



Apports de la télédétection par drone en Agriculture: application à la cartographie de la fertilité des sols

Jean-Marc Gilliot

UMR 1402 ECOSYS AgroParisTech / INRA Pôle Science du Sol Université Paris-Saclay



www.agroparistech.fr



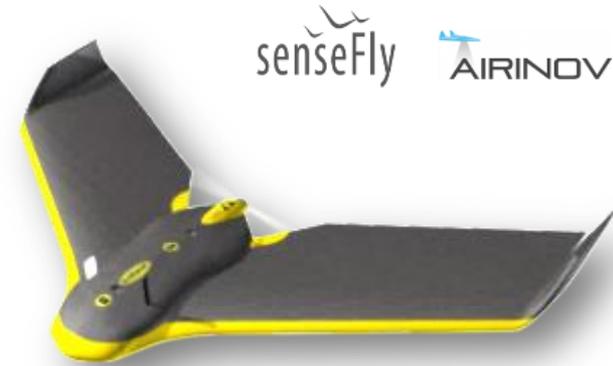
- Introduction et contexte
- L'utilisation des drones en agriculture
- Monitoring de la MO des sols agricoles
- Hauteur des cultures par photogrammétrie 3D
- Conclusions et perspectives

■ ■ ■ Introduction et contexte ■ ■ ■



Drones et UMR ECOSYS

AIRINOV



2011

2013

2014: eBee sensefly

prototypes AIRINOV

Utilisations des drones

Cartographie des propriétés des sols agricoles

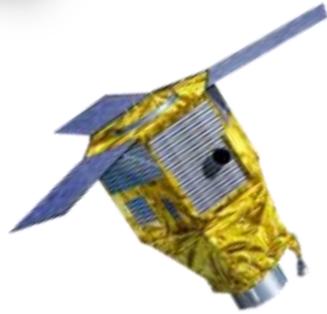
Suivi des essais agronomiques au champ



■ ■ ■ L'utilisation des drones en agriculture ■ ■ ■

www.agroparistech.fr





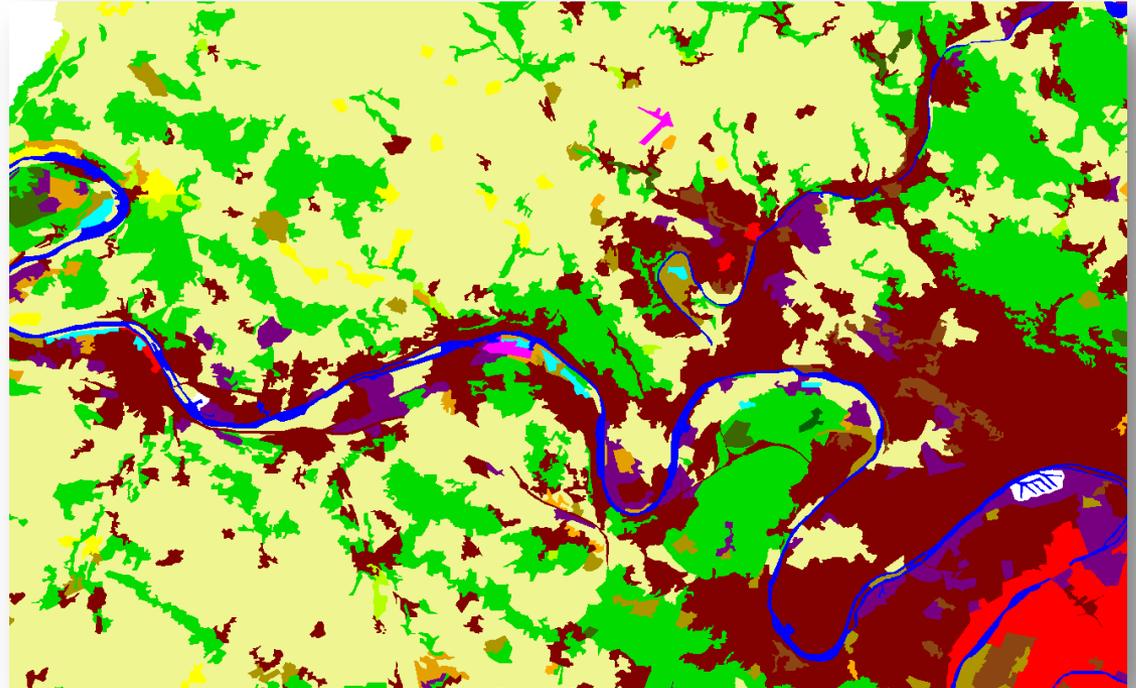
Les données de Télédétection utilisées depuis longtemps en Agriculture

