

# L'agriculture de précision :

## *applications et perspectives en grandes cultures et prairies*

**André Gavaland**

**INRA – Unité Expérimentale Grandes Cultures d'Auzeville**

**Vladimir Goutiers**

**INRA – Unité Mixte de Recherche AGIR (équipe Orphée)**

# Plan de l'exposé

- Définition de l'agriculture de précision
- Les systèmes d'aide à la conduite
- Agriculture de précision et modulation des intrants
- Résistivité électrique des sols et fertilité
- Proxidétection par drone
- Vers un OAD pour les prairies
- Quelles perspectives ?
- Quelles attentes des utilisateurs ?



# Définition de l'agriculture de précision

« le bon intrant / au bon moment / au bon emplacement /  
/ à la bonne dose/ de la bonne manière »

Coller au plus près des besoins de la culture partout dans  
la parcelle

- Prendre en compte la variabilité à l'intérieur des parcelles
- Moduler la conduite culturale en fonction de cette variabilité

Objectifs :

- Réduire les charges opérationnelles
- Préserver l'environnement : limiter les intrants
- Améliorer la traçabilité

# « Précision farming » : applications de la géolocalisation en agriculture

## Agriculture de précision

### *Indicateurs spatialisés*

- Plante
  - Biomasse : NDVI, LAI,
  - Nutrition N : réflectance
  - Rendement, humidité du grain
- Sol (texture, résistivité, ...)

modulation de dose / d'action  
(travail du sol, semis, fertilisation, phytos)

## Précision dans l'agriculture

- Arpentage, guidage, autoguidage
- Demi-tour automatique
- Coupures de tronçons de rampe
- Robotisation des itk

- Évite les recoupements
- Limite les zones de tassement
- Automatise les interventions

## Économie

- de temps et d'énergie (gazole)
- d'intrants (phytos, semences, engrais)



# Précision dans l'agriculture : quelques applications du GPS

# Barre de guidage sur tracteur

- Le chauffeur suit les indications de direction sur une console à diodes

Console



Barre à diodes



Pocket PC



- L'allumage des diodes indique la direction à suivre (à droite ou à gauche). Le chauffeur corrige manuellement la direction du tracteur.
- Le boîtier d'enregistrement permet la réalisation de tâches secondaires (réglage de la largeur de travail, choix du mode courbe ou ligne droite, ...)

# Autoguidage de tracteur

- Le tracteur est guidé automatiquement par GPS avec correction différentielle ou GPS système RTK.
- 2 systèmes :
  - action **sur l'hydraulique** du tracteur (orbitrol)
  - action sur le volant du tracteur



molette



volant universel

# Autoguidage: quelques applications



Photo Géopro



Photo Géopro

# Autoguidage de la bineuse

On ajoute une antenne RTK sur la bineuse



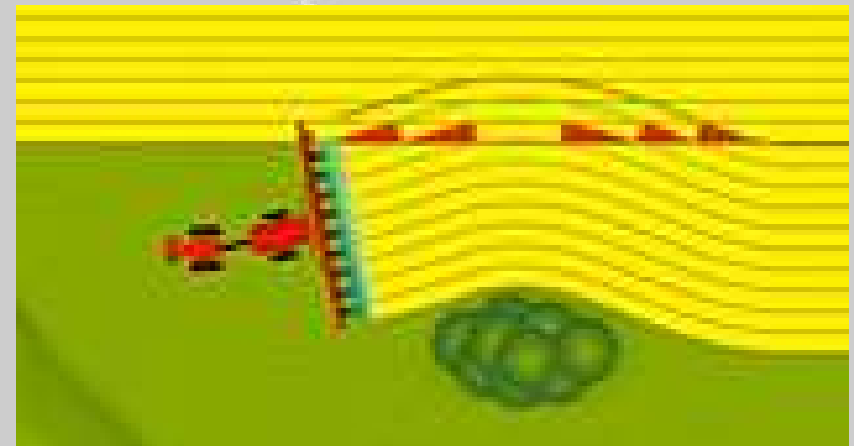
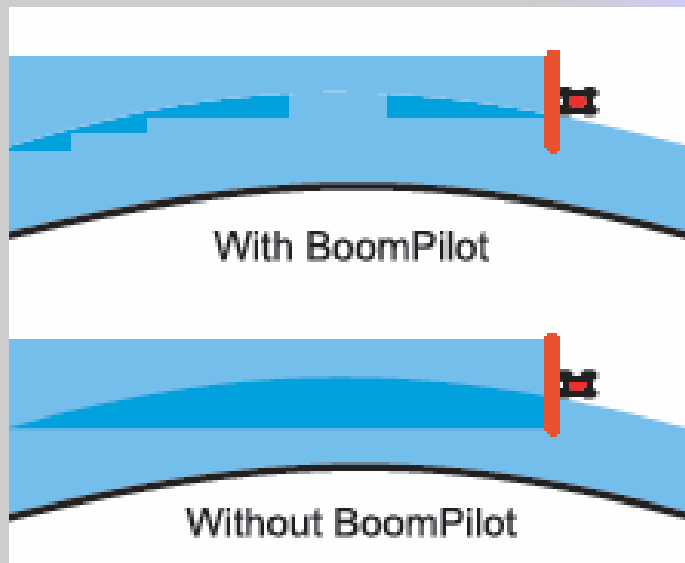
Photo Géopro

Condition : il faut que le semis ait été réalisé avec un guidage RTK

# Coupures de tronçons

La coupure de tronçons consiste à fermer automatiquement les tronçons de la rampe du pulvérisateur lorsqu'il passe au dessus des zones déjà traitées (fourrières, pointes...)

- géolocalisation par GPS
- enregistrement des zones déjà traitées



« Grâce à ce système, on peut **réduire** la pulvérisation de **0,3 à 5%** »

