



HAL
open science

L'agriculture de précision : applications et perspectives en grandes cultures et prairies

André Gavaland, Vladimir Goutiers

► **To cite this version:**

André Gavaland, Vladimir Goutiers. L'agriculture de précision : applications et perspectives en grandes cultures et prairies. 2013. hal-02811017

HAL Id: hal-02811017

<https://hal.inrae.fr/hal-02811017>

Submitted on 6 Jun 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.

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



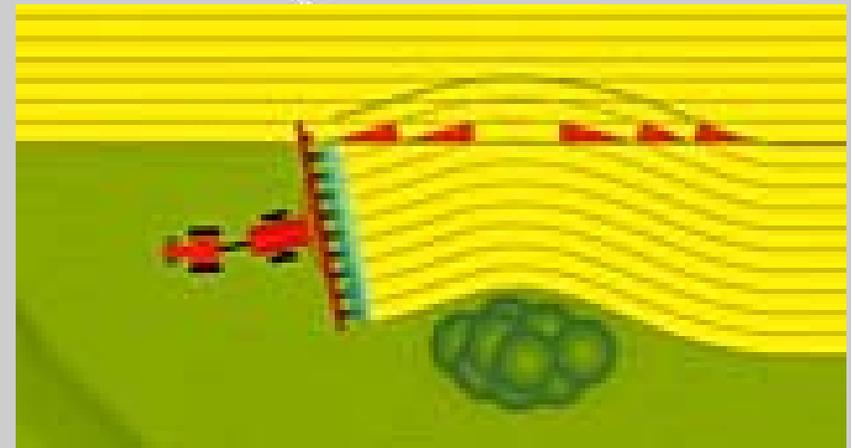
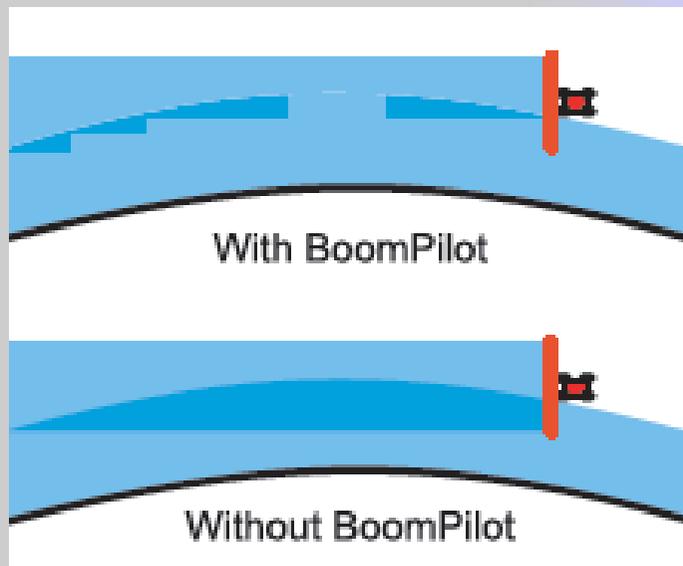
Photo Géopro

