



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

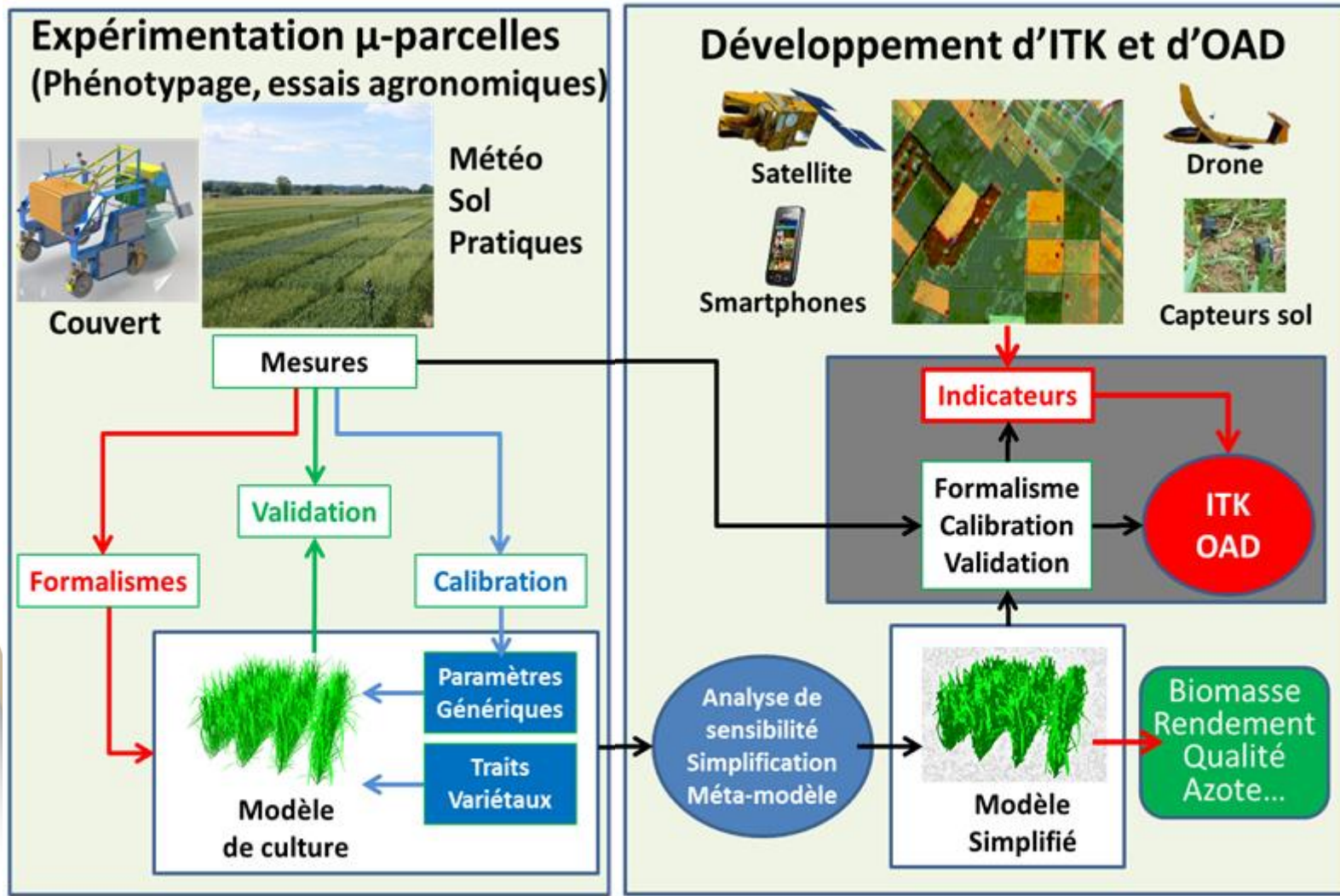


UMT CAPTE

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

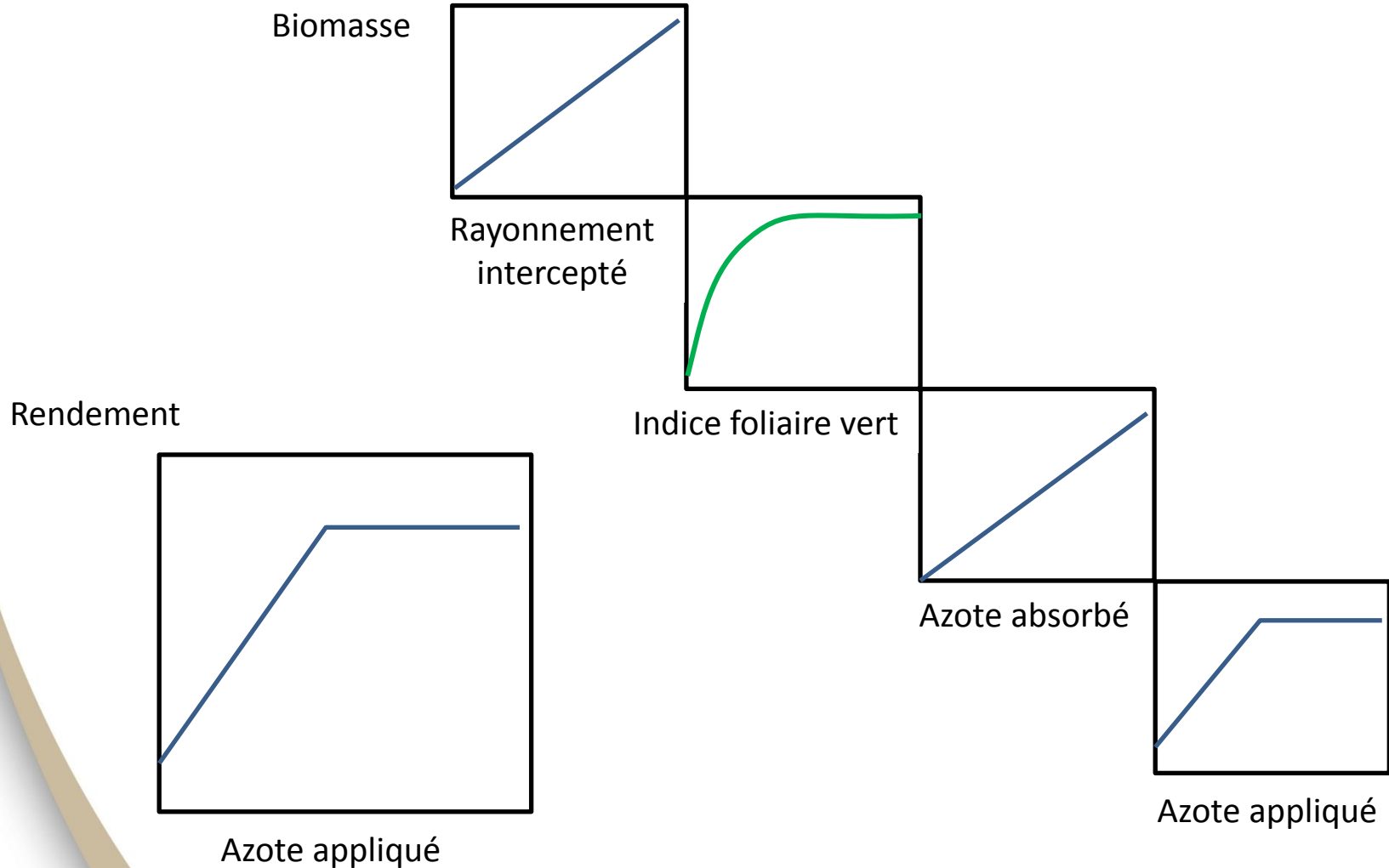


Plan

- 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



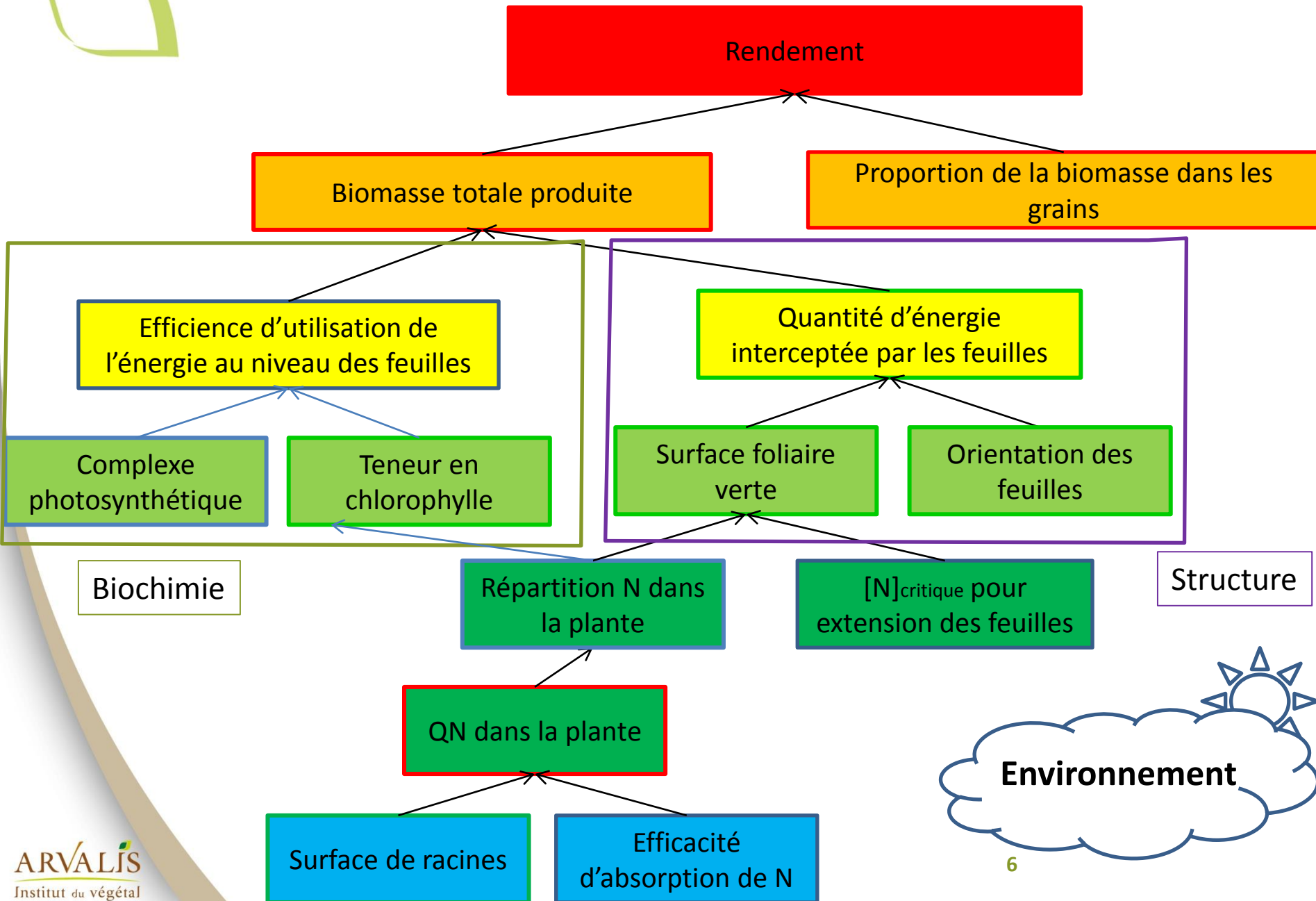
Elaboration du rendement et efficience d'utilisation de l'azote



Efficience d'utilisation de l'azote (NUE)
 $NUE = Rdt \text{ grain} / QN \text{ appliqué}$

Sylvester-Bradley, 1990

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





Architecture vs biochimie : qui a le plus de poids ?

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

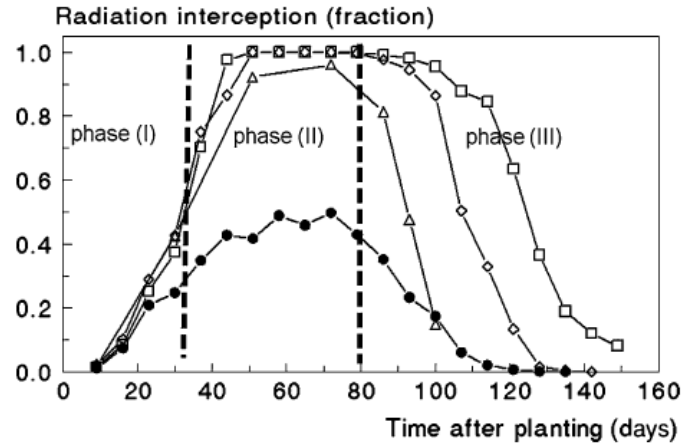
- PAR : rayonnement solaire (météo)
- RIE : proportion du rayonnement intercepté (architecture)