Prévision des rendements

Cartographie des cultures

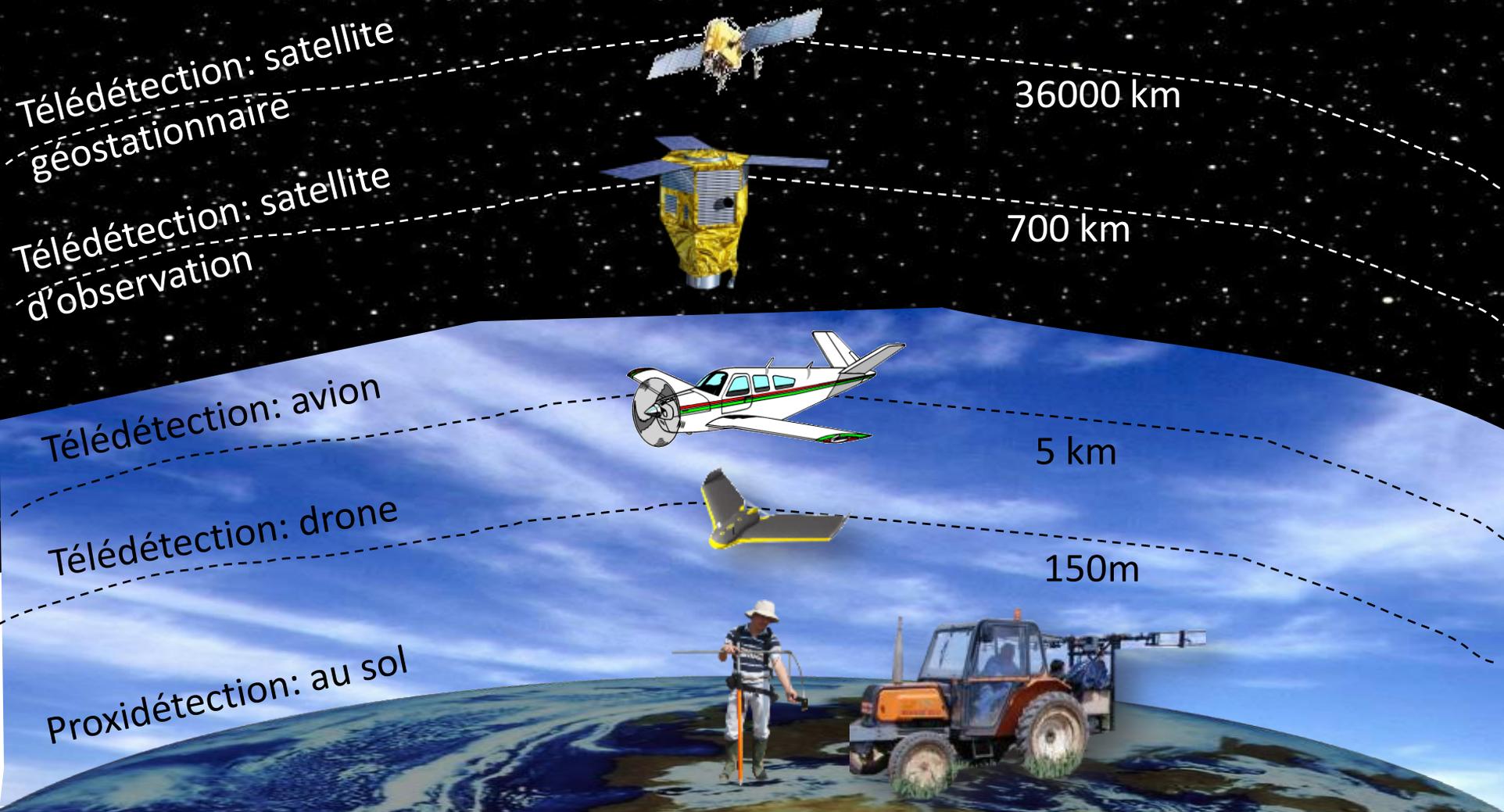
agriculture de précision:
Fertilisation engrais N
carte de préconisation

