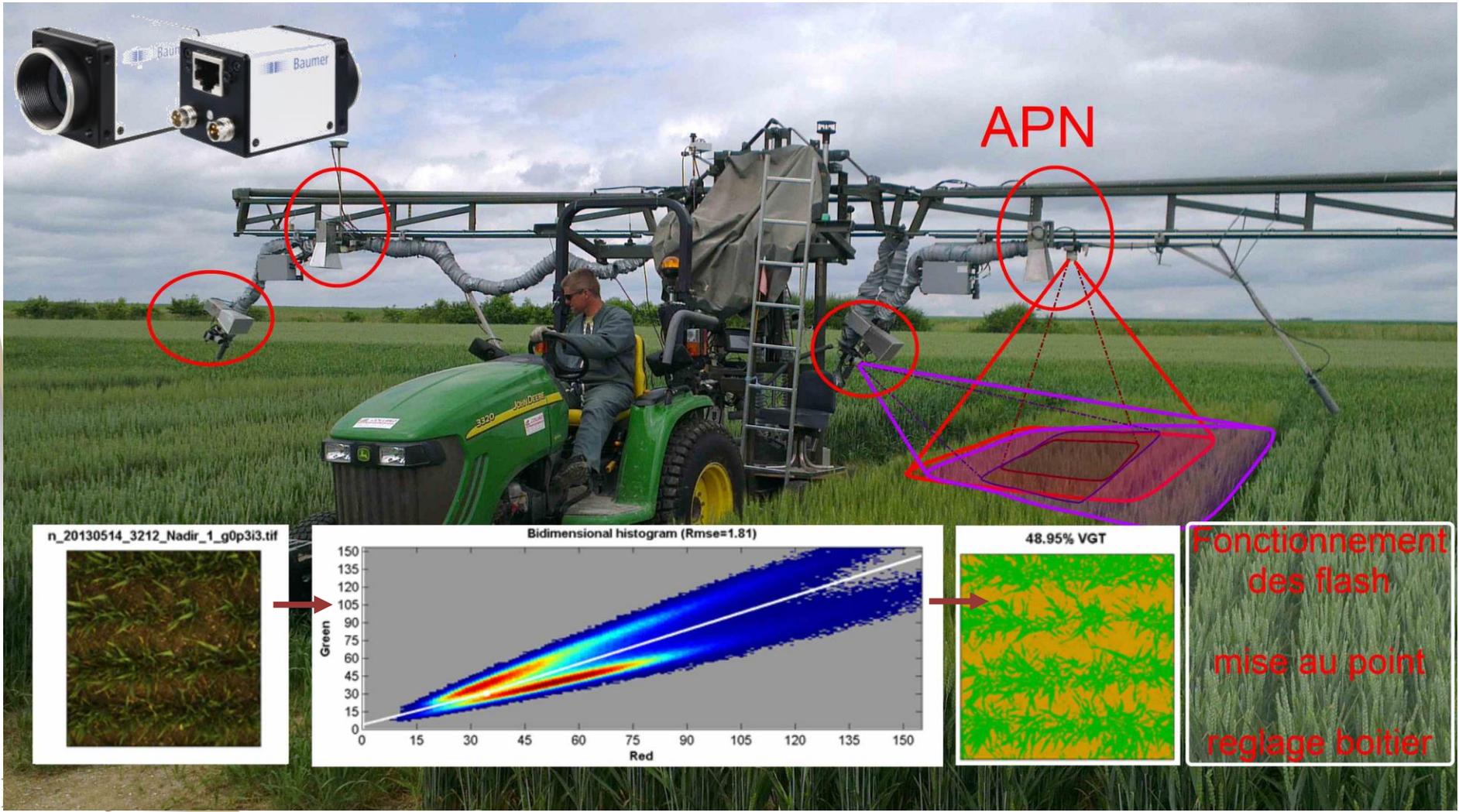
En 2012-2013, à Chalons en Champagne, étude de la réponse des variétés à une carence limitée en azote :

- 220 variétés de blé tendre
  - 2 modalités d'azote
  - 2 répétitions
- 976 microparcelles
- Contrôle des autres facteurs stress (maladies, adventices, ...)
-