- RUE : efficacité d'utilisation du rayonnement (biochimie)

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, ϵ_i)
- Maximiser l'utilisation du rayonnement intercepté (RUE, ϵ_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⁻¹ N (triangle), 200 kg ha⁻¹ N (diamond) and 400 kg ha⁻¹ N (square). Data from 1990 in Vos (1997)



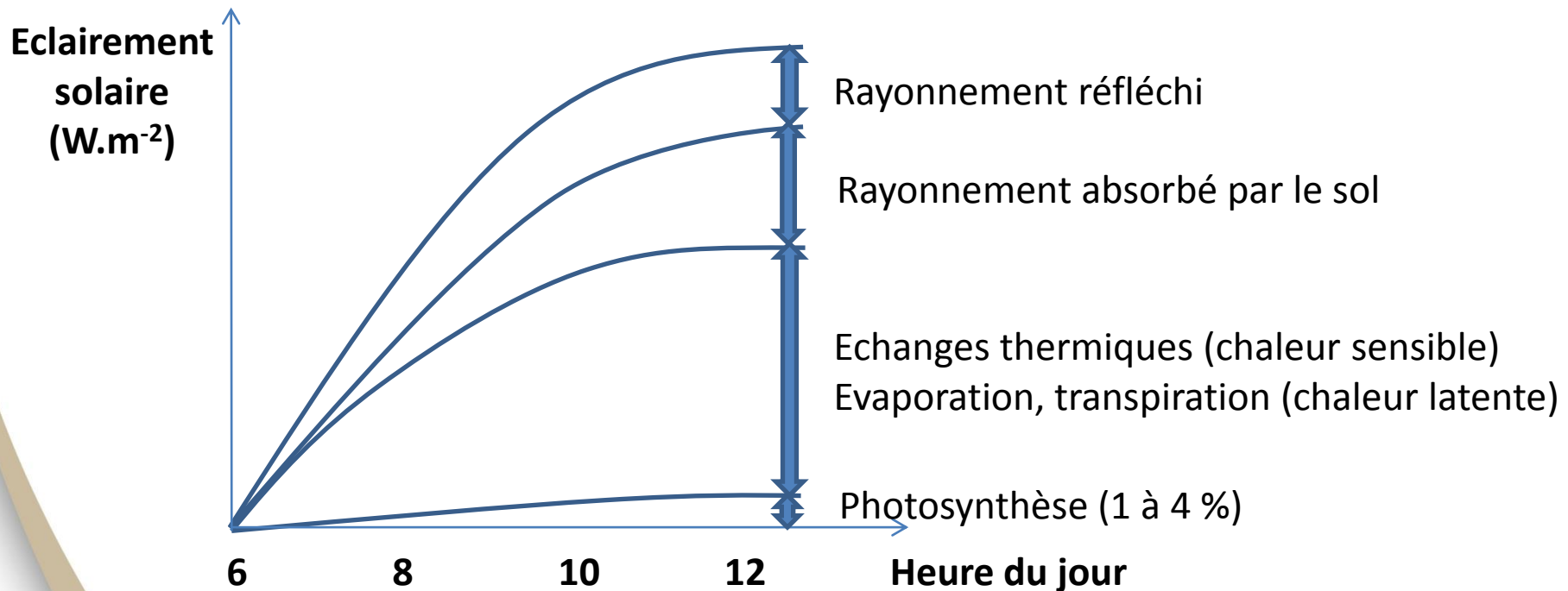
- Effet de l'azote sur la croissance de la pomme de terre (Vos et al., 2009)
 - Effet fort sur la vitesse d'extension des feuilles et sur la durée d'émission des feuilles
 - Peu d'effet sur la teneur en azote des feuilles et sur l'épaisseur des feuilles
 - Peu d'effet sur le ratio poids de feuille/poids 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 :

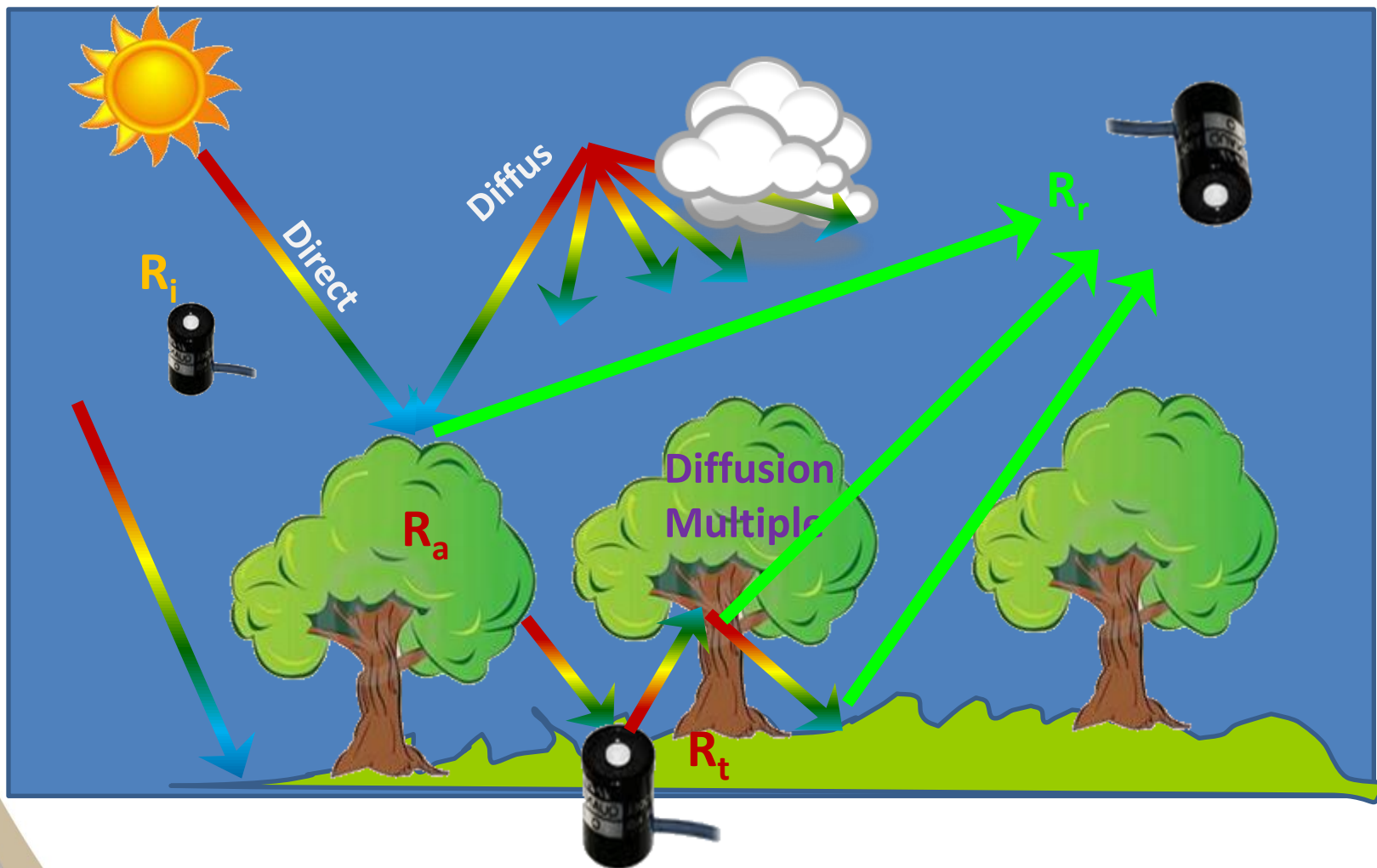
- Quantitativement, par rapport à l'énergie solaire incidente