- FARMSTAR par satellite
- Capteurs sur tracteur:
N SENSOR
greenseeker



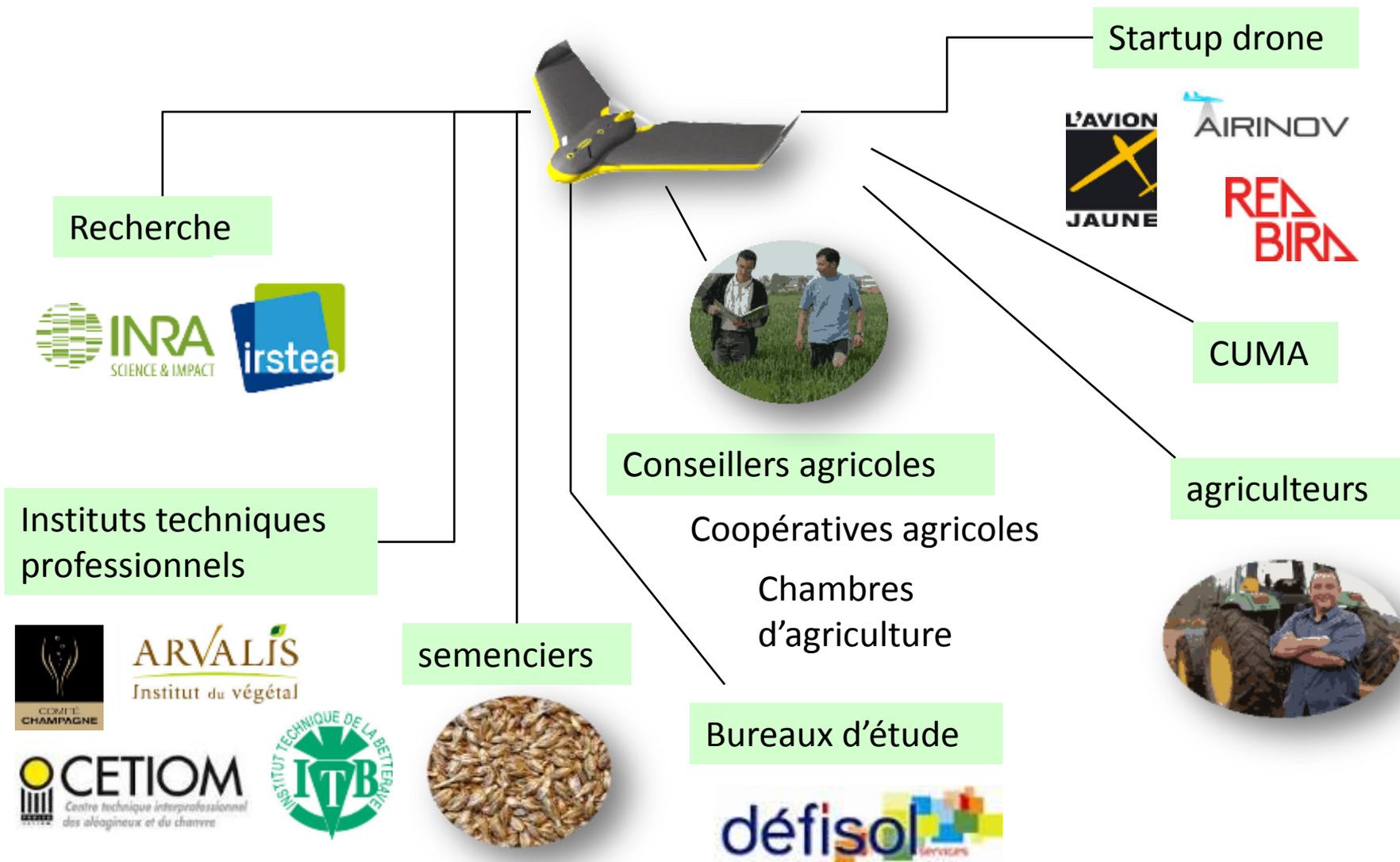


proxidétection / télédétection en agriculture: la nouveauté des drones





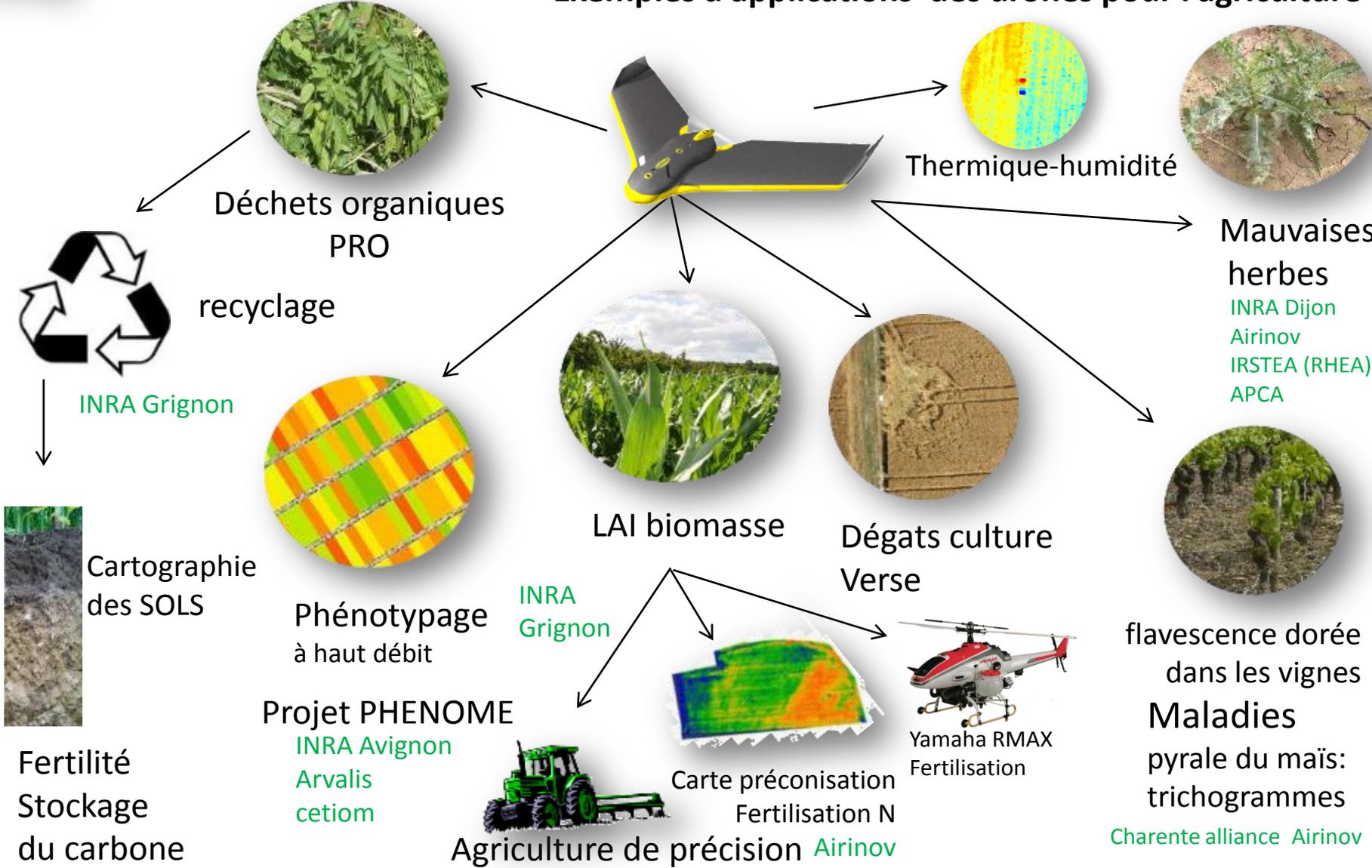
Les acteurs de l'agriculture concernés par l'utilisation des drones