# Acquisition des données

Vision pour détection d'objets, couleur : caméras, APN



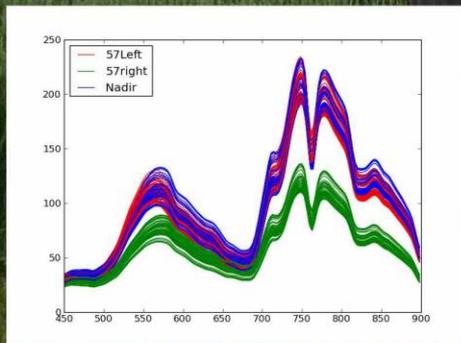


# Acquisition des données

Réflexion de la lumière pour estimation du contenu biochimique



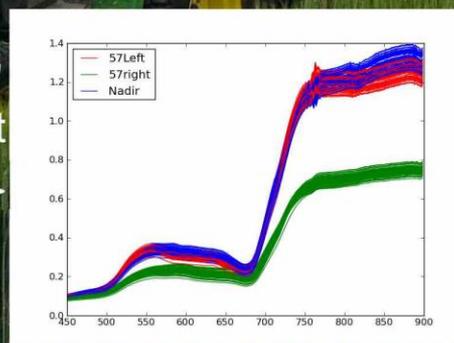
Spectromètres



Spectres Bruts

divisé par l'éclairage

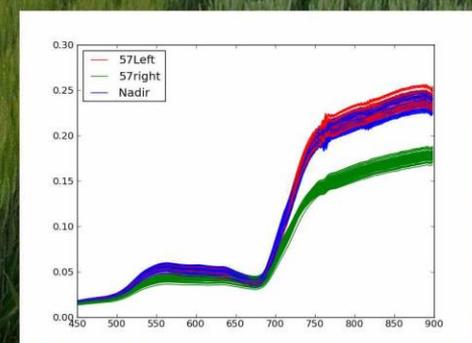
Référence



Reflectance Instrumentale

corrigé des réponses spectrales

Inter-Calibration



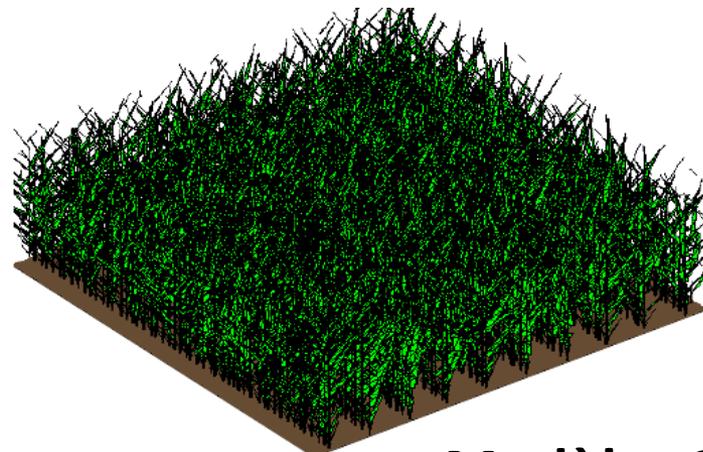