# Discrimination sol nu / plantes : weedseeker



On ne traite que les zones enherbées





# Agriculture de précision avec gestion modulée des intrants

# La démarche de l'agriculture de précision

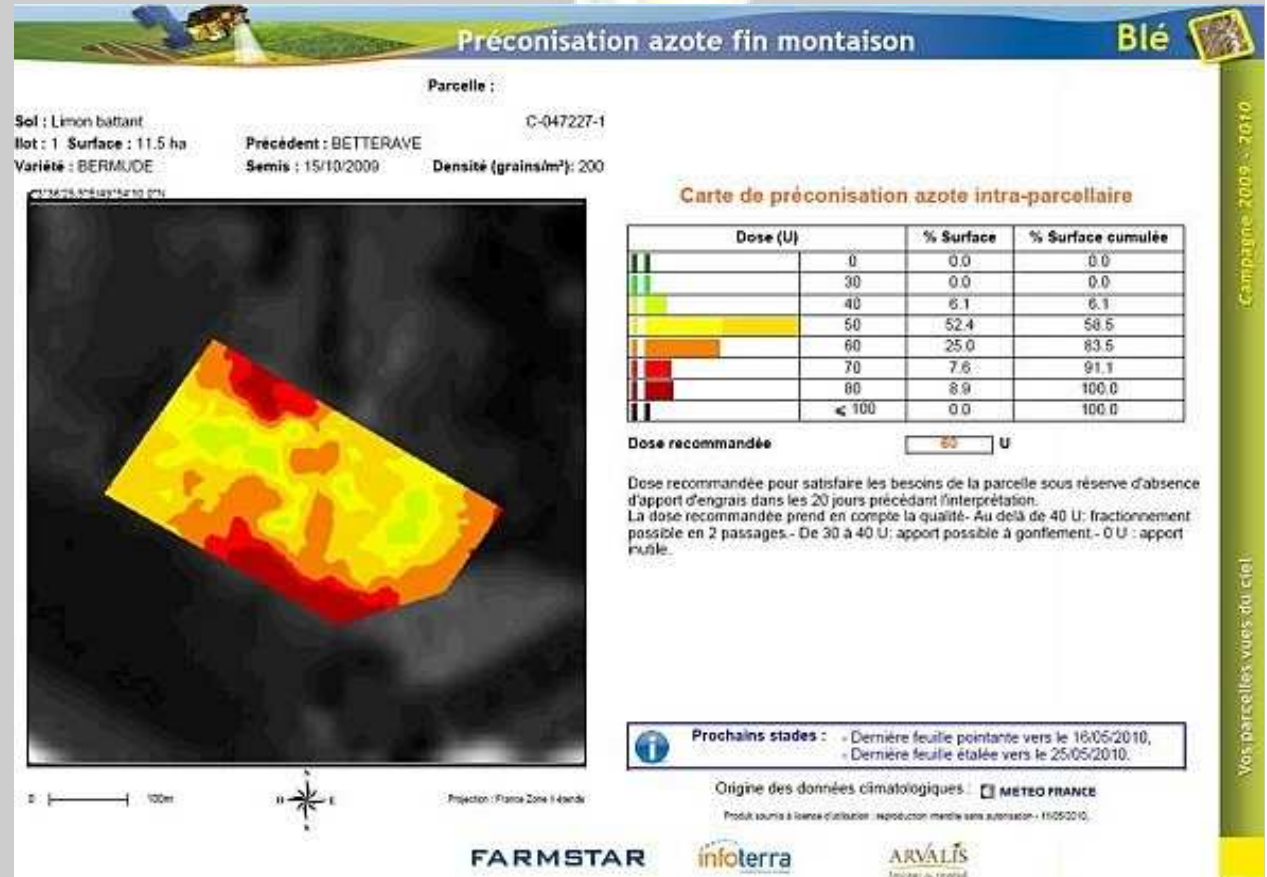
1. Acquisition de données sur l'hétérogénéité de la parcelle
2. Transfert et stockage des données
3. Visualisation et analyse de données
4. Décisions techniques : cartes de préconisation
5. Modulation des actions

# Évaluation des besoins en azote par imagerie satellite

Farmstar et Cérélia :

Création puis envoi à l'agriculteur de cartes de préconisation pour moduler la fertilisation

Estimation et prise en compte du risque de verse



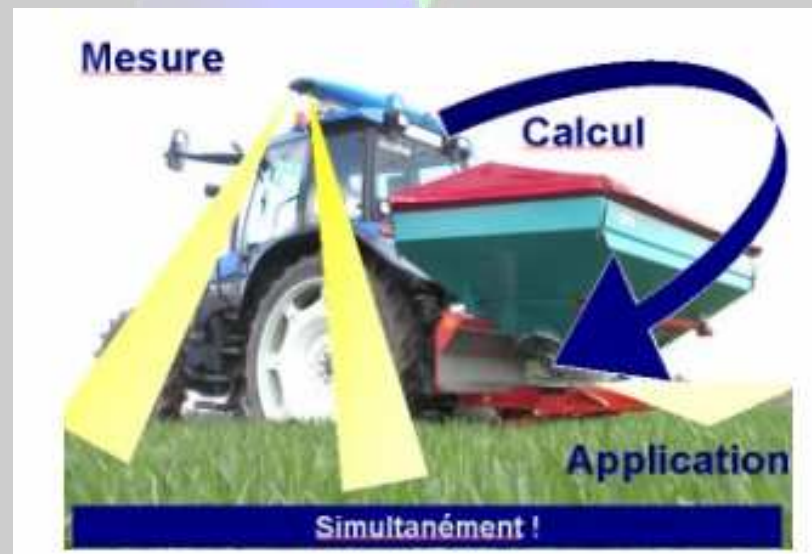
## Limites

- 1- délai entre prise d'image et préconisation
- 2- il faut un épandeur qui permette de faire de la modulation

# Préconisation et application en temps réel

« Des capteurs embarqués analysent en continu la culture et commandent le boîtier de régulation de l'épandeur ou du pulvérisateur »

## N Sensor



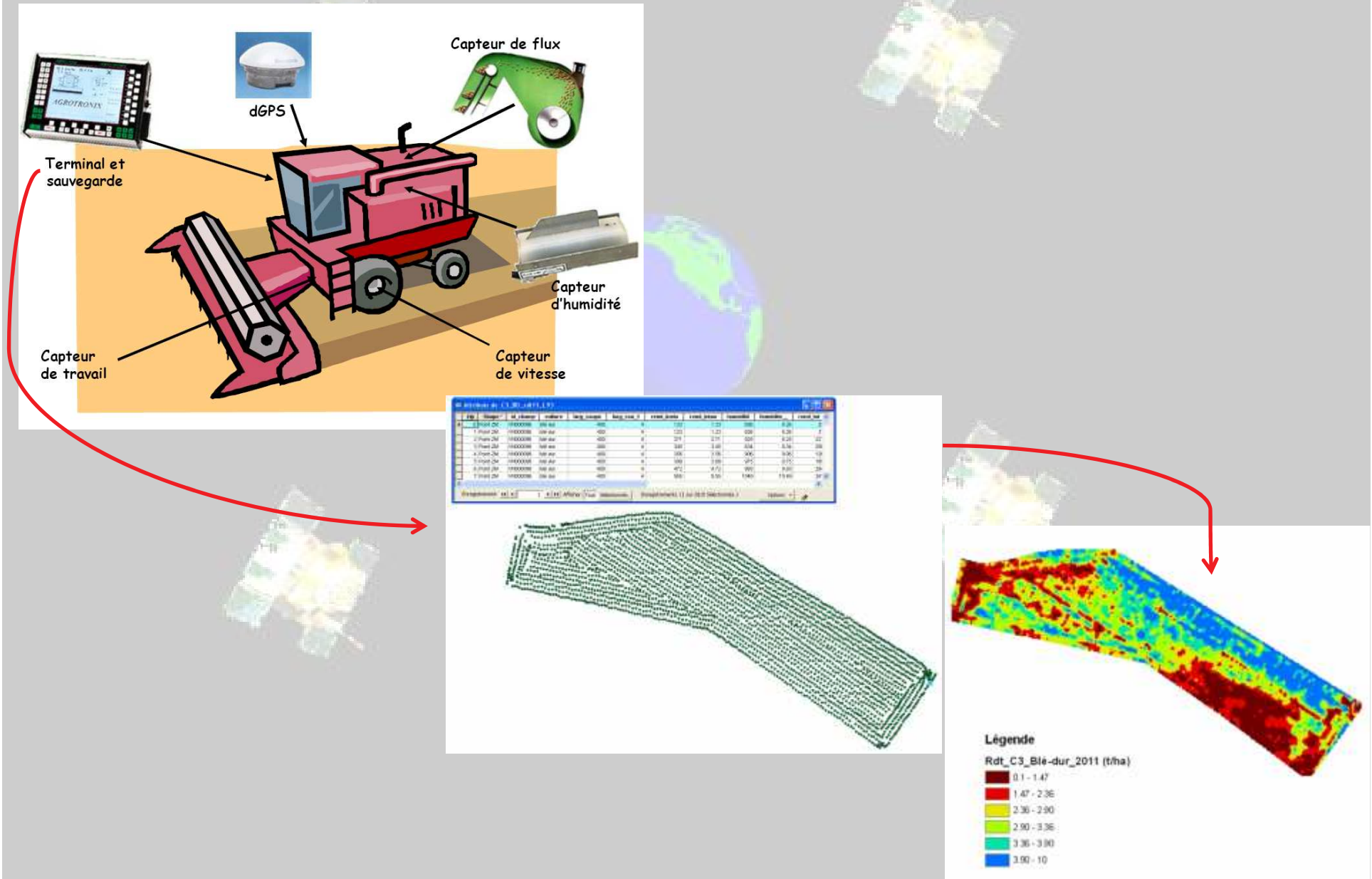
# Pilotage de l'épandeur d'engrais avec green seeker