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

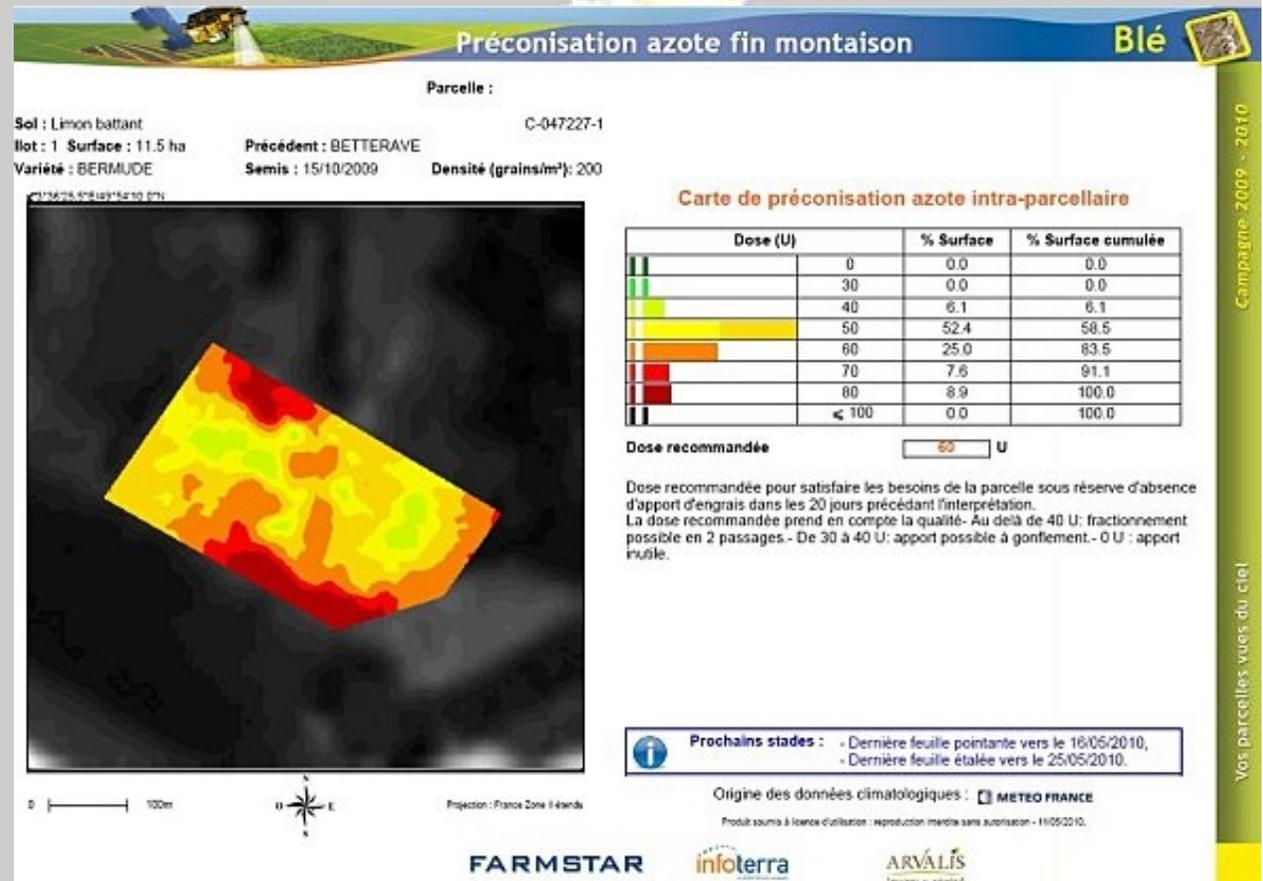
1. Acquisition de données sur l'hétérogénéité de la parcelle
2. Transfert et stockage des données
3. Visualisation et analyse de données
4. Décisions techniques : cartes de préconisation
5. Modulation des actions

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



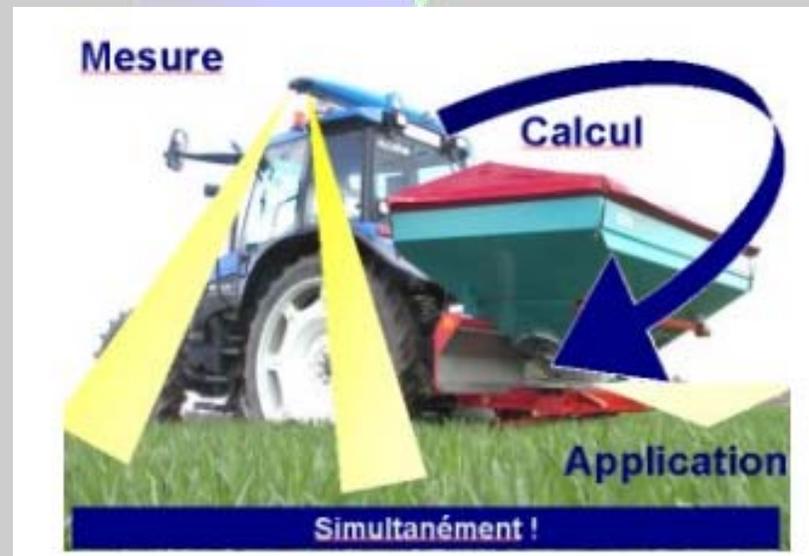
Limites

- 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



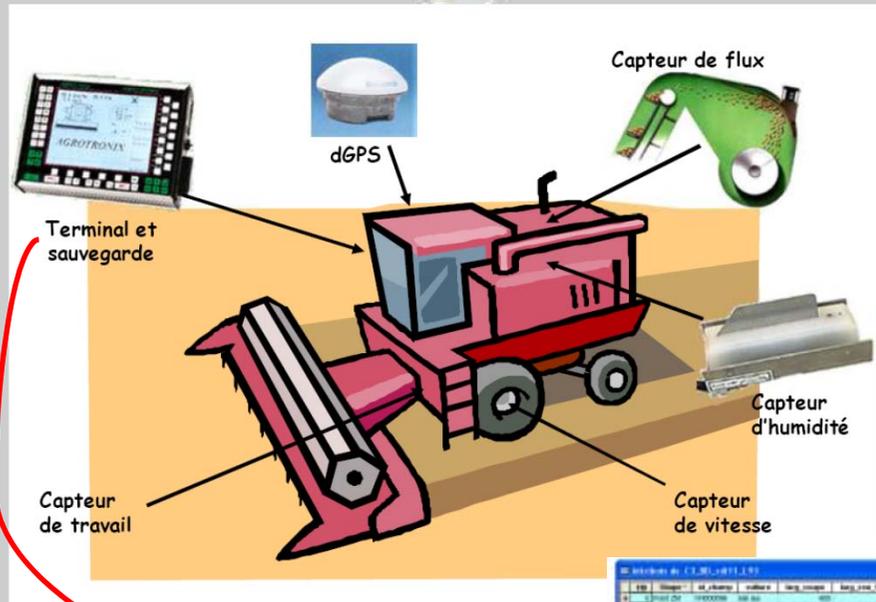
Pilotage de l'épandeur d'engrais avec green seeker