Mesure de Reflectance



# De la donnée physique à la variable agronomique

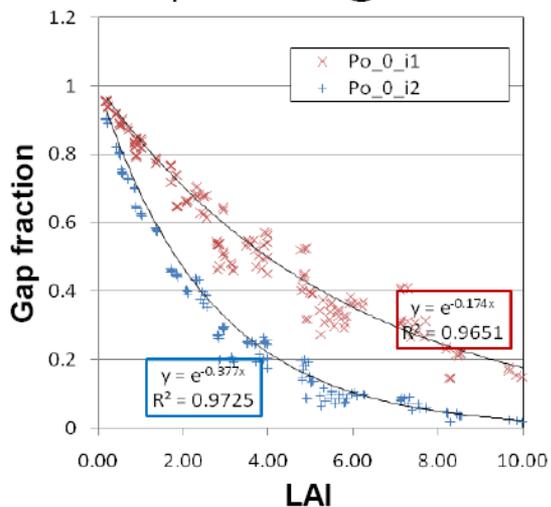


Milieu turbide

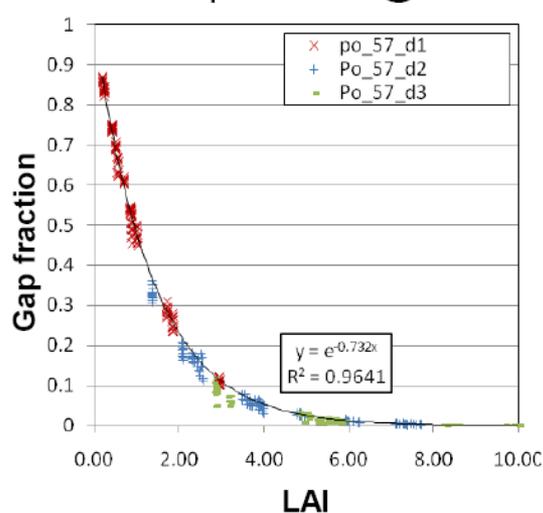


Modèles 3D

Gap fraction @ 0°



Gap fraction @ 57°





# Analyse des données

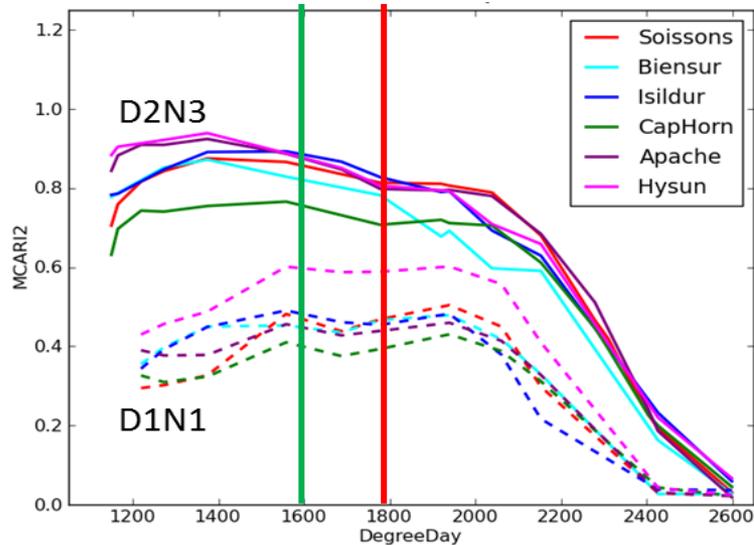
## Différences entre variétés / environnements

### Indice

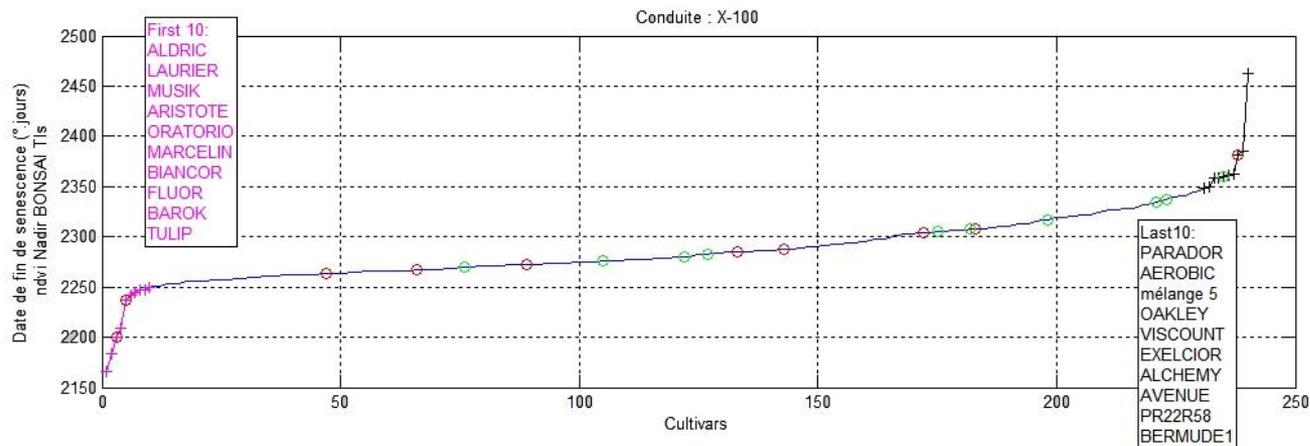
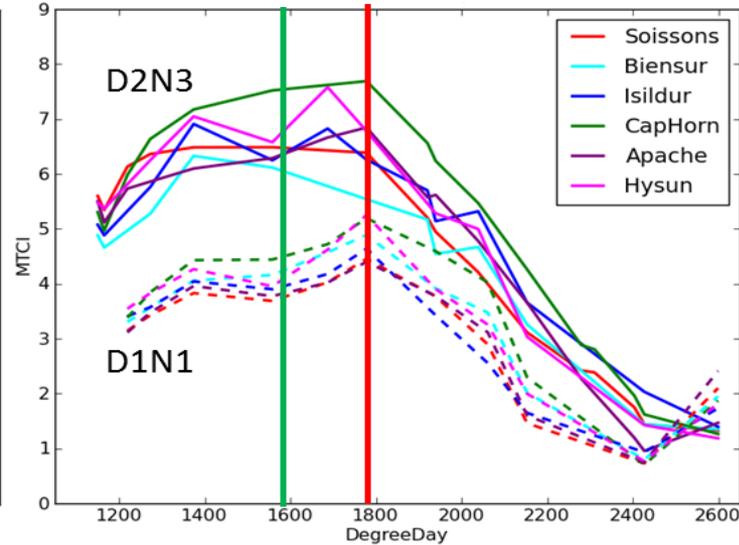
Fraction verte