- Qualitativement (composition spectrale) : photomorphogenèse



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



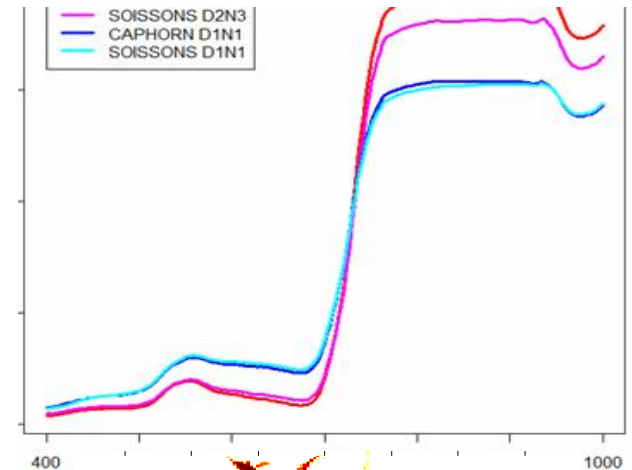


Variables accessibles

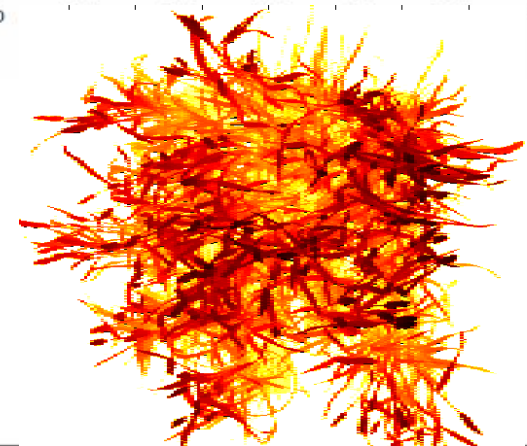
Fraction de couverture, surface foliaire



Contenu en Chl du couvert



Hauteur, densité du couvert



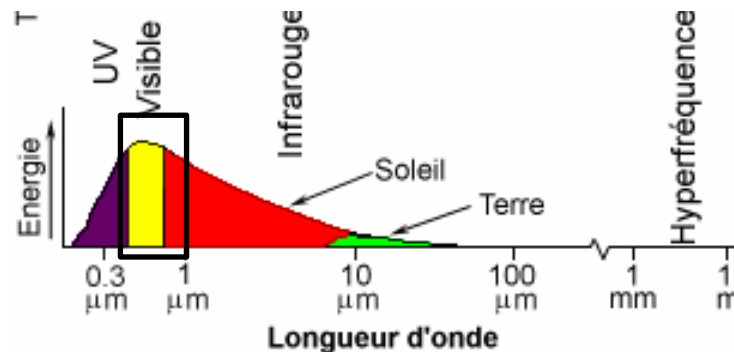


Quels indicateurs sont mesurables par les capteurs ?

- 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

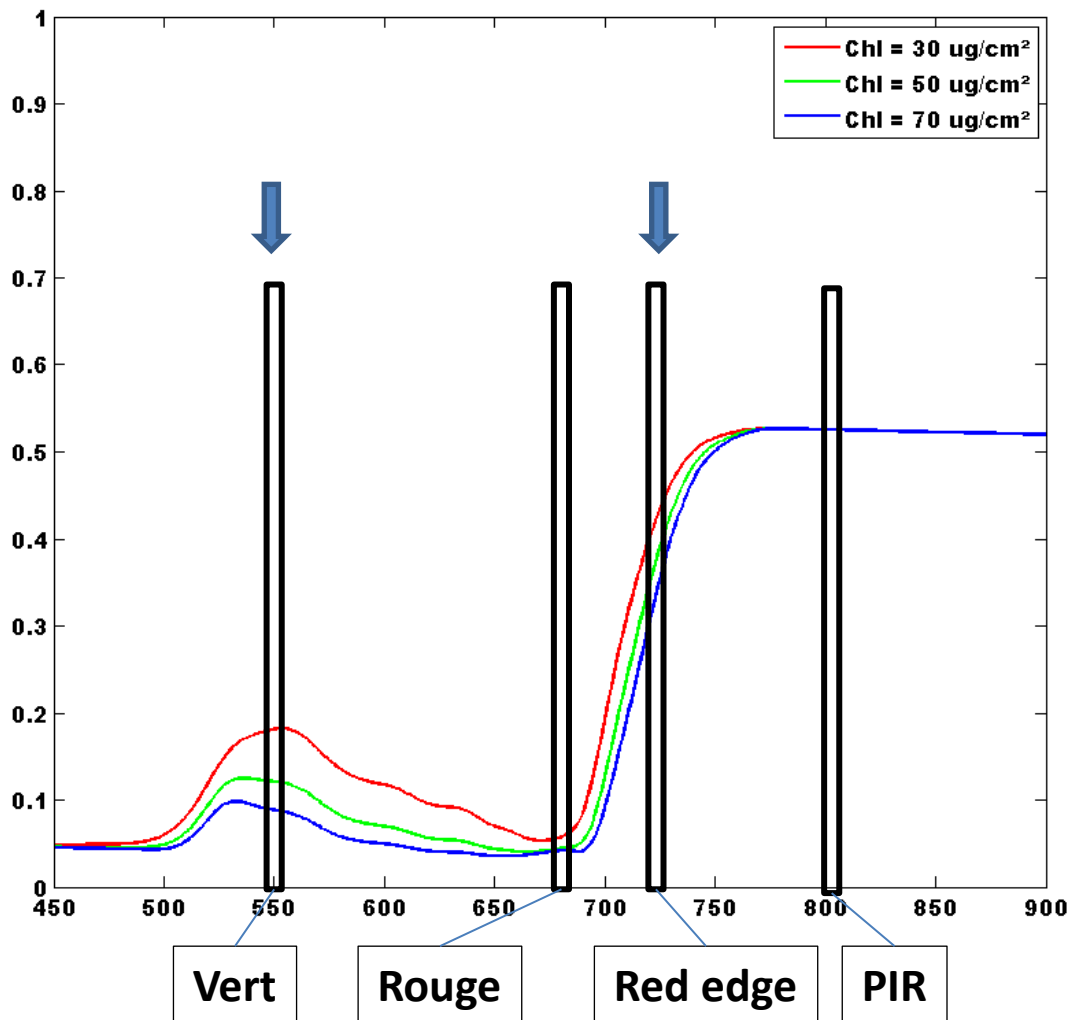
- Mesurent la réflectance de la culture : proportion du rayonnement incident réfléchi par la végétation
- Dépend :
 - Du contenu biochimique des éléments (chlorophylle, eau, ...)
 - De l'architecture spatiale des éléments (surface de feuilles, orientation, ...)
- Mesuré dans un ensemble de longueurs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