Green seeker

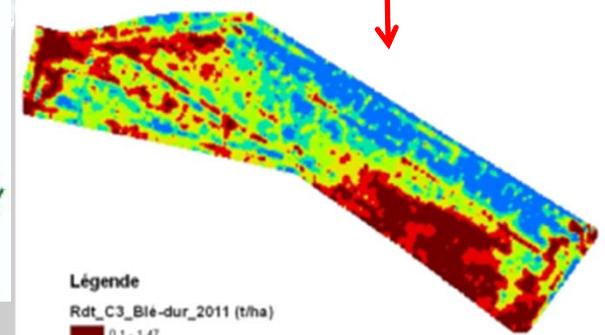
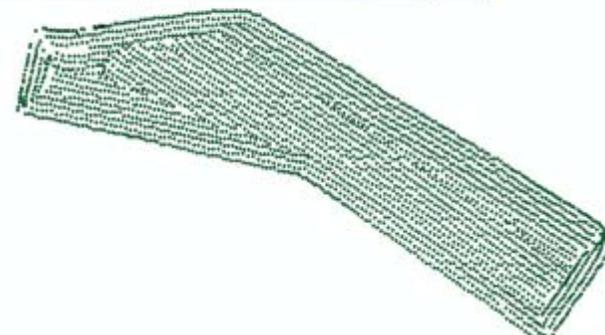


Photo Géopro

Carte du rendement : un indicateur utilisable pour moduler la fertilisation



Tr	Station	dt (s)	lat (N)	long (E)	alt (m)	vit (km/h)	travail	humidite	rend (t/ha)
1	Point 2M	1000000	48.0	10.0	100	1.0	0	0.0	0.0
2	Point 2M	1000000	48.0	10.0	100	1.0	0	0.0	0.0
3	Point 2M	1000000	48.0	10.0	100	1.0	0	0.0	0.0
4	Point 2M	1000000	48.0	10.0	100	1.0	0	0.0	0.0
5	Point 2M	1000000	48.0	10.0	100	1.0	0	0.0	0.0
6	Point 2M	1000000	48.0	10.0	100	1.0	0	0.0	0.0
7	Point 2M	1000000	48.0	10.0	100	1.0	0	0.0	0.0



Autre exemple d'indicateur spatialisé :

la carte de résistivité électrique des sols



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

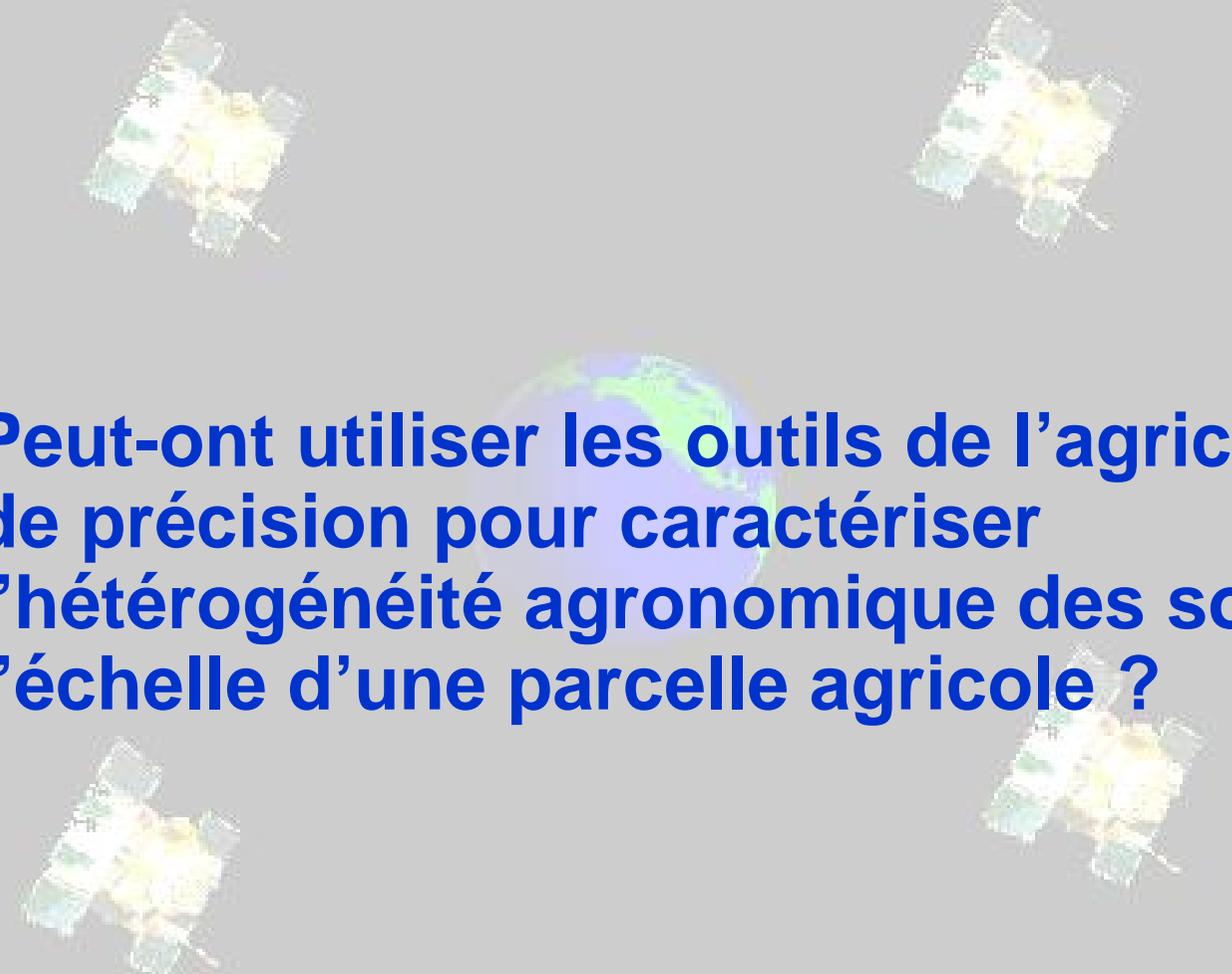
Le système **ARP** (Automatic Resistivity Profiling) développé par la société **Géocarta** permet d'automatiser les mesures de résistivité afin de traiter des grandes surfaces.