Epiaison

Floraison



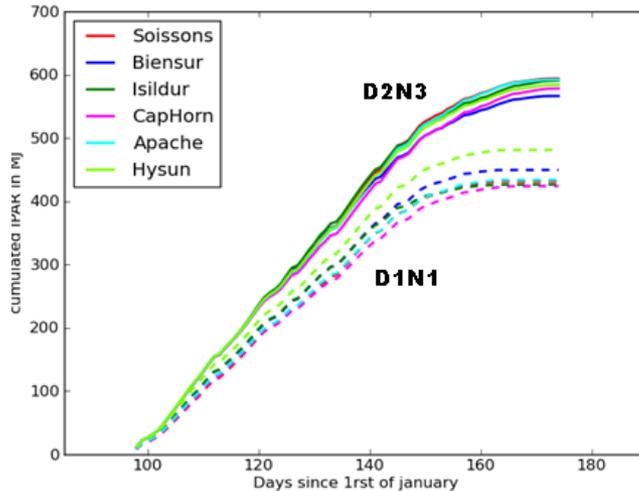
### Indice Chlorophylle



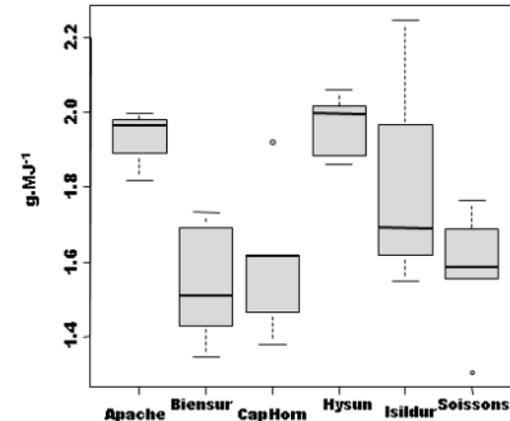
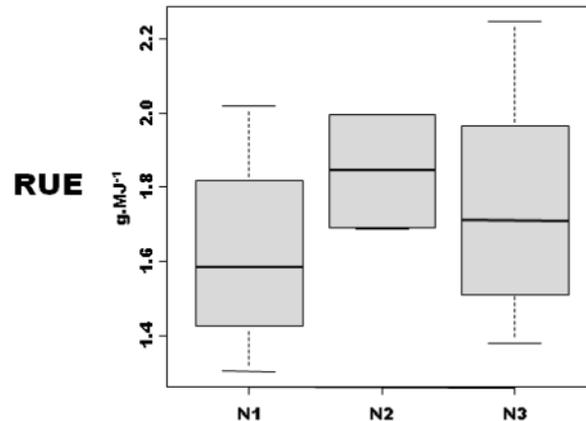


# Transformation en variable biophysique

## Estimation de la RUE ( $\epsilon_b$ )



+ accroissement de biomasse  
sur la même période (destructif)



Estimation de  
l'efficacité  
d'utilisation du  
rayonnement



## Quelques remarques

- Les capteurs sont un enjeu important pour améliorer la connaissance des espèces cultivées et assurer le suivi des cultures
- Ces mesures doivent servir de base pour définir de nouveaux indicateurs de l'état de nutrition azotée (peut-on vivre sans INN ?)
- Essayer d'estimer l'INN à partir de mesures capteurs est peu robuste
- Le développement de ces technologies modifie profondément nos manières de travailler