Green seeker



Photo Géopro

# Carte du rendement : un indicateur utilisable pour moduler la fertilisation



Autre exemple d'indicateur spatialisé :

la carte de résistivité électrique des sols



Photo : G. Cattiau © Inra Tseo

# Principe

La résistivité électrique (ohm.m) est l'inverse de la conductivité

Dans les sols elle est fonction

de la teneur en eau,

de la température,

de la porosité,

de la teneur en argile, en éléments grossiers, des éléments minéraux

Exemple :

sol profond, argileux → peu résistif

sol peu profond, poreux, caillouteux → très résistif

# Réalisation de la mesure en continu : ARP de Géocarta

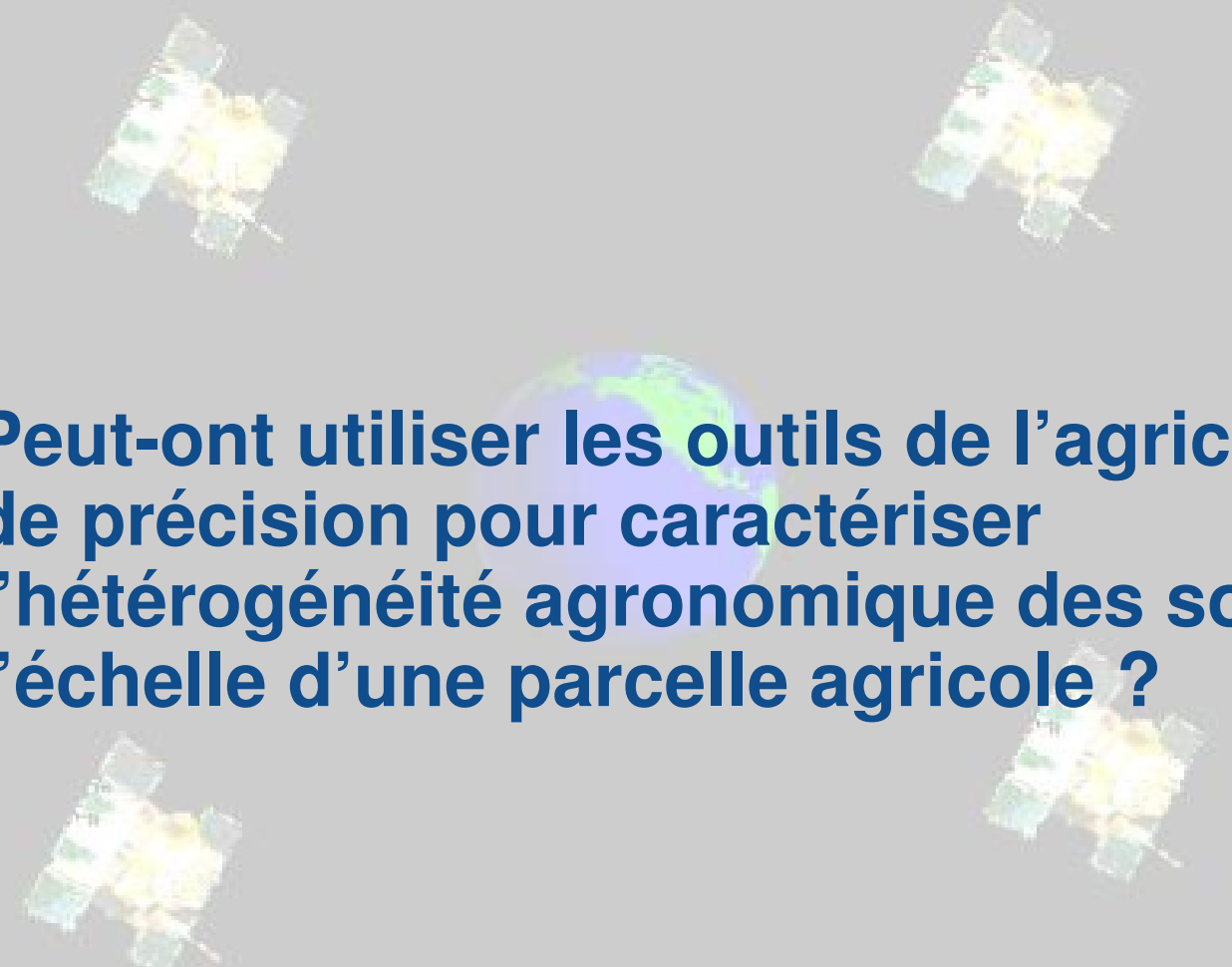
Le système **ARP** (Automatic Resistivity Profiling) développé par la société **Géocarta** permet d'automatiser les mesures de résistivité afin de traiter des grandes surfaces.