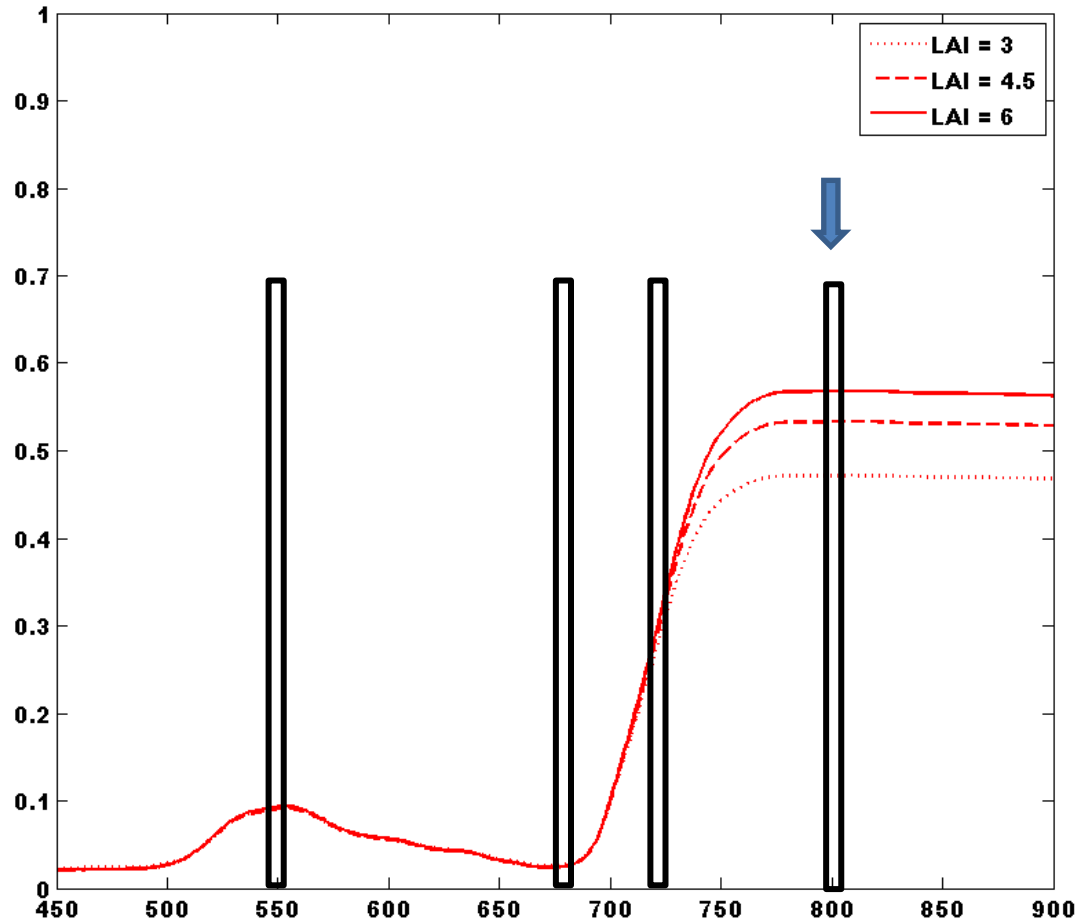
Echelle de la feuille

Effet de la teneur en chlorophylle



Echelle du couvert végétal

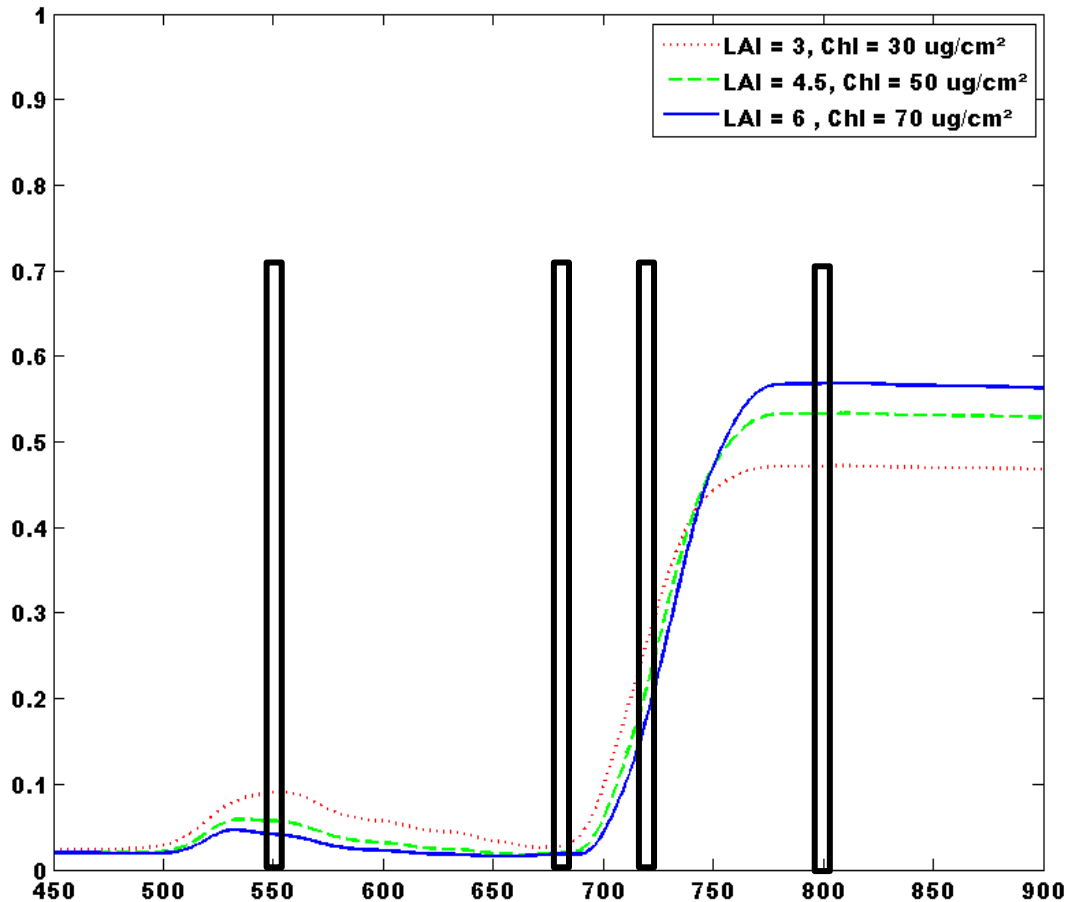
Effet de l'indice foliaire



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 :**

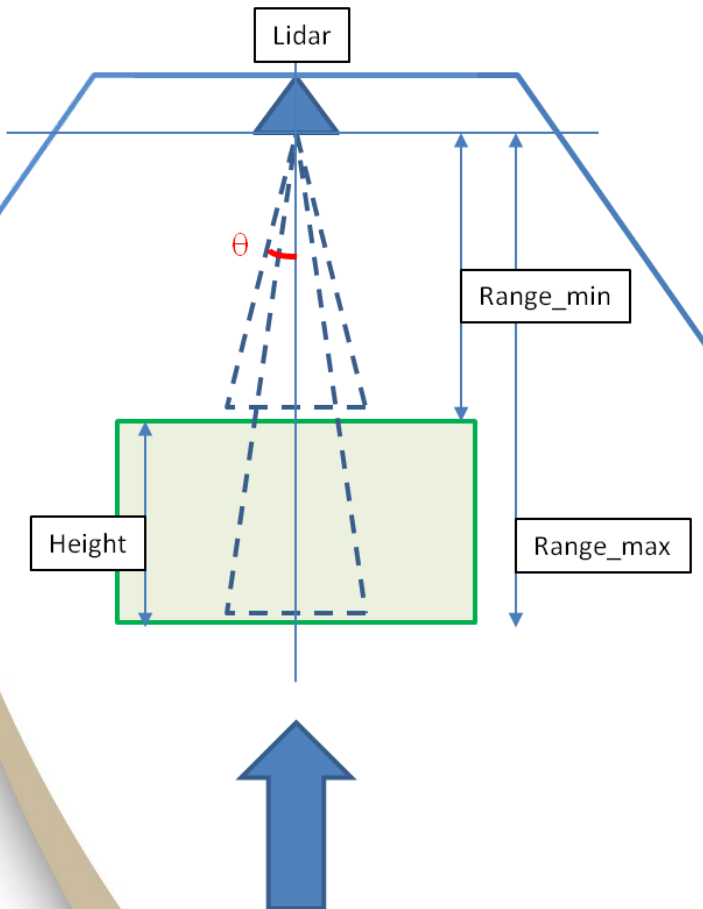
f(rouge, red edge, PIR)

-> 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

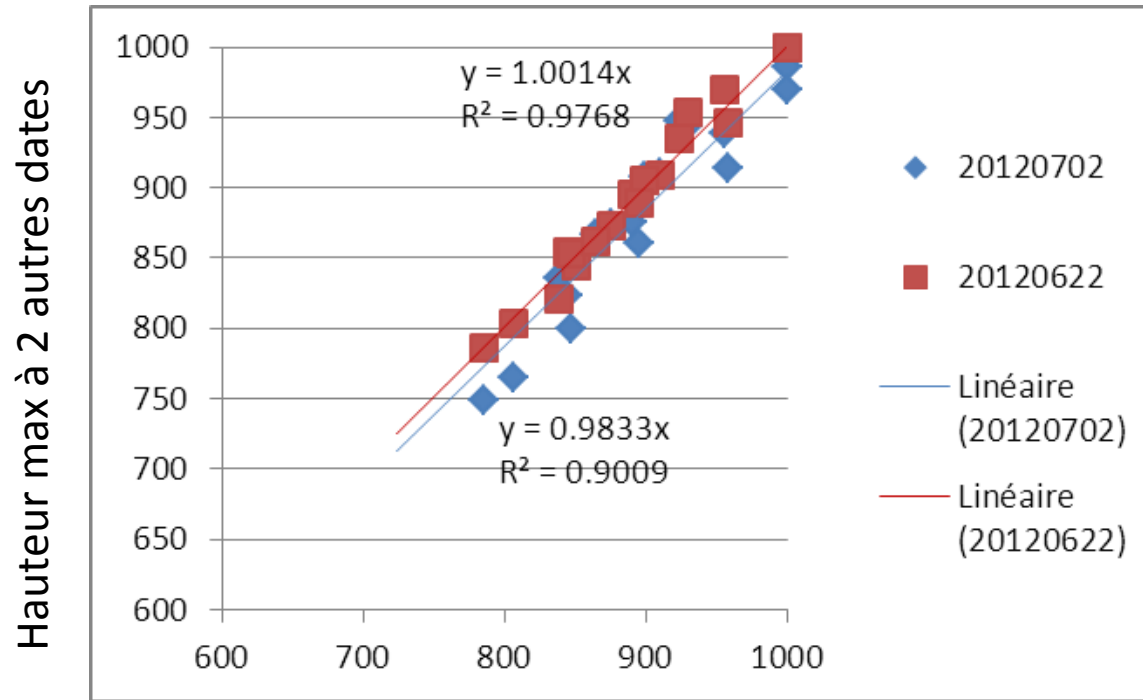
On souhaite apporter un complément aux informations déjà disponibles.