Un GPS embarqué localise les mesures (enregistrement continu)



1^{ère} paire de roues: injection courant

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

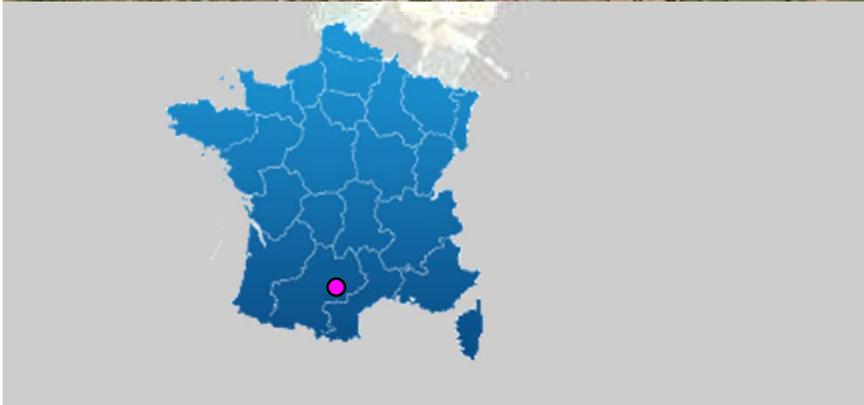


Peut-on utiliser les outils de l'agriculture de précision pour caractériser l'hétérogénéité agronomique des sols à l'échelle d'une parcelle agricole ?

Le dispositif



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



La méthode

Acquisition de données sur le sol (physico-chimie)