Un GPS embarqué localise les mesures (enregistrement continu)



1<sup>ère</sup> paire de roues: injection courant

3 autres paires: réception du courant résiduel → mesure des différences de potentiels (résistivité apparente)

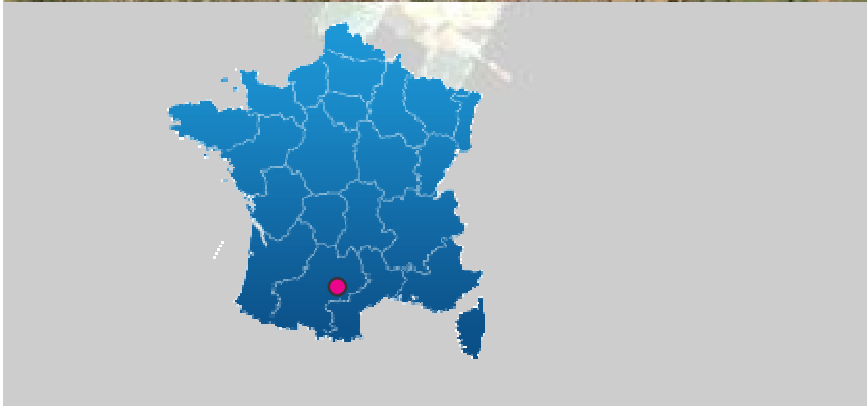
The image features a central globe of the Earth, rendered in shades of blue and green. Surrounding the globe are four satellite-like objects, each with a yellow and white body and several solar panels extending outwards. They are positioned at the corners of a square around the globe, suggesting a global satellite network. The background is a solid, light gray color.

**Peut-ont utiliser les outils de l'agriculture de précision pour caractériser l'hétérogénéité agronomique des sols à l'échelle d'une parcelle agricole ?**

# Le dispositif



**Localisé sur domaine  
expérimental INRA  
Agronomie de Castanet**



# La méthode

## Acquisition de données sur le sol (physico-chimie)



1. Mesure de  
résistivité



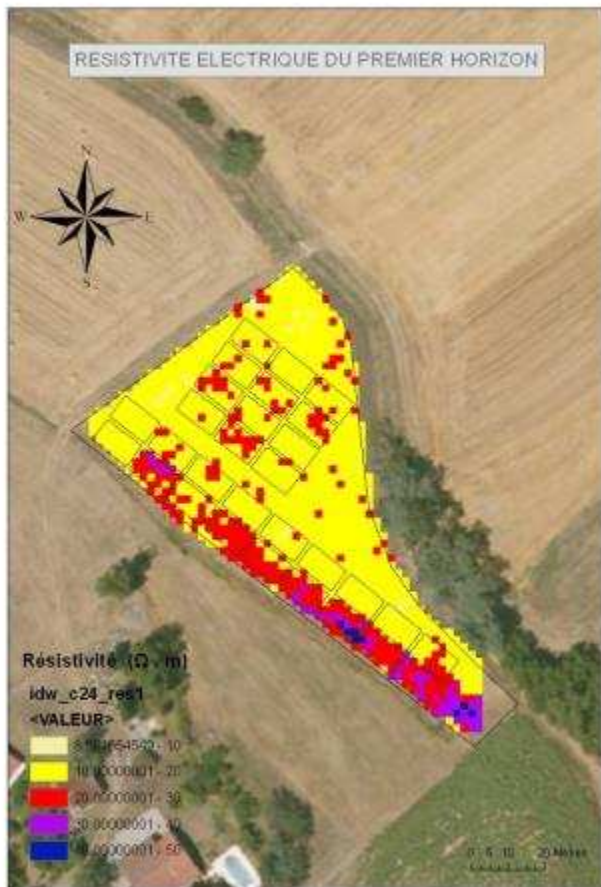
2. Prélèvements  
+ analyses de  
sols



3. Traitements  
SIG

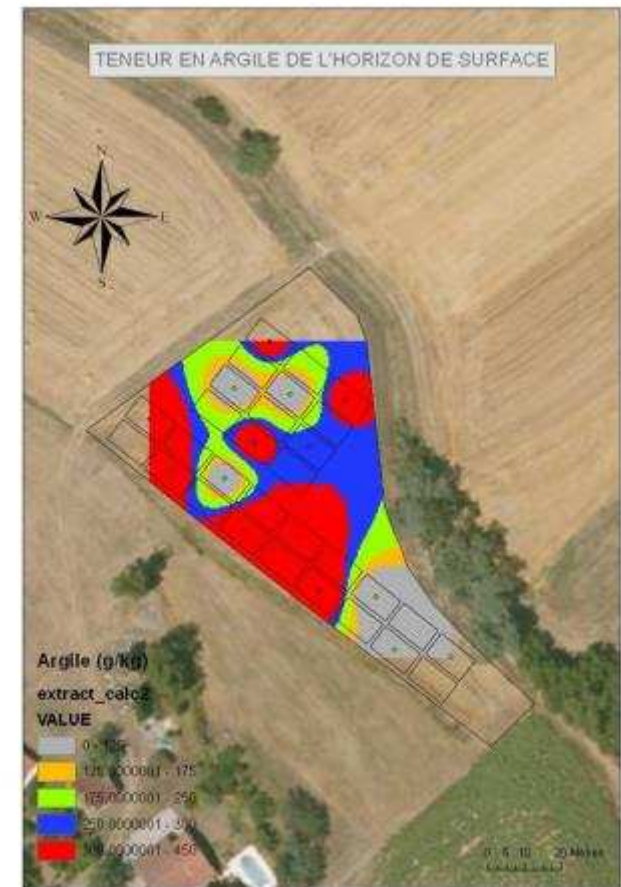
Attributs de fusion_centroides										
	Sables grossiers (200-2499 µm)	Argile	Limons	Sables	Texture	Carbone org	Azote tot	C/N	Matière Organique	pH e
83	472	393	135	Argile lourde profonde	17.3	1.95	8.9	30		
196	404	327	262	Argile profonde	14.5	1.63	8.9	25.1		
<NA>	<NA>	<NA>	<NA>	<NA>	19.5	2.21	8.83	33.7		
122	470	354	176	Argile lourde profonde	20.9	2.38	8.78	36.1		
27	475	407	63	Argile lourde profonde	19.6	2.19	8.97	33.9		
58	469	406	125	Argile lourde profonde	18.5	2.1	8.81	32		
26	304	432	113	Argile limoneuse profonde	14.5	1.64	8.86	25.1		
<NA>	<NA>	<NA>	<NA>	<NA>	16.1	1.8	8.97	27.9		
<NA>	<NA>	<NA>	<NA>	<NA>	16.4	1.79	9.14	28.3		
21	405	437	77	Argile limoneuse profonde	16.5	1.88	8.73	28.5		
10	388	455	95	Argile limoneuse profonde	16.9	1.83	9.22	29.2		
7	274	453	83	Limon argileux profond	16.2	1.79	9.04	28.1		