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

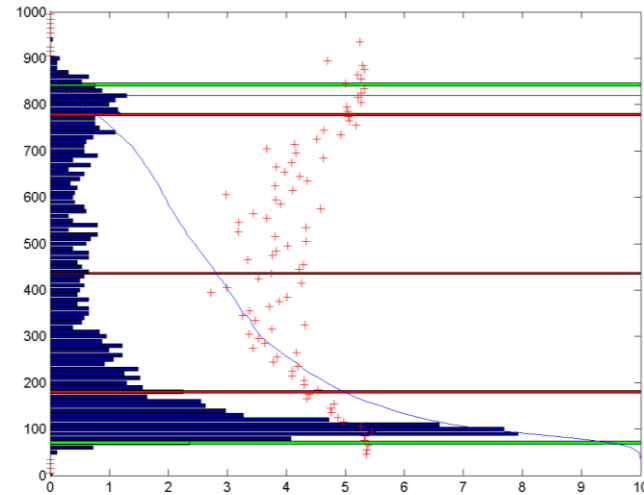
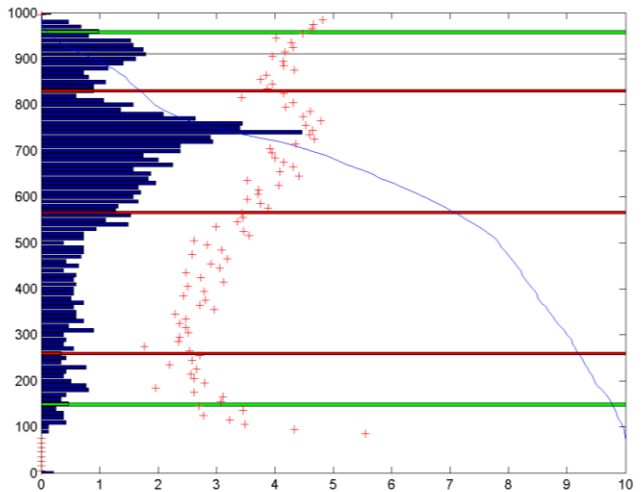


Hauteur max au 21/06/2012



Interception du rayonnement – Structure

Profil moyen en Z

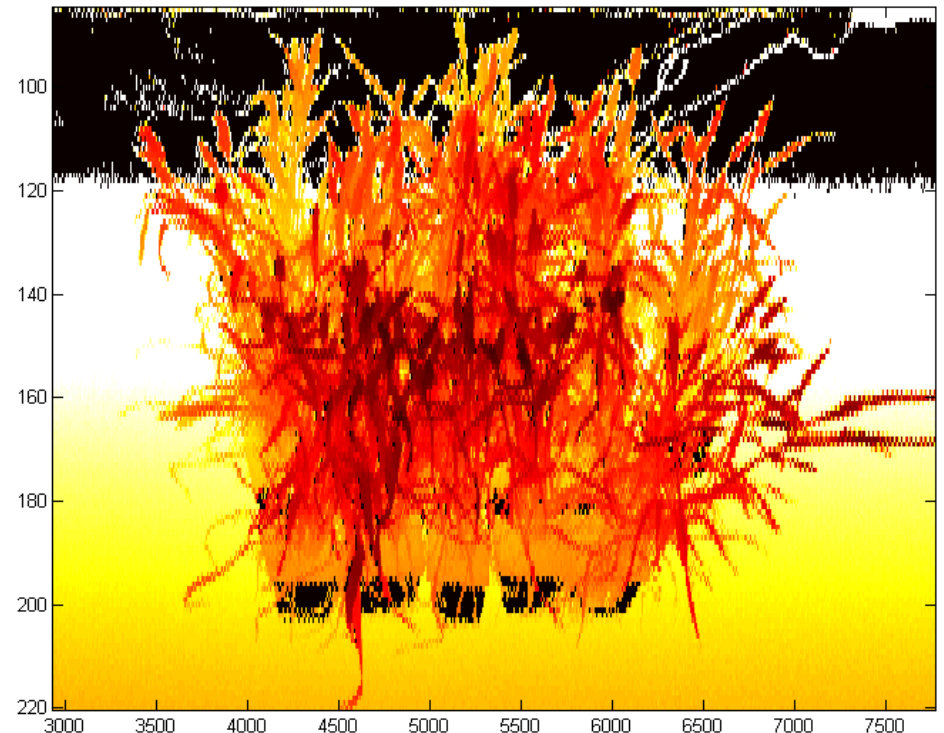
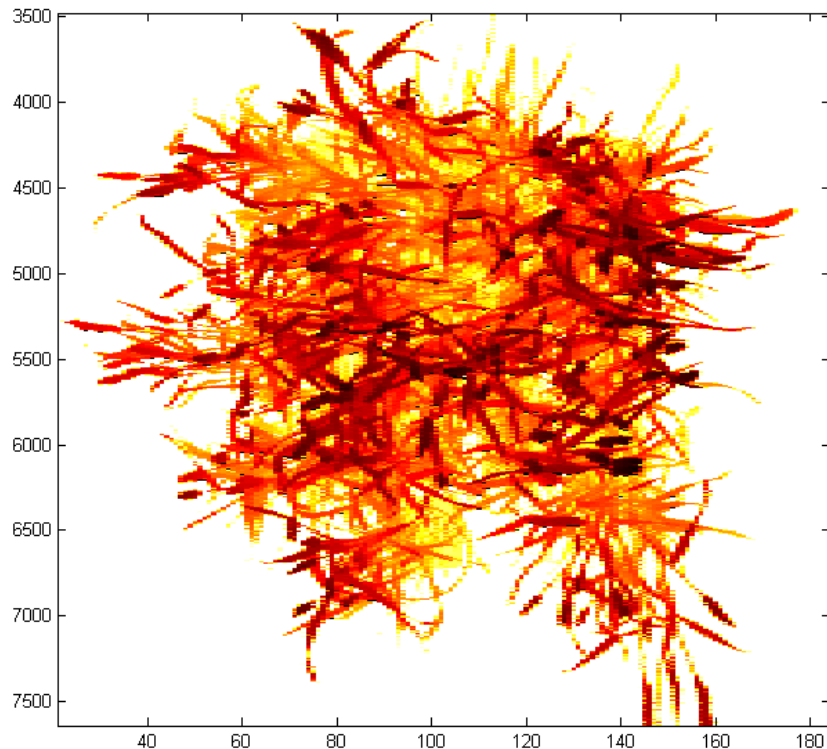