# Plan

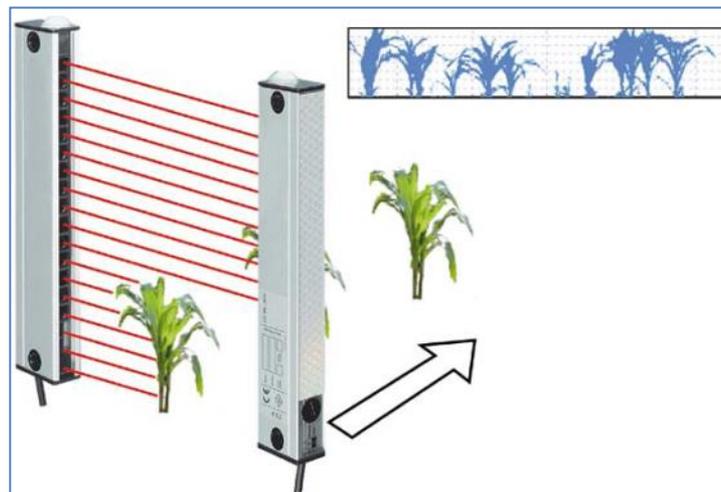
- Quelles variables 'plante' sont pertinentes pour expliquer l'efficacité d'utilisation de l'azote ?
- Ces variables sont-elles mesurables par capteurs ?
- Exemple de mise en œuvre sur le terrain
- **Perspectives**