# Les résultats

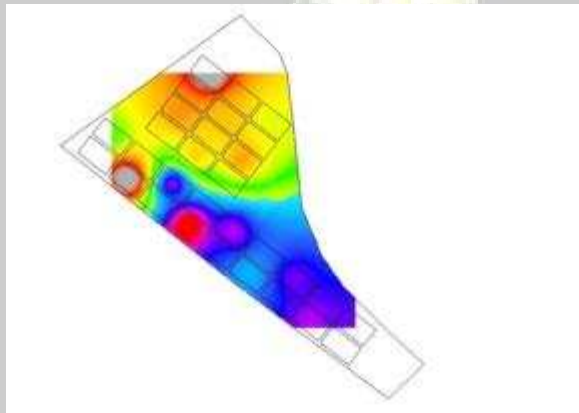


## Spatialisation des caractéristiques agronomiques:

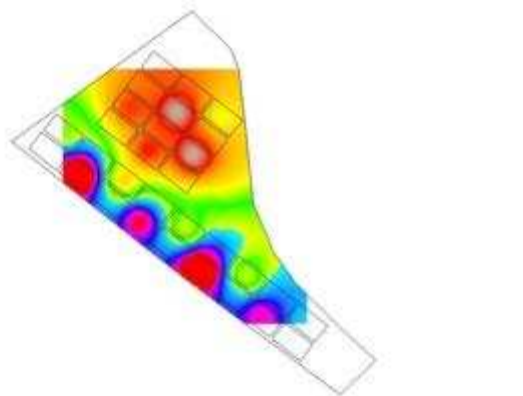
- Résistivité électrique (50, 100, 150 cm)
- Granulométrie (argile, limons fins...)
- Phosphore, potassium, magnésium, carbone organique, calcaire, pH, CEC, azote total, cations échangeables (Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al)



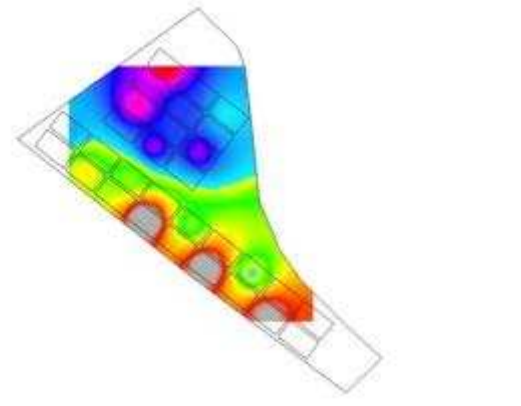
**Corg**



**P205**



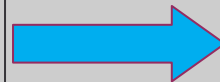
**Résistivité électrique**



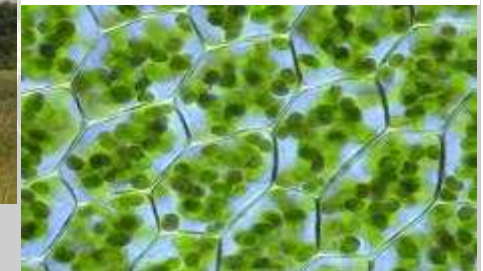
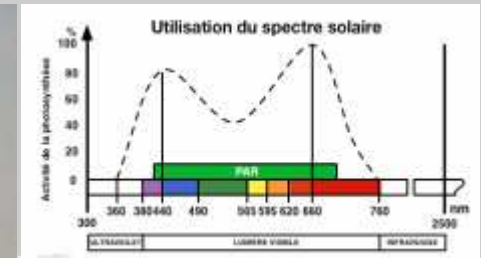
# Layer	Resistivité 1	Resistivité 2	Resistivité 3	Argile	Limons f	Limons g	Sables f	Sables g	C org	N tot	pH	CaCo3	P205	CEC	Ca ech	Mg ech	Na ech	K ech	Fe ech	Al ech
Resistivité 1	1.00	0.83	0.71	0.01	-0.01	-0.13	-0.01	0.19	0.15	0.15	-0.37	-0.31	0.40	-0.03	-0.07	0.12	-0.42	0.38	-0.12	-0.13
Resistivité 2	0.83	1.00	0.92	0.02	-0.03	-0.21	-0.06	0.27	0.23	0.24	-0.50	-0.47	0.56	0.05	-0.02	0.25	-0.55	0.50	-0.18	-0.22
Resistivité 3	0.71	0.92	1.00	0.02	-0.02	-0.21	-0.04	0.33	0.23	0.24	-0.54	-0.52	0.62	0.05	-0.02	0.31	-0.57	0.49	-0.19	-0.26
Argile	0.01	0.02	0.02	1.00	0.98	0.71	0.79	0.60	-0.05	-0.07	-0.13	-0.07	0.25	0.02	-0.01	-0.06	-0.18	0.29	0.10	0.13
Limons fins	-0.01	-0.03	-0.02	0.98	1.00	0.83	0.87	0.49	-0.15	-0.17	-0.02	0.07	0.13	-0.10	-0.12	-0.19	-0.05	0.22	0.27	0.32
Limons grossiers	-0.13	-0.21	-0.21	0.71	0.89	1.00	0.93	0.08	-0.42	-0.46	0.37	0.54	-0.34	-0.42	-0.39	-0.54	0.37	-0.22	0.55	0.63
Sables fins	-0.01	-0.06	-0.04	0.79	0.87	0.93	1.00	0.36	-0.47	-0.50	0.23	0.36	-0.07	-0.49	-0.49	-0.49	0.10	-0.01	0.40	0.48
Sables grossiers	0.19	0.27	0.33	0.60	0.49	0.08	0.36	1.00	-0.07	-0.04	-0.33	-0.46	0.63	0.04	0.00	0.18	-0.62	0.35	-0.23	-0.31
Carbone organique	0.15	0.23	0.23	-0.05	-0.15	-0.42	-0.47	-0.07	1.00	0.99	0.82	-0.72	0.52	0.87	0.83	0.85	-0.28	0.49	-0.24	-0.42
Azote total	0.15	0.24	0.24	-0.07	-0.17	-0.46	-0.50	-0.04	0.99	1.00	0.82	-0.76	0.54	0.90	0.86	0.89	-0.31	0.51	-0.28	-0.46
pH	-0.37	-0.50	-0.54	-0.13	-0.02	0.37	0.23	-0.33	-0.82	-0.82	1.00	0.90	-0.88	-0.60	-0.51	-0.78	0.71	-0.77	0.33	0.49
CaCo3	-0.31	-0.47	-0.52	-0.07	0.07	0.54	0.36	-0.46	-0.72	-0.76	0.90	1.00	-0.92	-0.67	-0.58	-0.87	0.76	-0.77	0.43	0.61
P205 Olsen	0.40	0.56	0.62	0.25	0.13	-0.34	-0.07	0.63	0.52	0.54	-0.88	-0.92	1.00	0.39	0.28	0.69	-0.86	0.84	-0.43	-0.55
CEC	-0.03	0.05	0.05	0.02	-0.10	-0.42	-0.49	0.04	0.87	0.90	-0.60	-0.67	0.39	1.00	0.99	0.88	-0.16	0.34	-0.28	-0.46
Ca ech	-0.07	-0.02	-0.02	-0.01	-0.12	-0.39	-0.49	0.00	0.83	0.86	-0.51	-0.58	0.28	0.99	1.00	0.82	-0.06	0.21	-0.23	-0.42
Mg ech	0.12	0.25	0.31	-0.06	-0.19	-0.54	-0.49	0.18	0.85	0.89	-0.78	-0.87	0.69	0.88	0.82	1.00	-0.41	0.52	-0.43	-0.64
Na ech	-0.42	-0.55	-0.57	-0.18	-0.05	0.37	0.10	-0.62	-0.28	-0.31	0.71	0.76	-0.86	-0.16	-0.06	-0.41	1.00	-0.70	0.54	0.56
K ech	0.38	0.50	0.49	0.29	0.22	-0.22	-0.01	0.35	0.49	0.51	-0.77	-0.77	0.84	0.34	0.21	0.52	-0.70	1.00	-0.29	-0.30
Fe ech	-0.12	-0.18	-0.19	0.10	0.27	0.55	0.40	-0.23	-0.24	-0.28	0.33	0.43	-0.43	-0.28	-0.23	-0.43	0.54	-0.29	1.00	0.93
Al ech	-0.13	-0.22	-0.26	0.13	0.32	0.63	0.48	-0.31	-0.42	-0.46	0.49	0.61	-0.55	-0.46	-0.42	-0.64	0.56	-0.30	0.93	1.00