1. Mesure de
résistivité



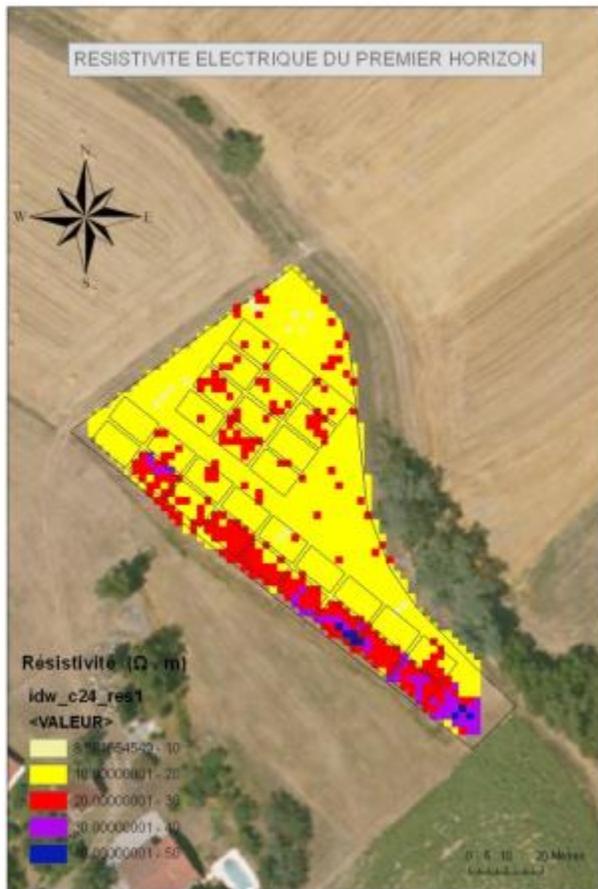
2. Prélèvements
+ analyses de
sols



3. Traitements
SIG

Attributs de Fusion_centroides										
	Sables grossiers (250-2500 µm)	Argile	Limons	Sables	Texture	Carbone org	Azote tot	C/BI	Matière Organique	pH e
83	472	393	135	Argile lourde profonde	17.3	1.96	8.9	30		
196	404	327	269	Argile profonde	14.5	1.63	8.9	25.1		
<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	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		
59	469	406	125	Argile lourde profonde	18.5	2.1	8.81	32		
26	364	432	113	Argile limoneuse profonde	14.5	1.64	8.86	25.1		
<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	16.1	1.8	8.97	27.9		
<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	<Nul>	16.4	1.79	9.14	28.3		
21	405	437	77	Argile limoneuse profonde	16.5	1.88	8.73	28.5		
10	358	455	96	Argile limoneuse profonde	16.9	1.83	8.22	29.2		
7	274	453	83	Limon argileux profond	16.2	1.79	9.04	28.1		

Les résultats

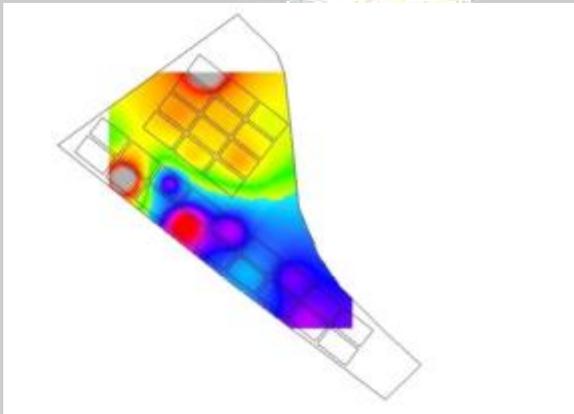


Spatialisation des caractéristiques agronomiques:

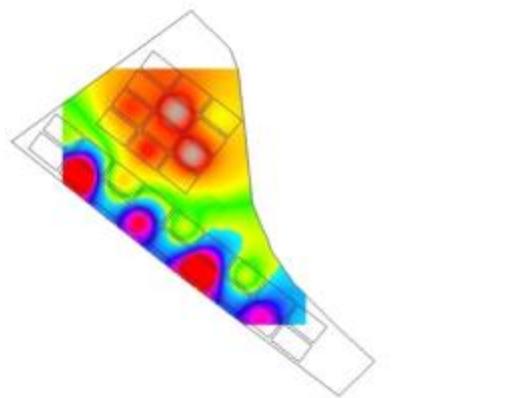
- Résistivité électrique (50, 100, 150 cm)
- Granulométrie (argile, limons fins...)
- Phosphore, potassium, magnésium, carbone organique, calcaire, pH, CEC, azote total, cations échangeables (Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Al)



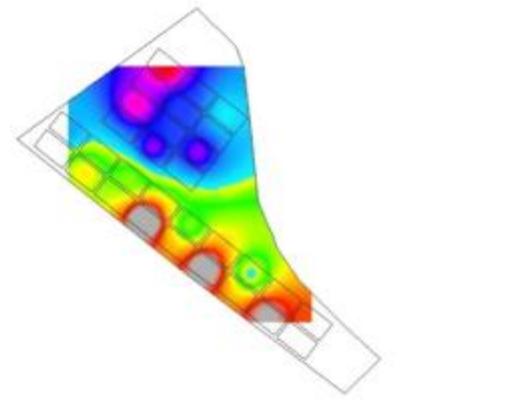
Corg



P205



Résistivité électrique



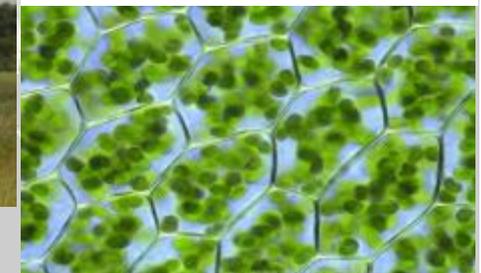
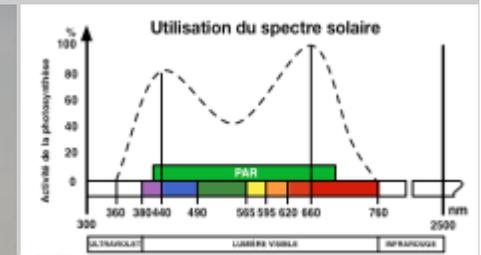
# Layer	Resistivité 1	Resistivité 2	Resistivité 3	Argile	Limons f	Limons g	Sables f	Sables g	C org	N tot	pH	CaCo3	P205	CEC	Ca ech	Mg ech	Na ech	K ech	Fe ech	Al ech
Resistivité 1	1.00	0.83	0.71	0.01	-0.01	-0.13	-0.01	0.19	0.15	0.15	-0.37	-0.31	0.40	-0.03	-0.07	0.12	-0.42	0.38	-0.12	-0.13
Resistivité 2	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
Sables fins	-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 grossiers	-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	0.10	-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)