# D'autres vecteurs...



# D'autres capteurs...

SPECTROCAM<sup>TM</sup>  
multispectral camera



# Descriptif général

Platine porte capteurs

Bras de levage

GPS

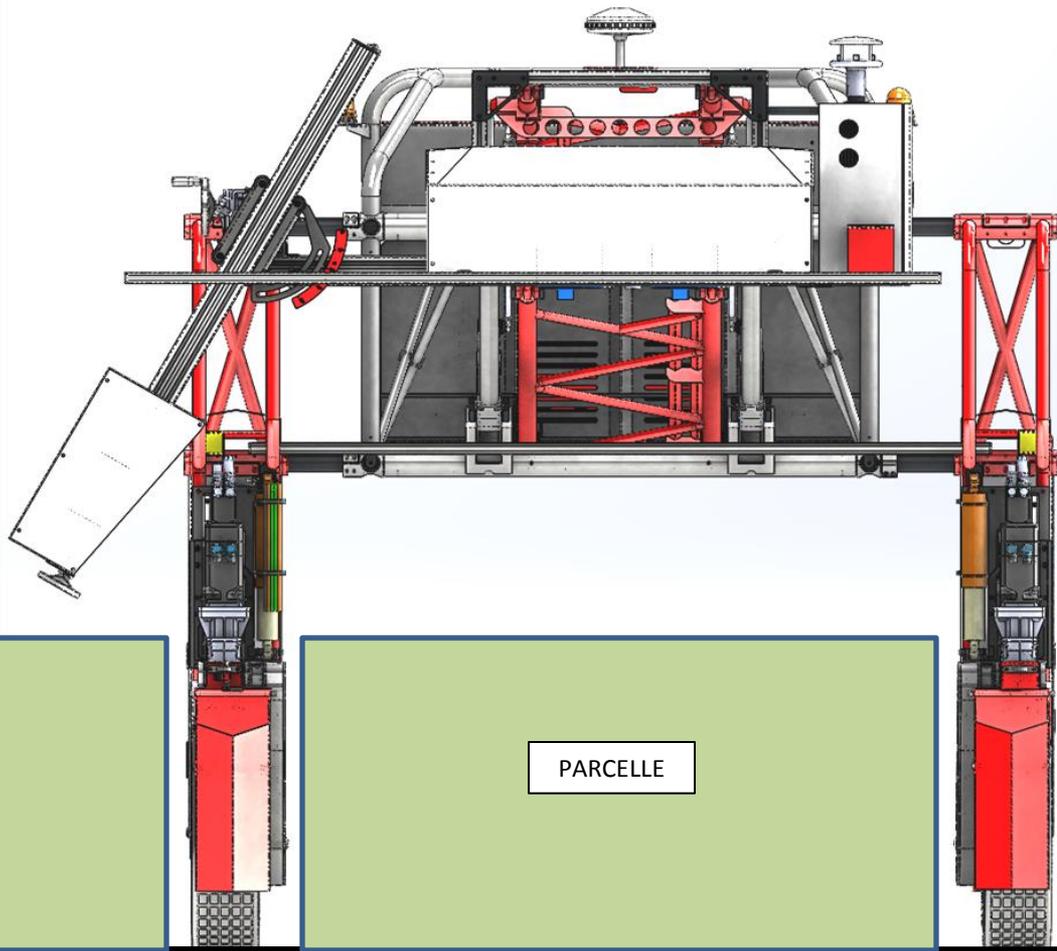
Groupe électrogène

Palpeurs de sécurité

Palpeurs de sécurité

Armoires de puissance et de commande

4 Roue motrices et directrices



Culture  
jusqu'à 1m25

PARCELLE

1m30  
MAXI

30cm

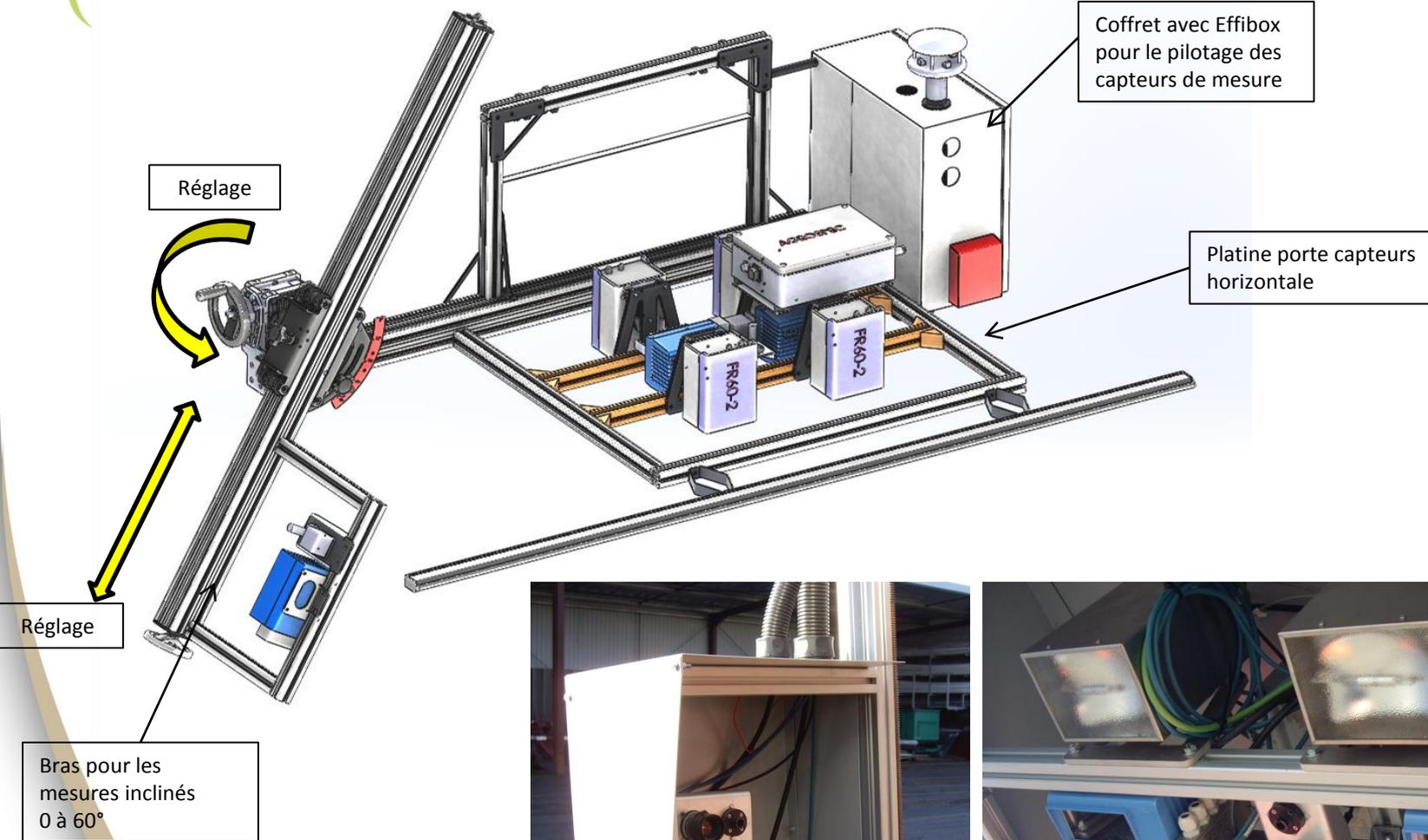
1m75 (+/-300mm)