www.agroparistech.fr



Exemples d'applications des drones pour l'agriculture



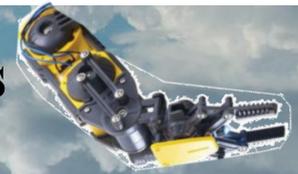
www.agroparistech.fr



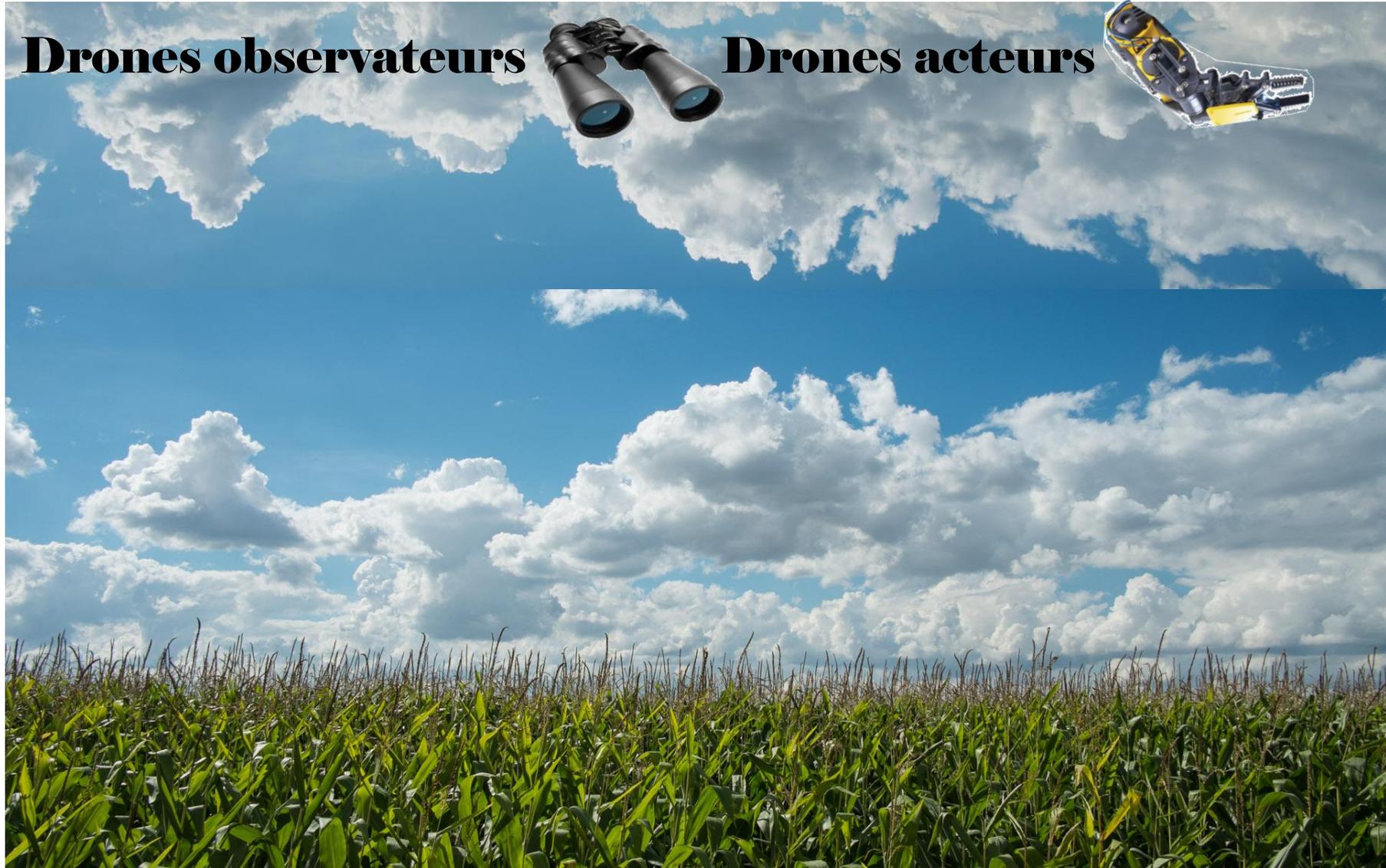
Drones observateurs

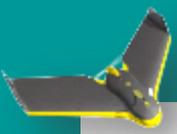


Drones acteurs



www.agroparistech.fr





Apports de la télédétection par drone en Agriculture: application à la cartographie de la fertilité des sols



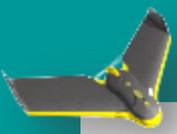
ECOLE NATIONALE
D'INGENIEURS DE TUNIS

Séminaire international: Drones et moyens légers
aéroportés pour les applications géospatiales en
recherche : État des lieux et perspectives
TUNIS 3-5 novembre 2015



Institut de recherche
pour le développement

www.agroparistech.fr



Apports de la télédétection par drone en Agriculture: application à la cartographie de la fertilité des sols