Interception du rayonnement – Profil 2D

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

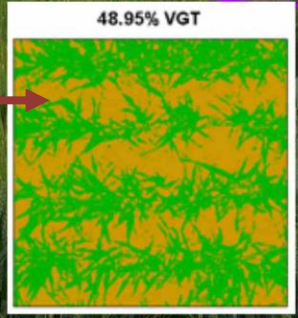
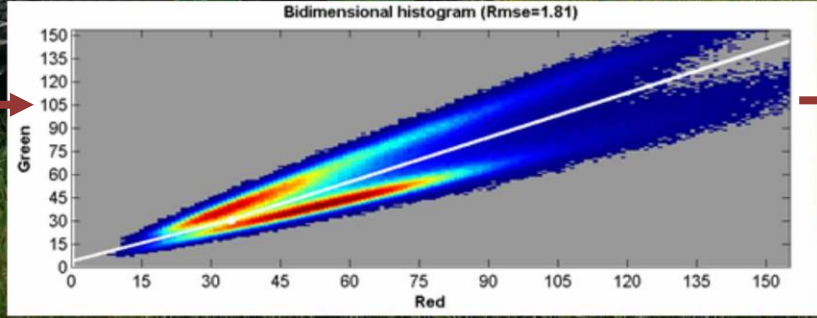
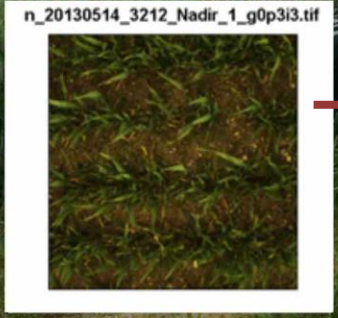
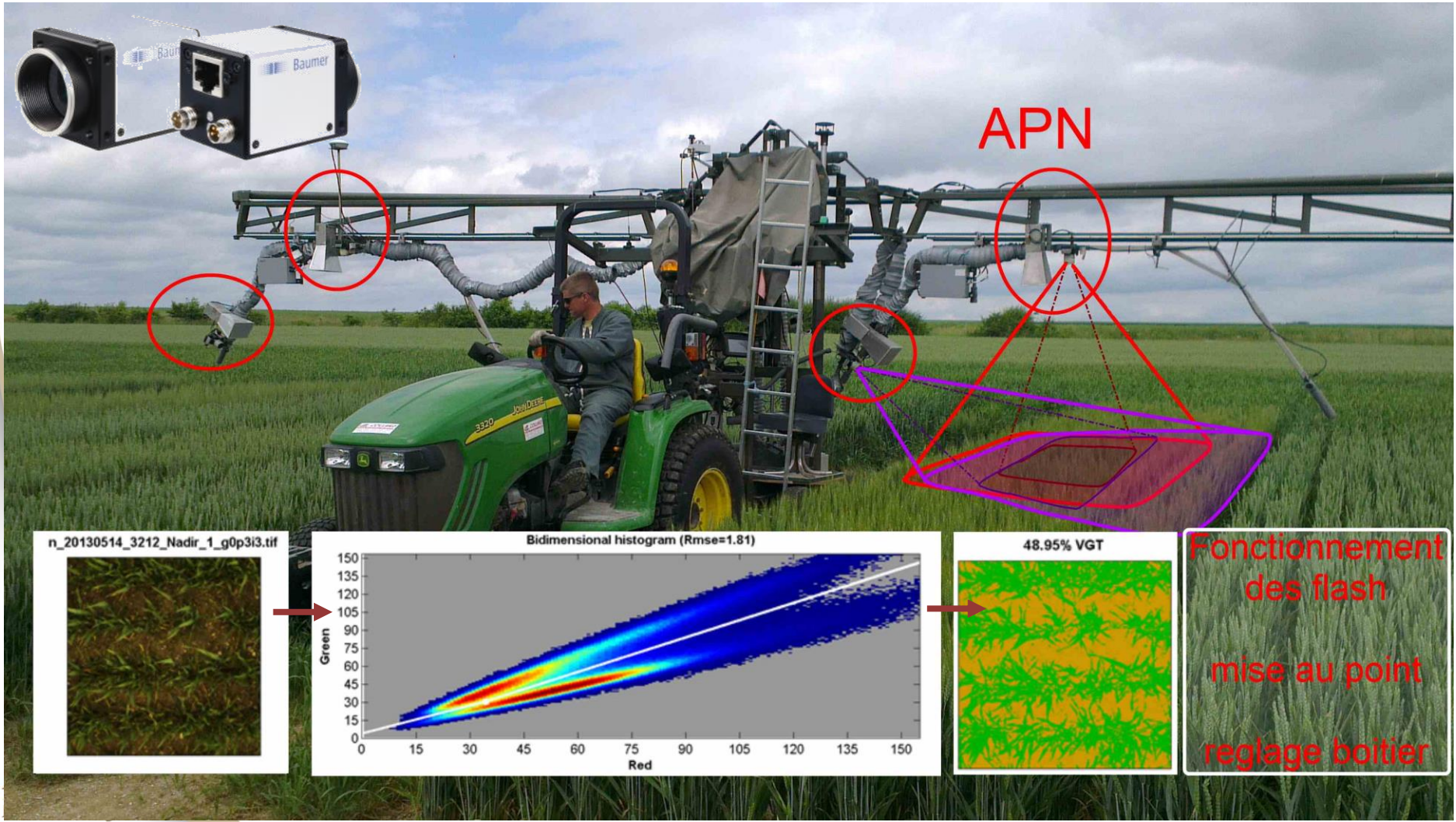
En 2012-2013, à Chalons en Champagne, étude de la réponse des variétés à une carence limitée en azote :