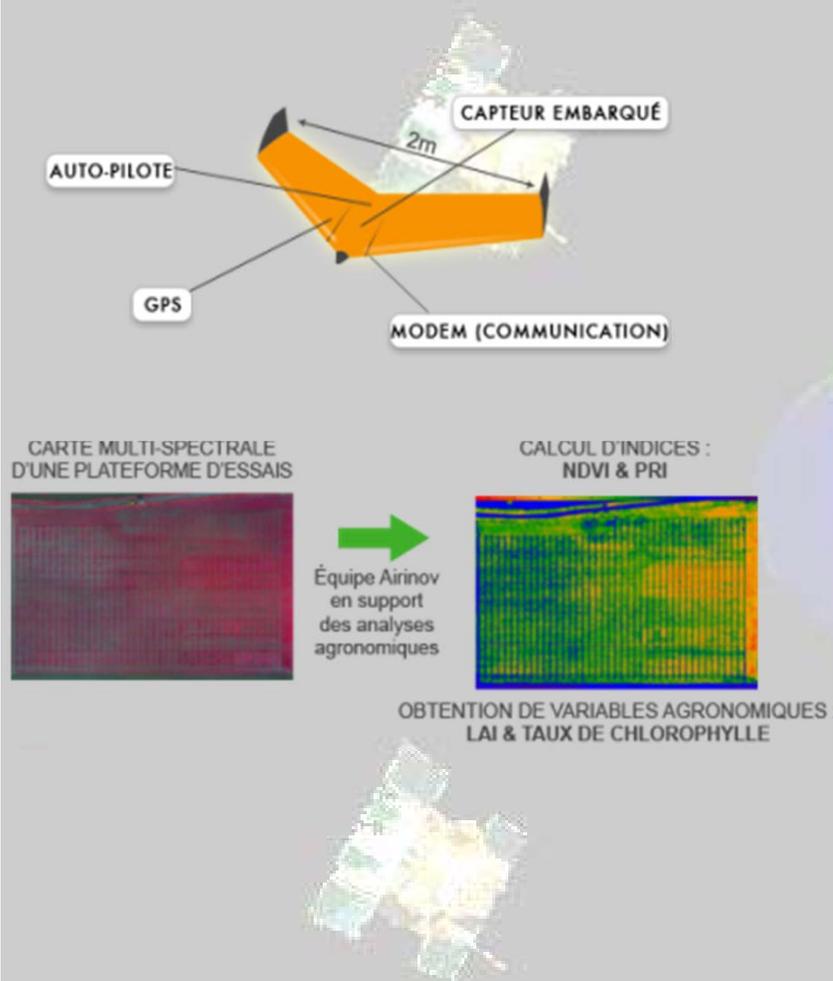
Proxidétection par drone



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:

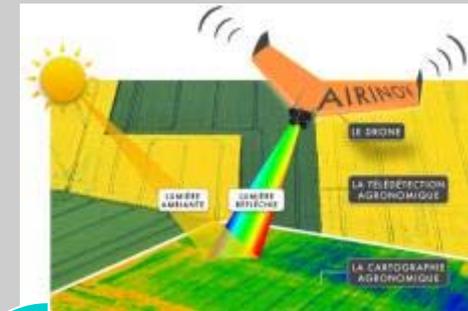
amorce de modélisation (mise au point méthodo), modèle de prédiction , signatures spectrales fourragères ?