ECOLE NATIONALE
D'INGENIEURS DE TUNIS

Séminaire international: Drones et moyens légers
aéroportés pour les applications géospatiales en
recherche : État des lieux et perspectives
TUNIS 3-5 novembre 2015



www.agroparistech.fr



■ ■ ■ Monitoring de la M.O. des sols agricoles ■ ■ ■



www.agroparistech.fr



CO: Le carbone organique des sols agricoles



Un facteur important
de la fertilité des sols agricoles



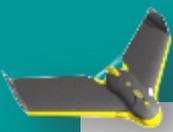
Un mode de stockage du CO₂ =
contrebalancer émissions CO₂
en lien avec le réchauffement climatique



PRO: Produits Résiduaire Organiques
recyclage des matières organiques (MO)
valorisation de ces produits pour l'agriculture
déchets verts, effluents d'élevages, déchets ménagers ...
Limitation des engrais chimique

Très fort enjeu
environnemental





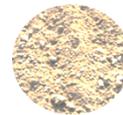
CO: Le carbone organique des sols agricoles

Intéressant de moduler la fertilisation par les M.O. comme on module la fertilisation chimique en azote: Faire varier les apports en fonction du potentiel de la parcelle

Pour cela il faut

Déterminer le stock de carbone des parcelles éventuellement à l'échelle intra-parcellaire
=> **Méthode de mesure spatialisée et rapide ?**

Utilisation de mesures radiométriques des parcelles en sol nu pour estimer la teneur en CO



CO: 10 g/kg

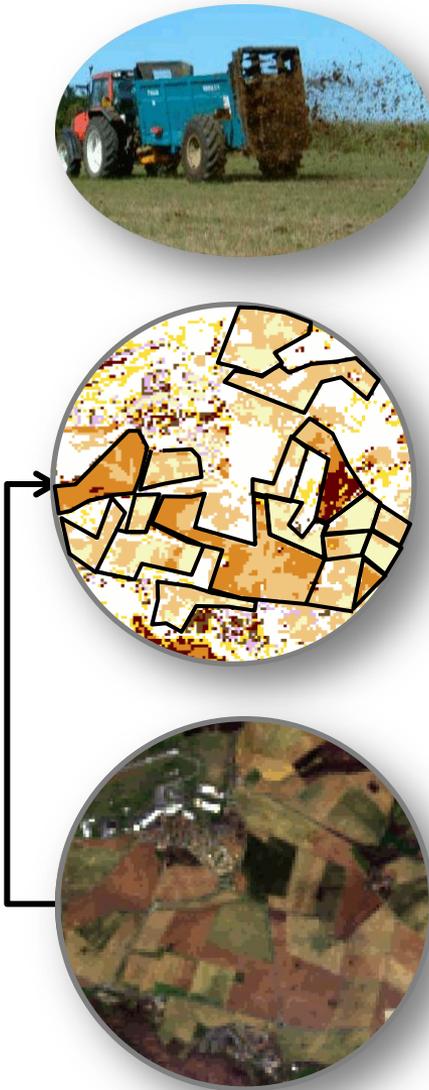


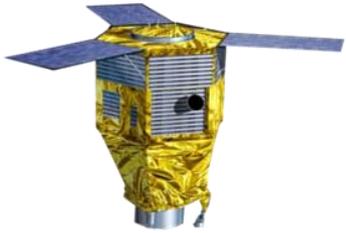
36 g/kg

Clarté



CO





Travaux préalables CO par Télédétection satellitaire:

- * ANR ISARD
- * Projet ADEME PROSTOCK
- * SOERE-PRO:

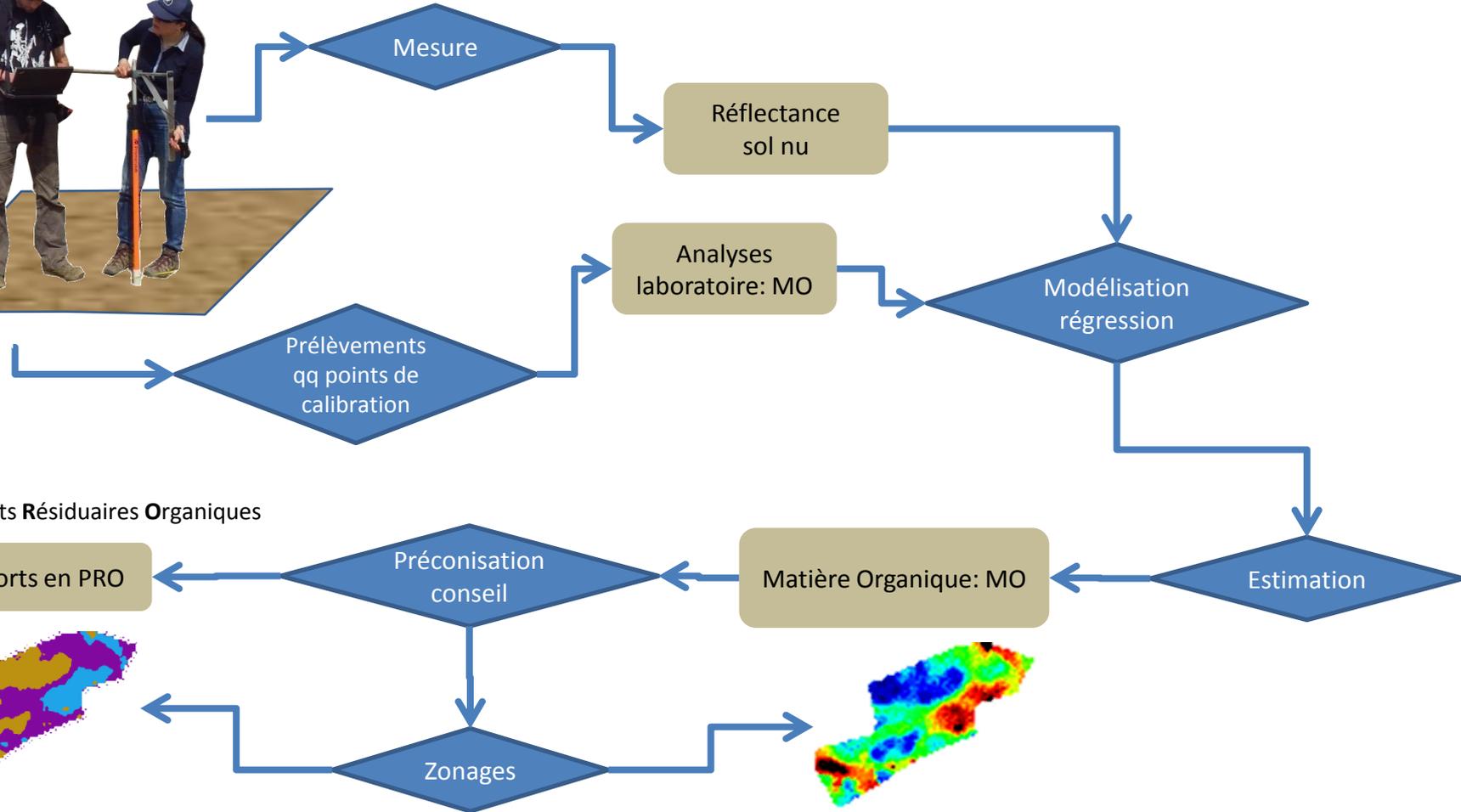
Système d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement
réseau INRA / AllEnvi