- 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

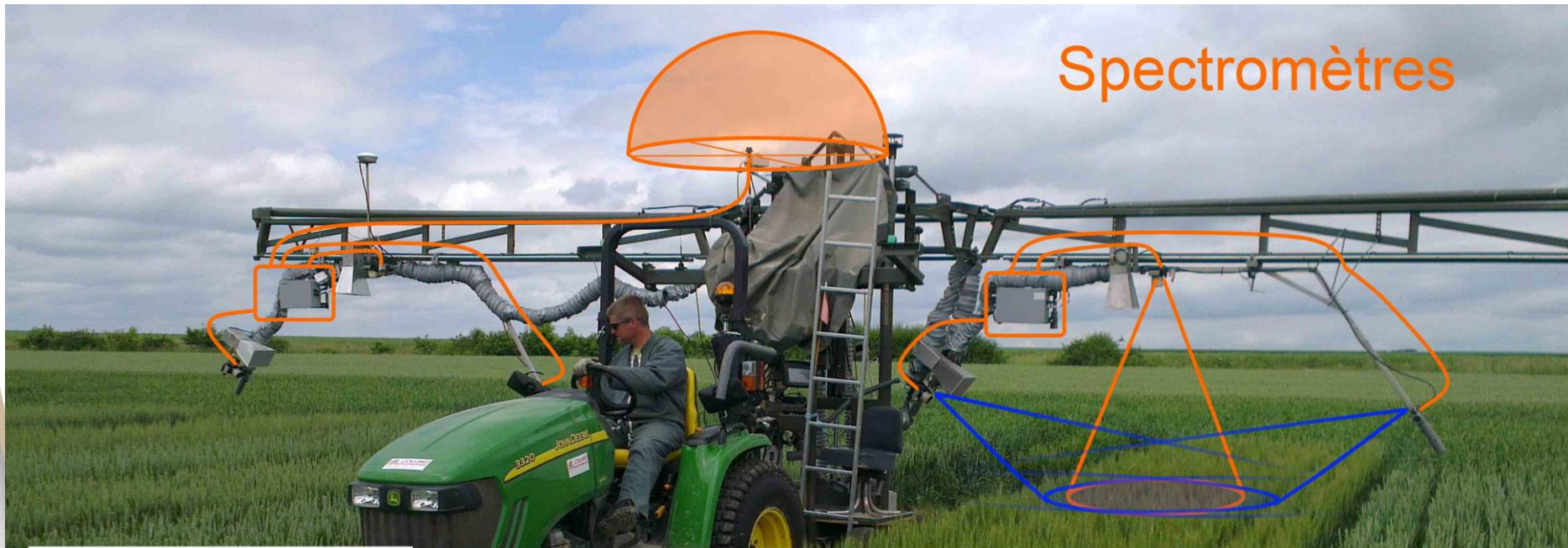


Fonctionnement
des flash
mise au point
reglage boitier

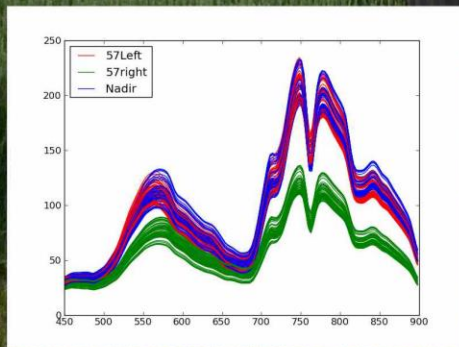


Acquisition des données

Réflexion de la lumière pour estimation du contenu biochimique



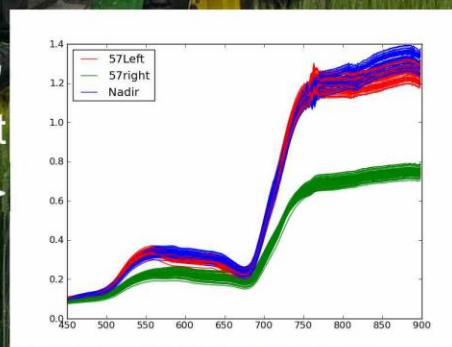
Spectromètres



Spectres Bruts

divisé par l'éclairage

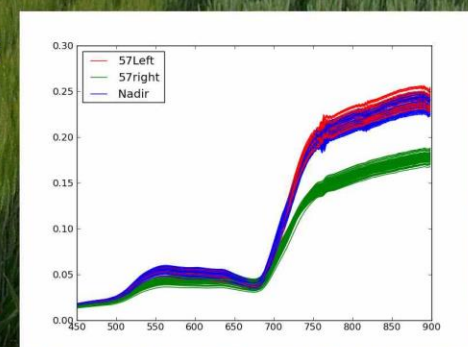
Référence



Reflectance Instrumentale

corrigé des réponses spectrales

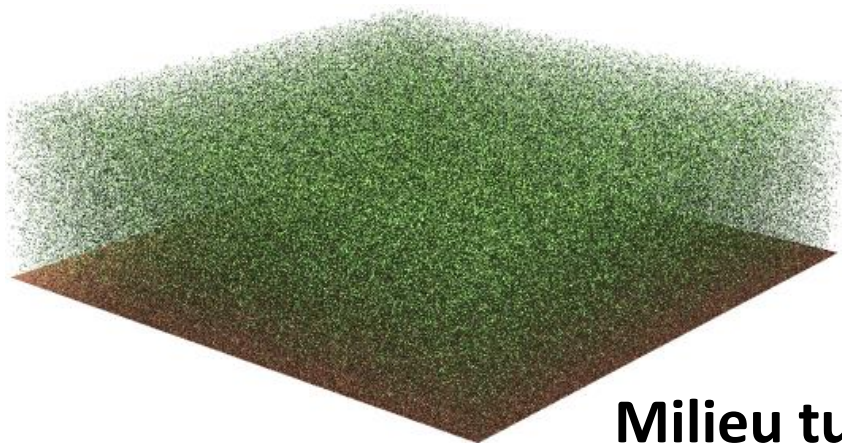
Inter-Calibration



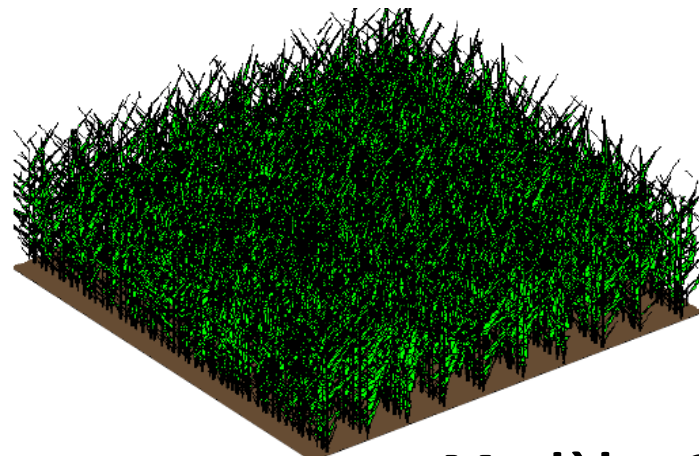
Mesure de Reflectance



De la donnée physique à la variable agronomique

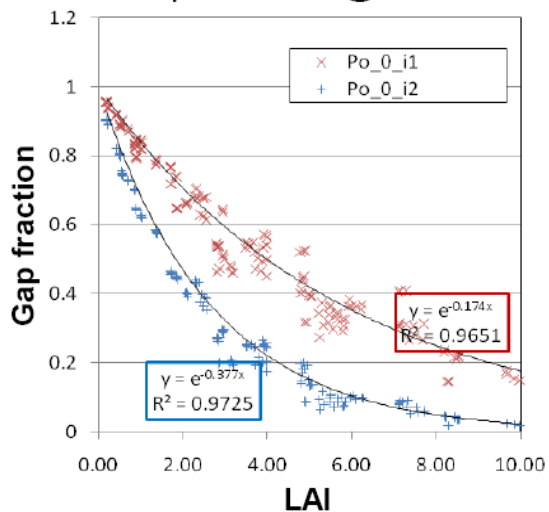


Milieu turbide

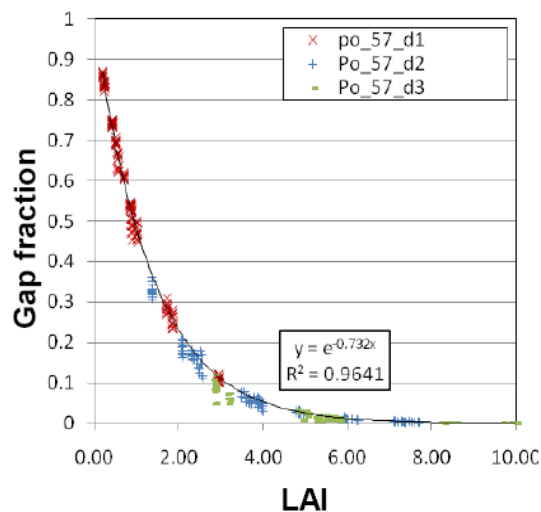


Modèles 3D

Gap fraction @ 0°



Gap fraction @ 57°





Analyse des données

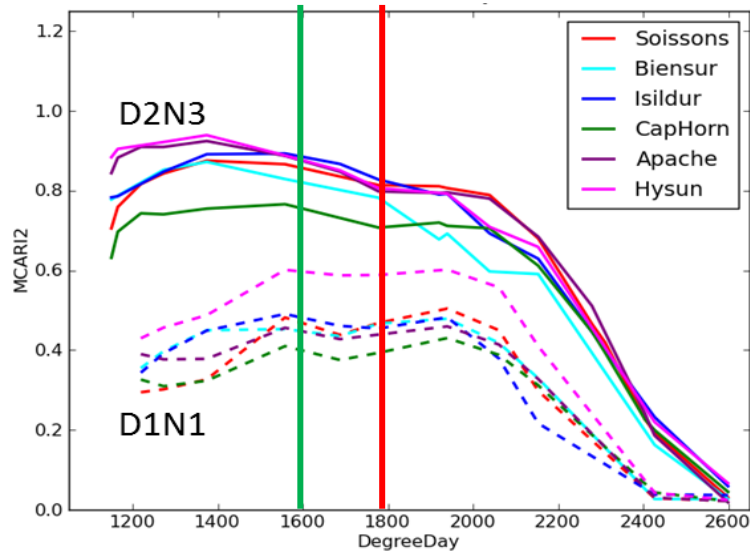
Différences entre variétés / environnements

Indice

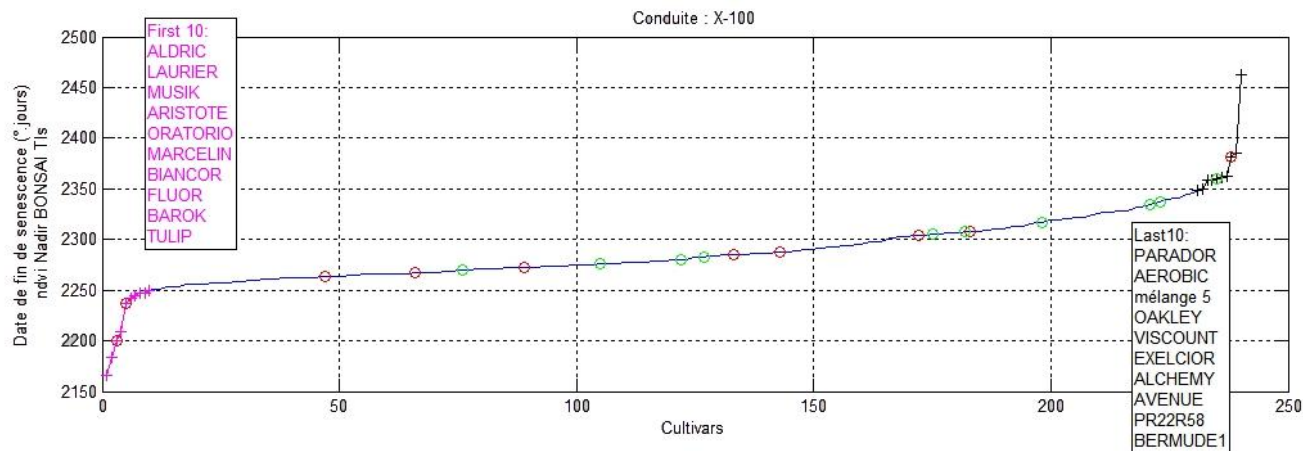
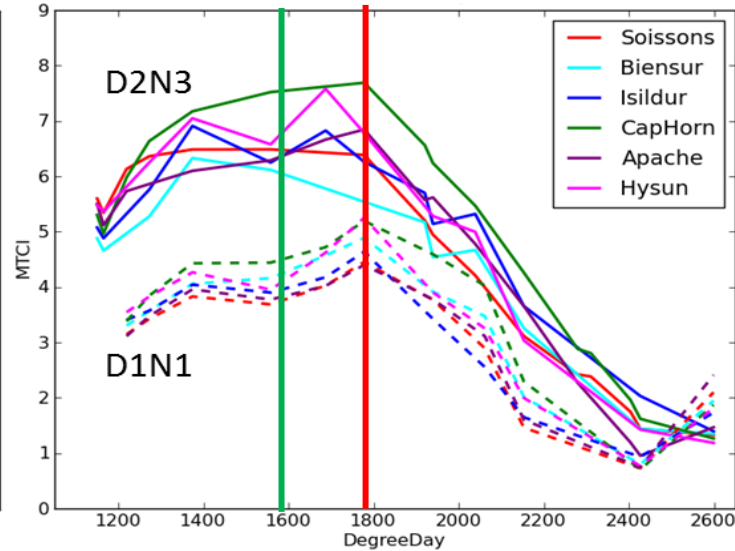
Fraction verte

Epiaison

Floraison



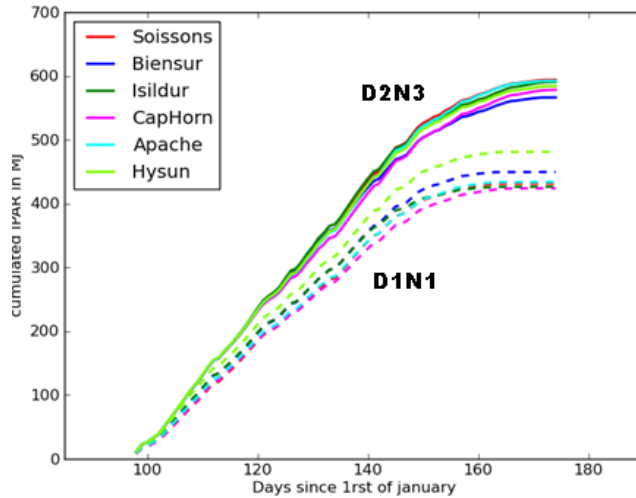
Indice Chlorophylle



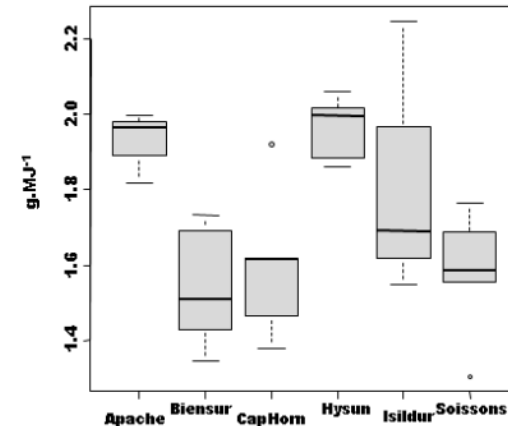
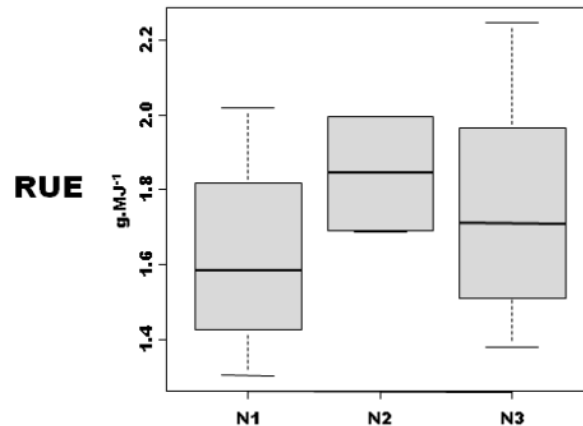