La méthode

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

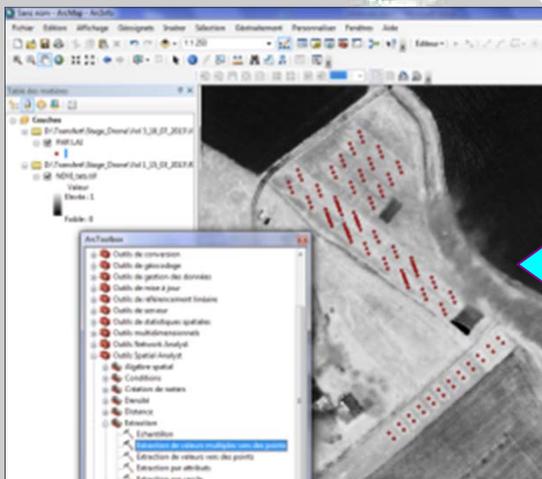


2. Vol du drone & acquisition d'images multispectrales

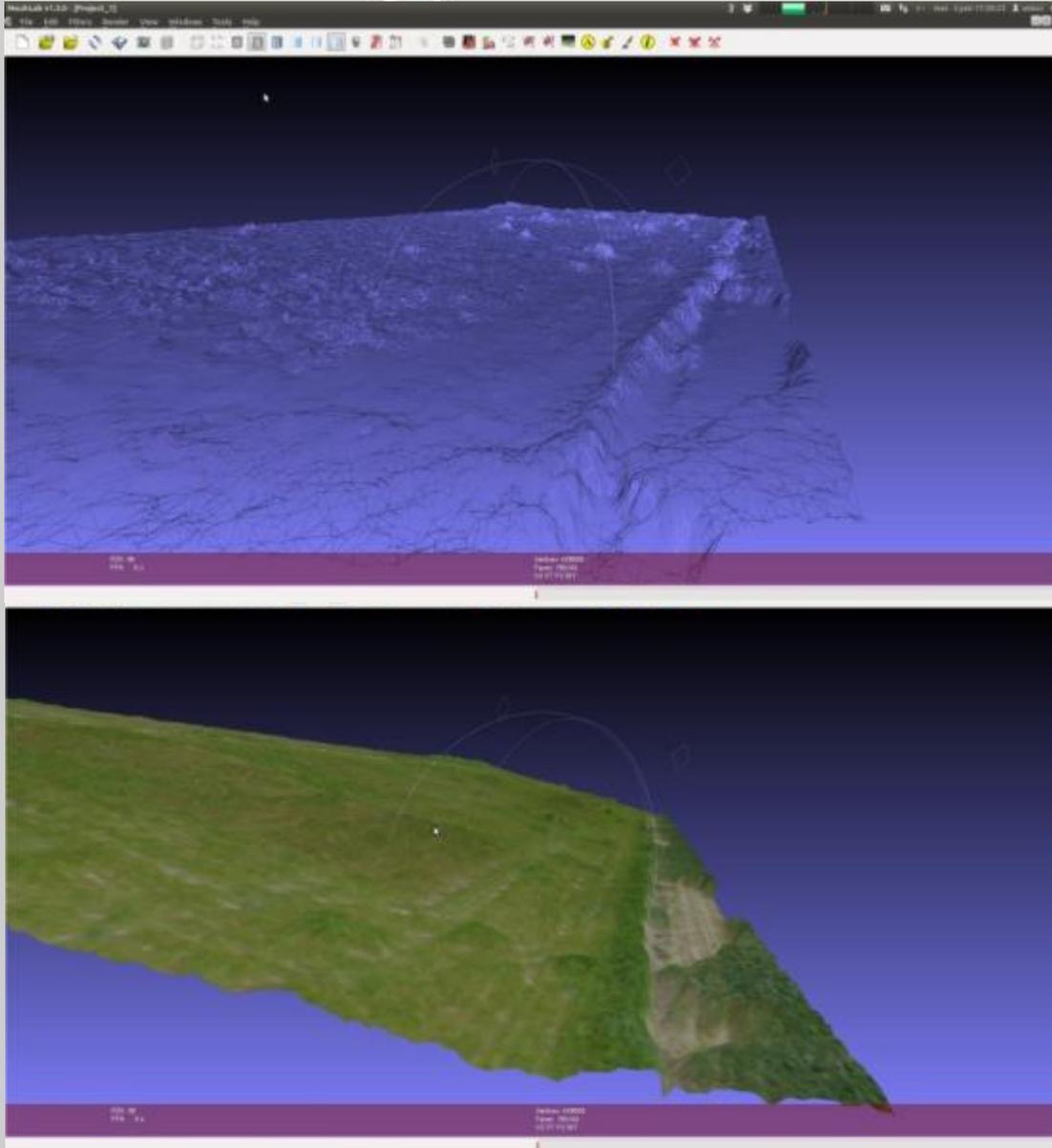


3. Spatialisation des données mesurées

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 !