Potentiel de l'imagerie drone pour le suivi du CO ?

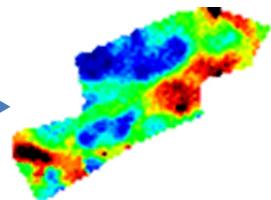
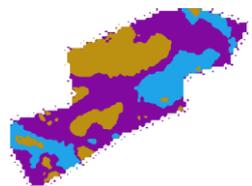
Intérêt des mesures de réflectance en agriculture pour estimer certaines propriétés des sols cultivés

Exemple Amendement organique



www.agroparistech.fr

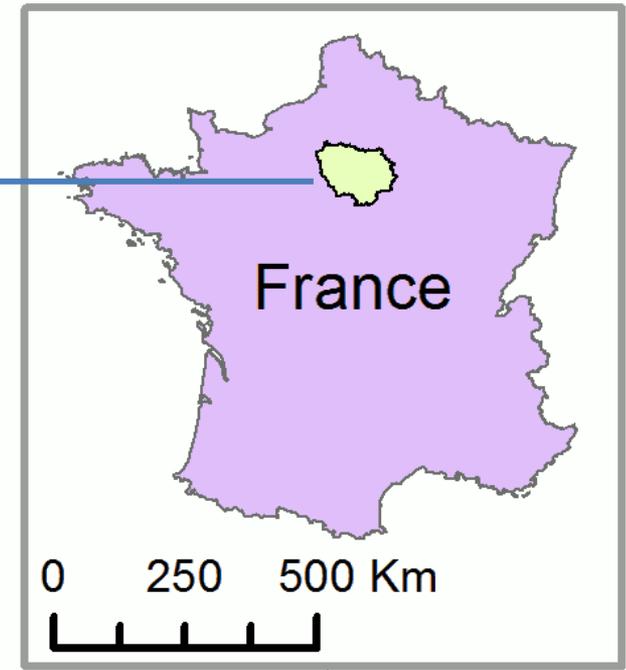
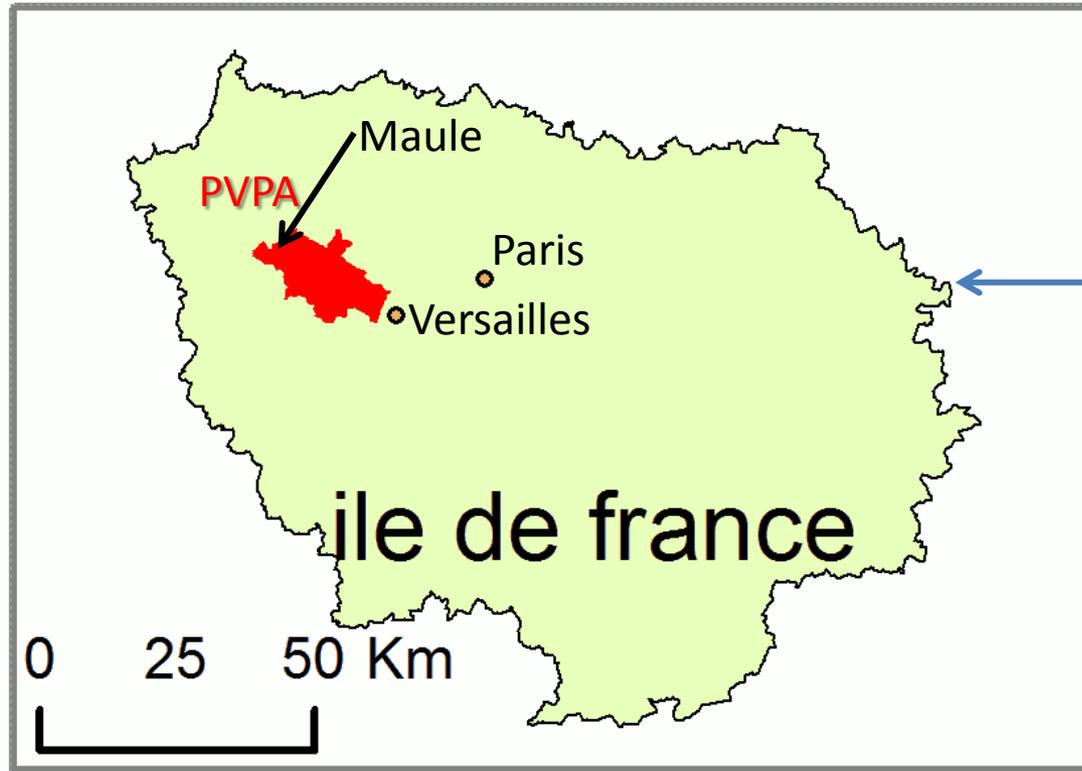
Produits Résiduaire Organiques