Mise en évidence des liaisons entre les paramètres mesurés & résistivité

Pour faciliter la gestion de la fertilité des sols (modulation)



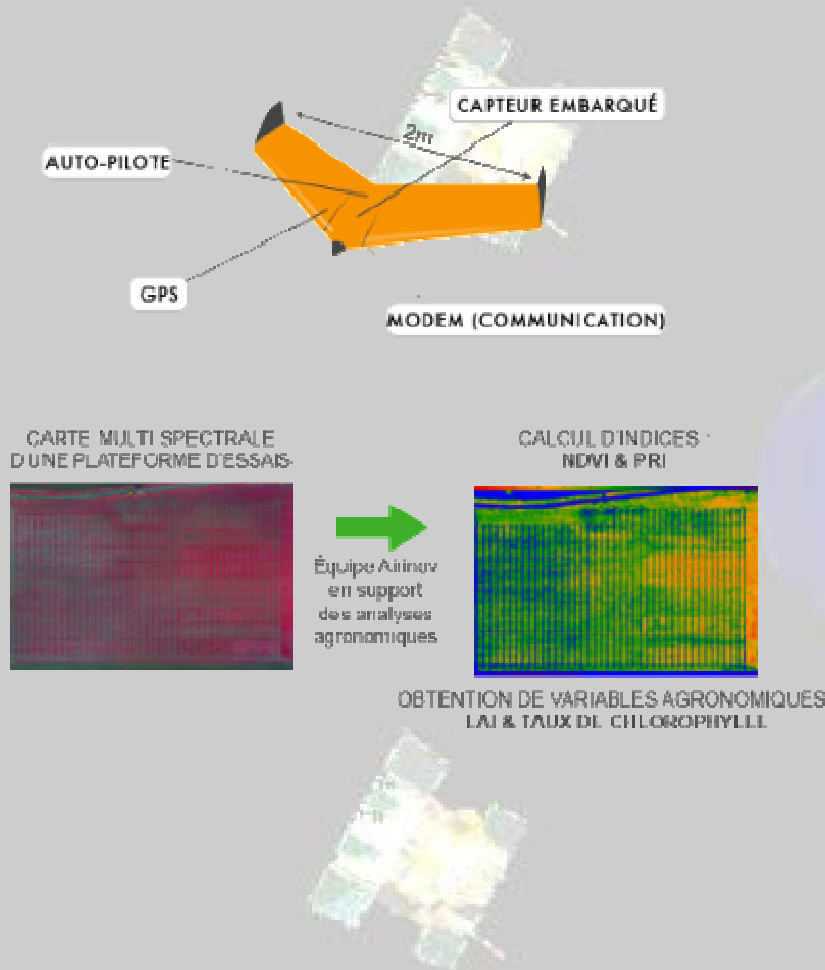
# Proxidétection par drone



Mesure de réflectance par vol de drone:

- Altitude = 150 m
- Résolution = 15 cm

# Estimation d'indices de végétation à partir des images du drone en prairies



## Objectifs:

- mesures haut débit d'indices de végétation:
  - N.D.V.I (Normalized Difference Vegetation Index)
  - P.R.I (Photochemical Reflectance Index)...
- calibration modèles variables agronomiques
  - L.A.I (Leaf Area Index)
  - P.A.R intercepté (Photosynthetically Active Radiation)
  - **Taux de chlorophylle**
  - **Feuilles mortes/feuilles vivantes**
  - **Hauteur de végétation**
  - **Biomasse**

## Moyens:

Plateforme d'essai & images multispectrales haute résolution (drone civile) & mesures au sol (LAI/PAR...)

## Production escomptée:

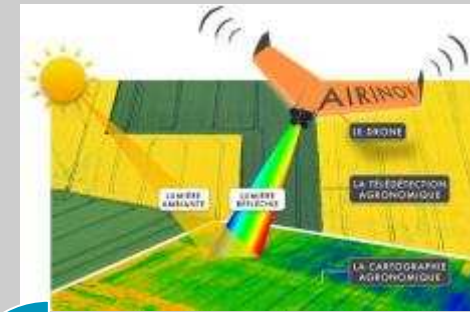
amorce de modélisation (mise au point méthodo), modèle de prédiction, signatures spectrales fourragères ?

# La méthode

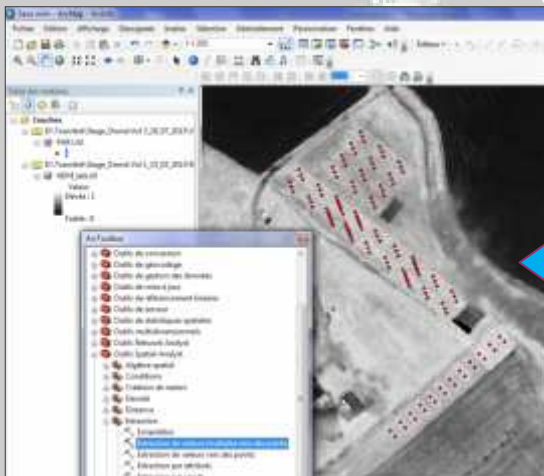
1. Acquisition de données au sol sur la végétation: indices (LAI, Rayonnement intercepté,  $E_a$ ,...), hauteur de végétation, matière sèche...