Transformation en variable biophysique

Estimation de la RUE (ϵ_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

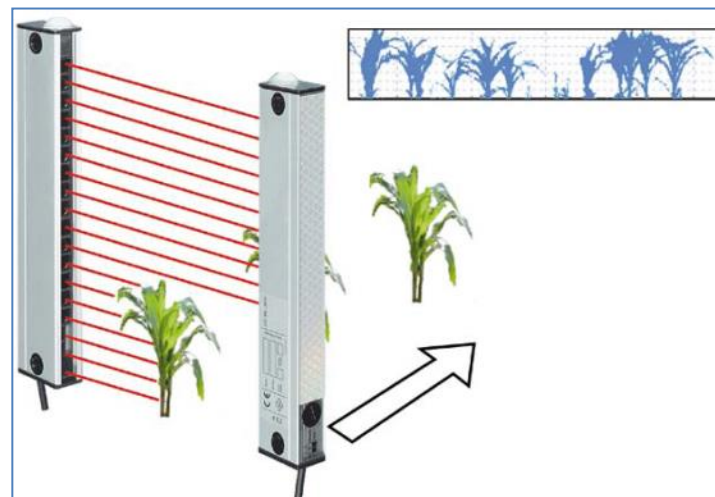
- Quelles variables 'plante' sont pertinentes pour expliquer l'efficacité d'utilisation de l'azote ?
- Ces variables sont-elles mesurables par capteurs ?
- Exemple de mise en œuvre sur le terrain
- **Perspectives**

D'autres vecteurs...



D'autres capteurs...

SPECTROCAMTM
multispectral camera



Descriptif général

Platine porte capteurs

Bras de levage

GPS

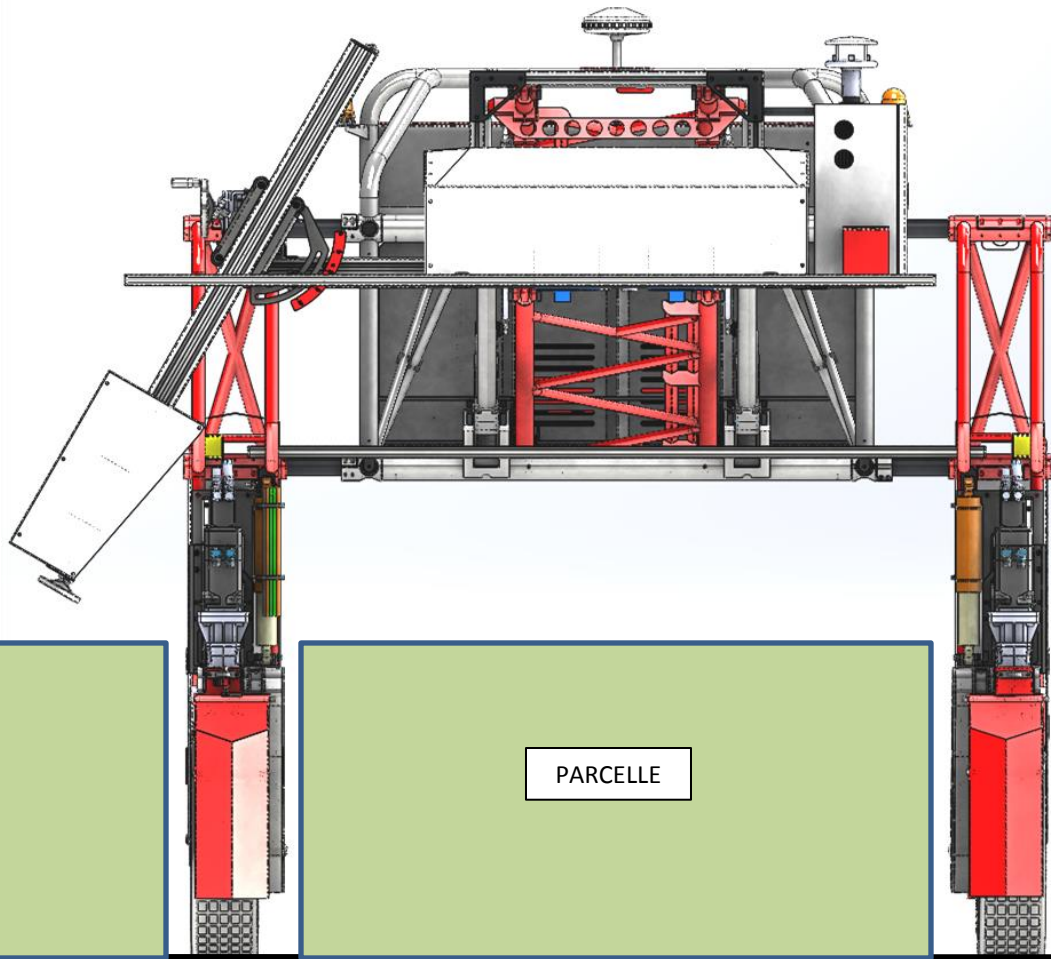
Groupe électrogène

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)



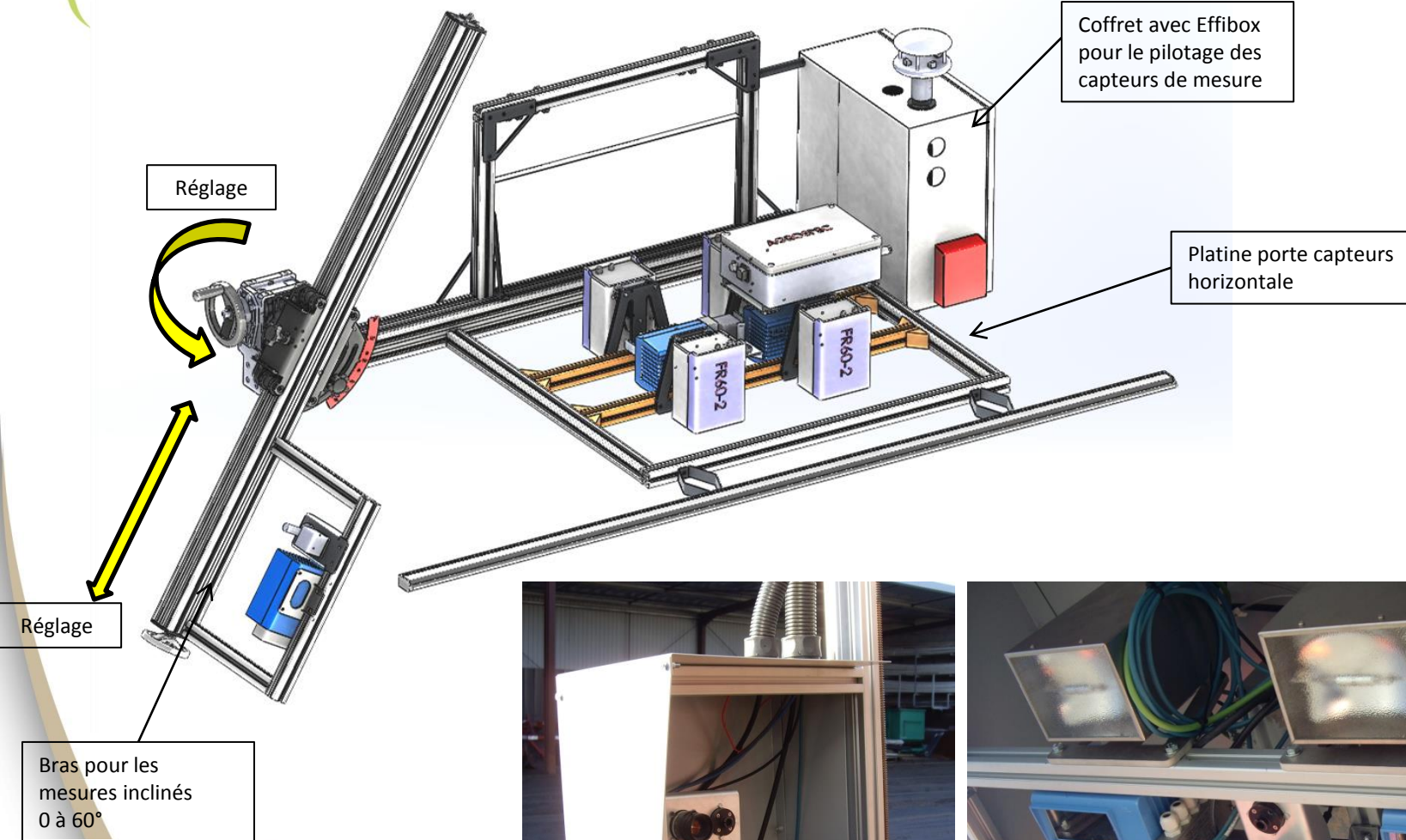
MECA 3D

UN PROJET
DES SOLUTIONS

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

Capteur

Système d'acquisition

Donnée capteur brute

Mesure physique

Variable biophysique d'état

Variable agronomique /
trait

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