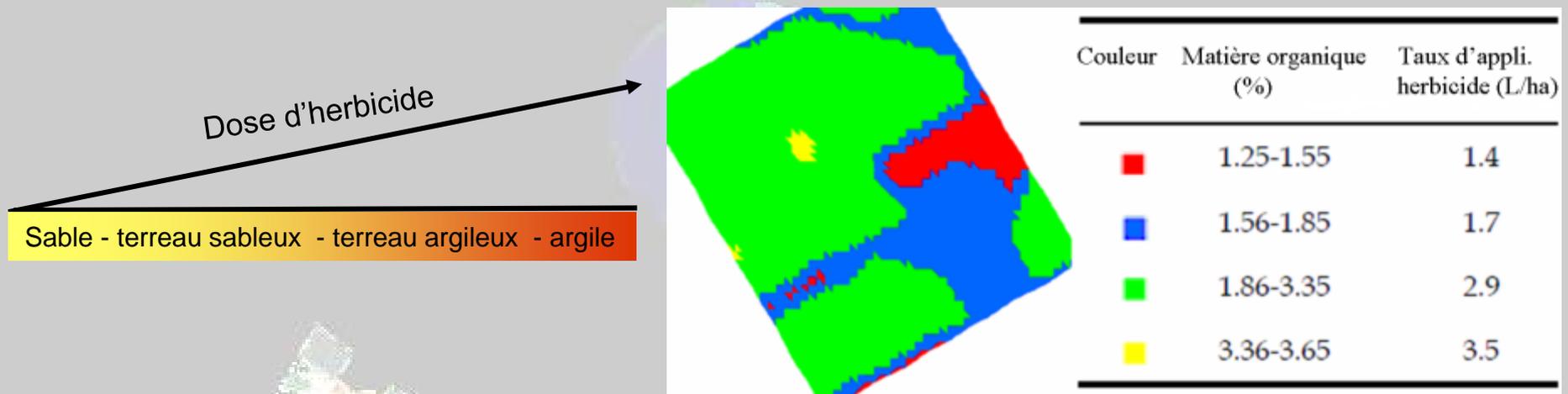


Perspectives : nouvelles technologies

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 \Rightarrow Analyse de sol \Rightarrow Détermination de **la texture** et de **la matière organique du sol** \Rightarrow Élaboration de **cartes de préconisation**



Cartes des tâches d'adventices effectivement présentes

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



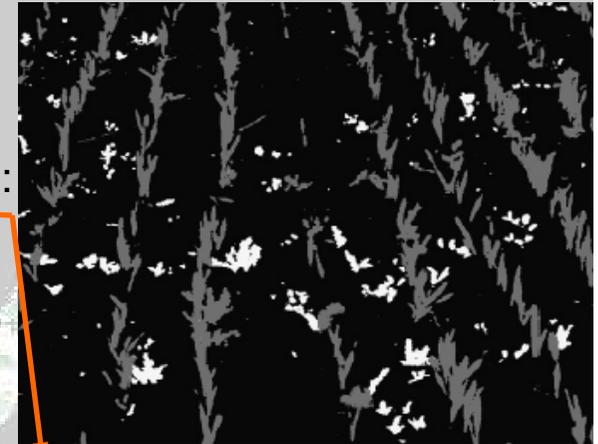
L'ILS (Intelligent Localized Sprayer) de Tecnomat :

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%

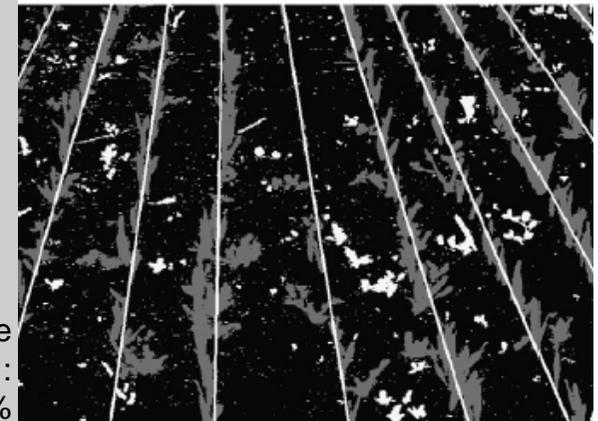


le système ouvre et ferme chaque buse grâce à une électrovanne pneumatique

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

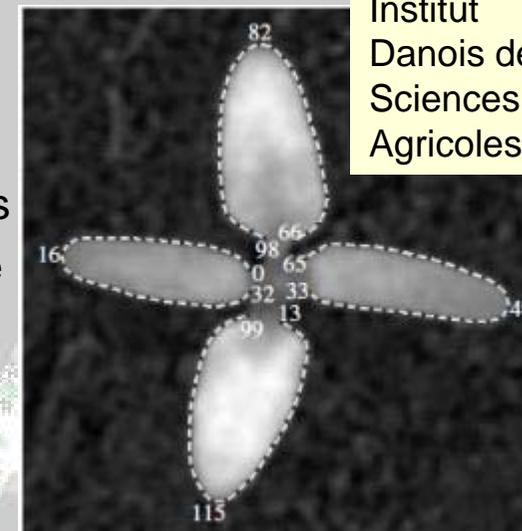


Identification des jeunes plantules de mauvaises herbes avec 4 feuilles

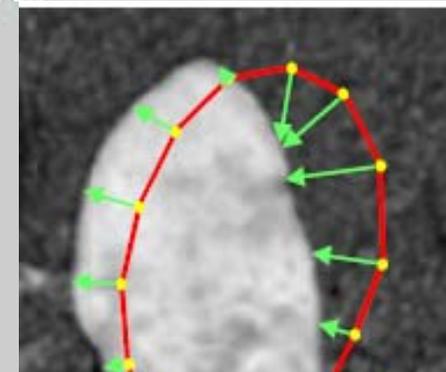
base de données contenant plus de 20 images exemples de chaque espèce d'adventices

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
- ...