548 BIS CHEMIN DE BRANTES  
ZI BOIVASSIÈRE  
84 700 SORGUES  
TEL : 04 32 40 98 25  
FAX : 04 32 40 99 41



# Nacelle porte capteurs





# De la mesure capteur à la variable agronomique

Mécanique  
Electronique

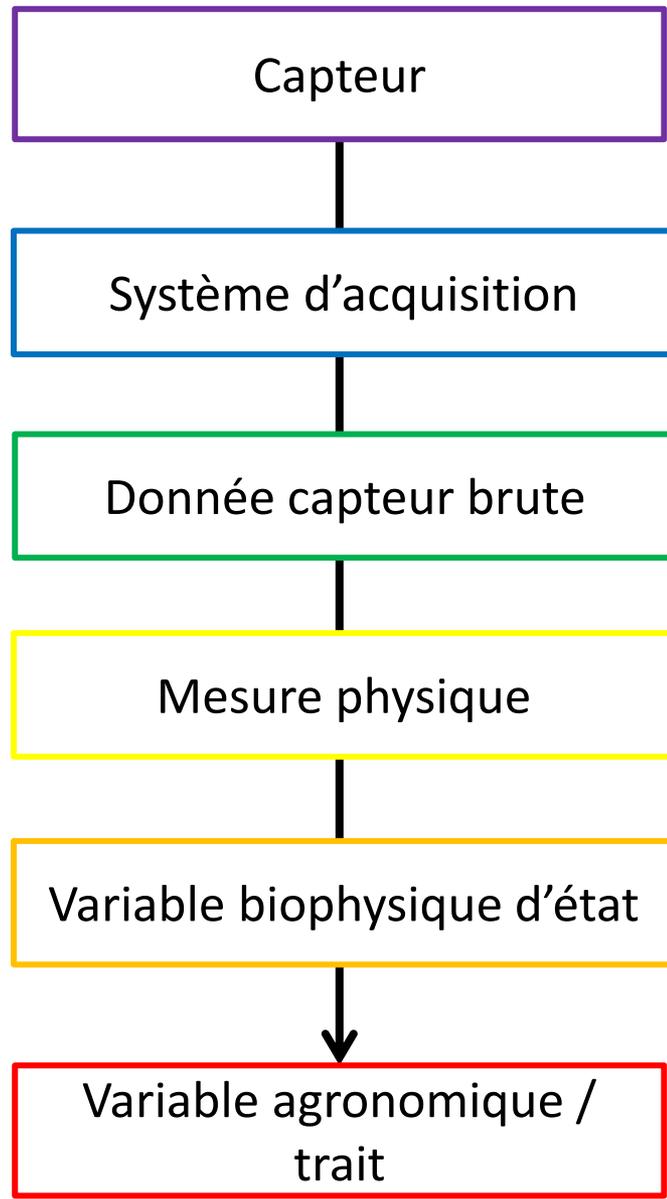
Automatique

Optronique

Physique  
Ecophysiologie

Ecophysiologie  
Agronomie

Informatique



**MECA 3D**  
UN PROJET DES SOLUTIONS  
548 BIS CHEMIN DE BRANTES  
ZI BOIVASSIÈRE  
B4 700 SORGUES  
TEL : 04 32 40 98 25  
FAX : 04 32 40 99 41

**Effidence**

**INRA**  
SCIENCE & IMPACT

**ARVALIS**  
Institut du végétal



## Une spin off de l'UMT CAPTE

- Hi-phen est une société en incubation, dirigée A. Comar, ancien thésard CIFRE ARVALIS - INRA
- Elle valorisera les travaux de R&D conduits au sein de l'UMT CAPTE
  - Industrialisation des systèmes de mesure
  - Commercialisation
  - Support technique
- Création en juillet 2014



Discussion