2. Vol du drone & acquisition d'images multispectrales



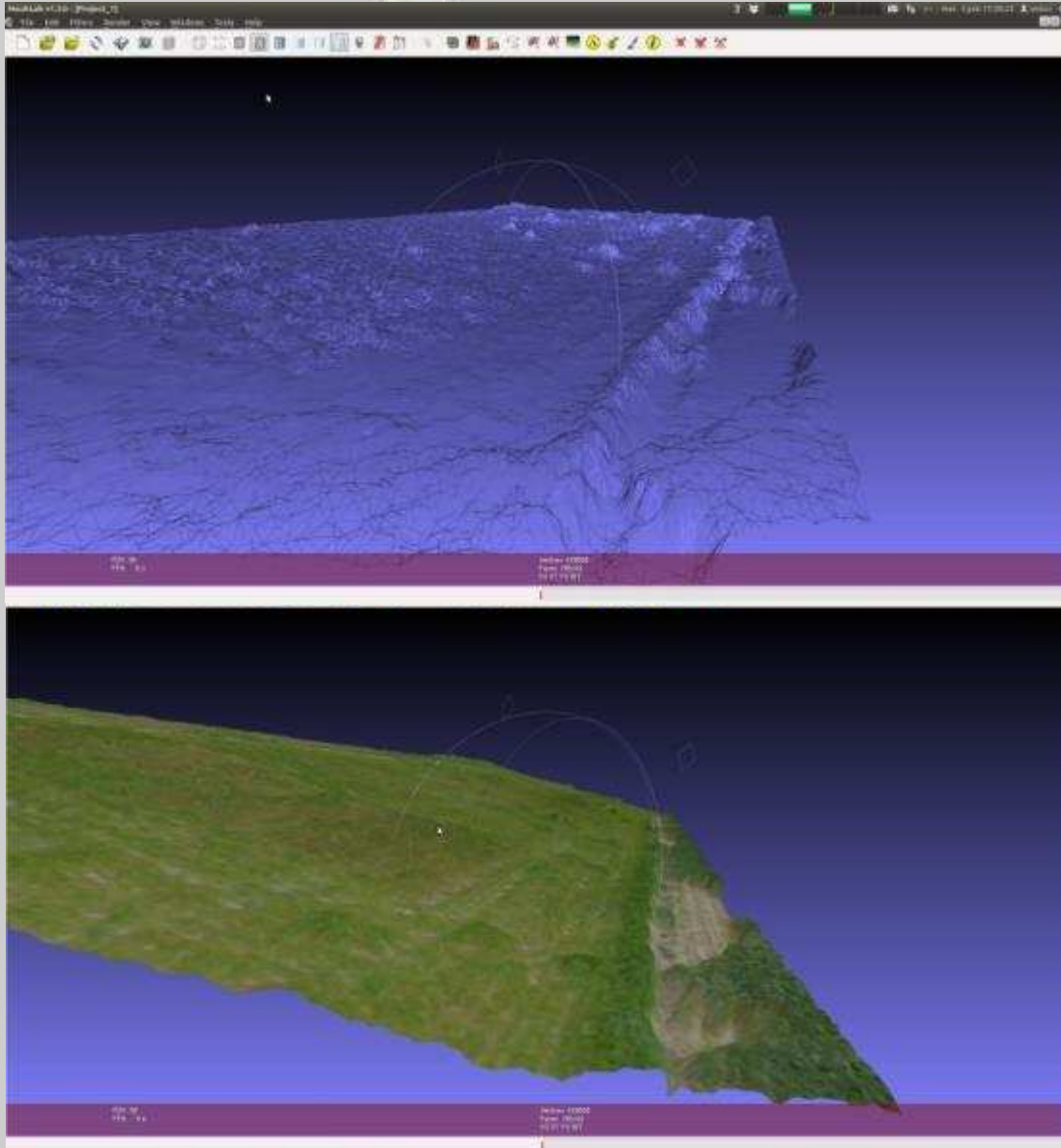
3. Spatialisation des données mesurées



4. Analyses statistiques pour mesurer les liaisons entre les paramètres



# Les premiers résultats en prairie



Estimation en 3D de la hauteur de végétation



Volume d'herbe disponible

Bonne prévision de la biomasse sur pieds à partir de l'indice foliaire (LAI) et la hauteur de végétation

# Et tout cela pour quoi faire ?

## Pistes à explorer:

Construire un outil d'aide à la décision pour:

- accompagner la gestion du pâturage tournant
- évaluer la réussite des implantations de prairies temporaires
- estimer la qualité des fourrages et la biomasse sur pieds...

Cela à l'échelle de l'exploitation

Du travail reste à réaliser pour aboutir à des outils opérationnels !



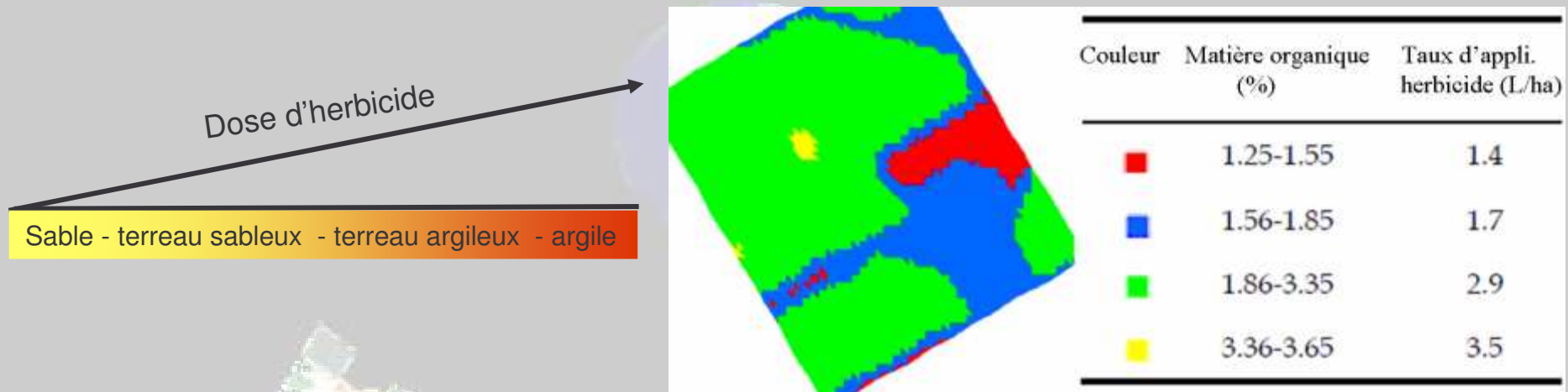


# Perspectives : nouvelles technologies

# Modulation des doses d'herbicides / texture du sol

## Cartes de sol pour moduler les herbicides de pré-émergence sur la parcelle

prélèvements d'échantillons à des points GPS précis  $\implies$  Analyse de sol  $\implies$  Détermination de la **texture** et de la **matière organique du sol**  $\implies$  Élaboration de **cartes de préconisation**



## Cartes des tâches d'adventices effectivement présentes

un véhicule dans le champ ou un drone prend des images  $\implies$  post-traitement des images  $\implies$  un algorithme estime le dosage optimal et le type d'herbicides en fonction du pouvoir compétitif des adventices et de leur sensibilité aux herbicides  $\implies$  création d'une carte de traitement par tâches pour chaque herbicide  $\implies$  le système GPS suit la carte de préconisation

**Limites : modèles pas encore opérationnels**

**pulvé qui peut moduler la dose de solution herbicide ... injection directe / choix de m. a.**

# Détection en temps réel des mauvaises herbes par imagerie spatiale

Génie des  
Agroéquipements et  
Procédés AgroSup  
Dijon, Gée et al.