Zone d'étude : Plaine de Versailles et plateau des Alluets (PVPA)

PVPA : Plaine de Versailles et Plateau des Alluets 25 communes à l'ouest de Versailles
20000 ha dont 8000 ha agricoles



www.agroparistech.fr



Apports de la télédétection par drone en Agriculture: application à la cartographie de la fertilité des sols



ECOLE NATIONALE
D'INGENIEURS DE TUNIS

Séminaire international: Drones et moyens légers
aéroportés pour les applications géospatiales en
recherche : État des lieux et perspectives
TUNIS 3-5 novembre 2015



Institut de recherche
pour le développement

www.agroparistech.fr



Le drone utilisé



Caractéristiques

Envergure: ~ 2m

Poids: 2kg avec la charge utile

Matériau: polypropylène

Alimentation: électrique

Autonomie: 30 minutes

Altitude: de 20m à 150m

Résolution spatiale:

Capteur visible: 1 à 5 cm

Capteur multispectral: 5 à 15cm
visible / proche infrarouge

Résolution spectrale: de 10 à 40nm

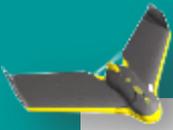
1,25 images / seconde

capacité d'acquisition: ~1,5 ha/min

GPS

Autopilot





Apports de la télédétection par drone en Agriculture: application à la cartographie de la fertilité des sols



ECOLE NATIONALE
D'INGENIEURS DE TUNIS

Séminaire international: Drones et moyens légers
aéroportés pour les applications géospatiales en
recherche : État des lieux et perspectives
TUNIS 3-5 novembre 2015