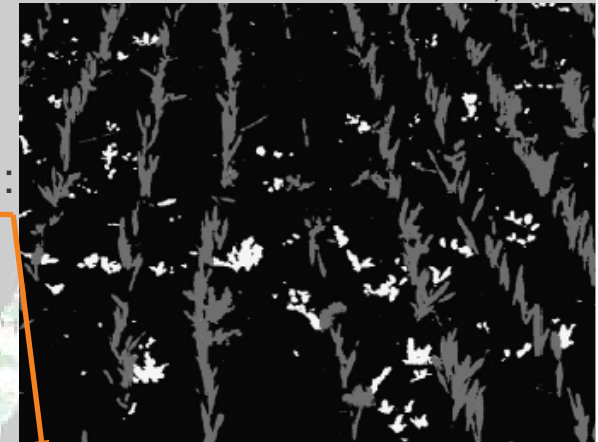
L'ILS (Intelligent Localized Sprayer) de Tecnomat :

caméra placée à l'avant (vue en perspective des rangs de la culture)

modèle mathématique identifie les rangs grâce à leur périodicité

analyse des images en temps réel :  
les adventices situées entre les rangs par rapport aux lignes de culture sont détectées

discrimination manuelle :  
taux d'infestation de 19,10%

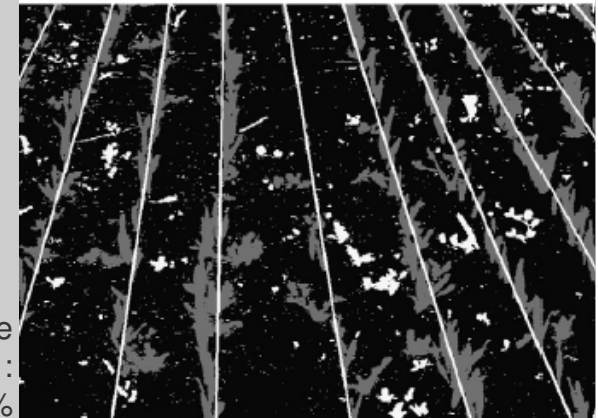


le système ouvre et ferme chaque buse grâce à une électrovanne pneumatique

noir = sol  
gris = culture  
blanc = adventices

En phase d'industrialisation, l'ILS participe à une réduction significative des herbicides, ne pulvérisant que les adventices détectées entre les rangs.

Discrimination par algorithme de la transformée de Hough :  
taux d'infestation de 18,74%



# Détection par morphologie et structure

- 1) identification des adventices avec reconnaissance de forme
- 2) micropulvérisation de l'herbicide juste sur les feuilles de l'adventice

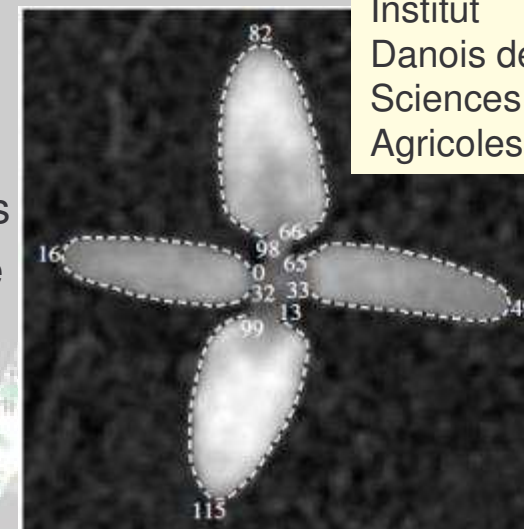


Identification des jeunes plantules de mauvaises herbes avec 4 feuilles

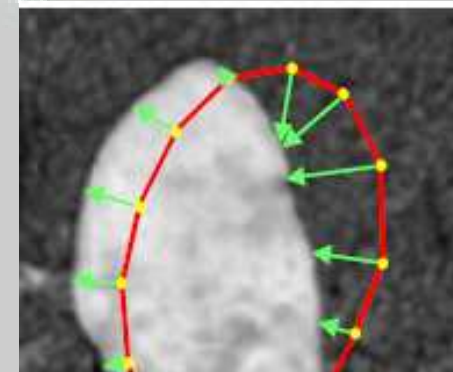
**base de données** contenant plus de 20 images exemples de chaque espèce d'adventices

**algorithme d'identification d'espèces** d'adventices sur images numériques (modèle actif de forme ASM) :

1. objets verts et d'une taille similaire aux plantules d'adventices
2. image dans la même orientation que celles de la base de données
3. 132 points sur le contour de chaque feuille matérialisent leur forme
4. procédure itérative jusqu'à ce que le meilleur ajustement d'un modèle sur les feuilles soit obtenu.



Institut  
Danois des  
Sciences  
Agricoles



le taux d'identification correct des plantules est autour de 80 %

MAIS : - pas pour l'usage en temps réel

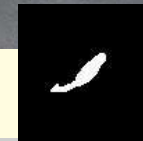
- ne peut pas s'adapter au chevauchement des feuilles
- est relativement long : il faut quelques secondes pour identifier une adventice

# Les robots du futur

Slugbot : un robot détecteur et collecteur de limaces qui les transforme en énergie indispensable à son travail



(Université de Bristol, Royaume Uni)



AgroSup  
Dijon Gée  
et al.

Robots autonomes capables de reconnaître les plantes et donc de détruire les mauvaises herbes l'une après l'autre



Université  
d'Illinois,  
Etats Unis

## Bonirob

Amazonie et université de Osnabrück en Allemagne



« Les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication pourront réduire 50 % des herbicides dans le futur »

# De nouveaux outils pour les sélectionneurs

La « phéno-mobile »



Drone Airinov  
et applications pour le phénotypage



# Développement des applications des drones en agriculture



- Des drones plus stables
- Plus de charge embarquée (poids des capteurs)
- Plus d'autonomie
- Une offre de service qui se développe ...



# De nouvelles données satellite

- Des images plus fréquentes hebdomadaires
- Des images gratuites !
- Plus de bandes spectrales
- Une résolution améliorée :
  - Spot 4 : 20 m
  - Sentinel 2 : 10 m
- Une offre de service qui va s'étendre
- ...

# Quelles attentes des utilisateurs ?

- Des systèmes faciles à utiliser et peu coûteux
- Du temps réel
- Cartes de marges brute <> cartes de rendement
- Des indicateurs pertinents de stress (eau, azote, maladies)
- Une information facilement exploitable
- ...