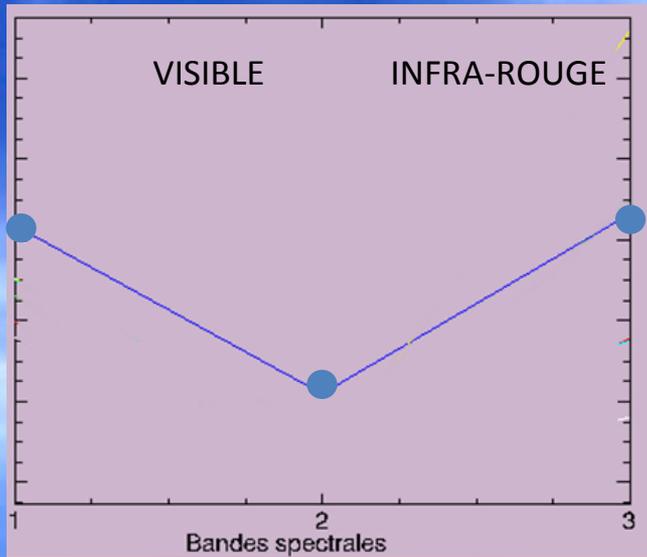
www.agroparistech.fr

Mesure de réflectance

pour estimer certaines propriétés des sols et des cultures

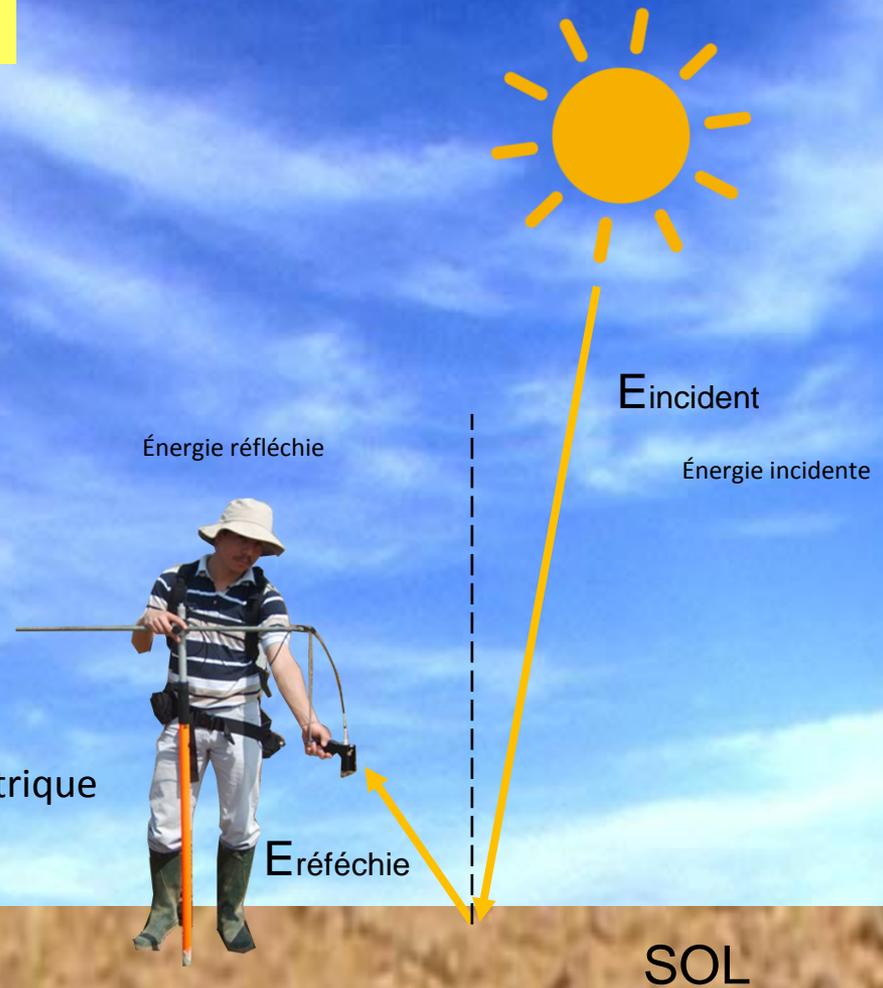
$$\text{REFLECTANCE} = E_{\text{réfléchi}} / E_{\text{incident}}$$

1



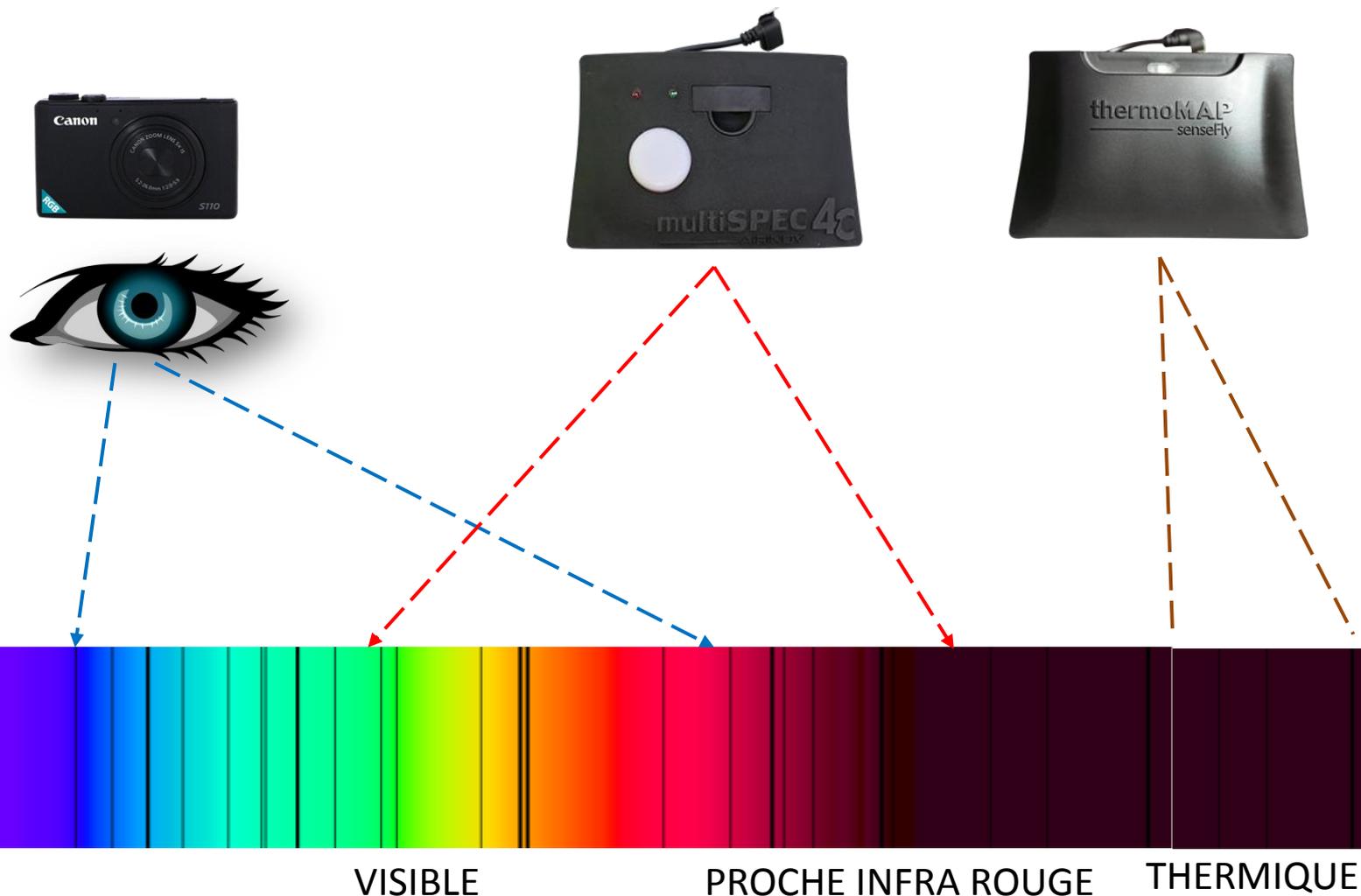
0

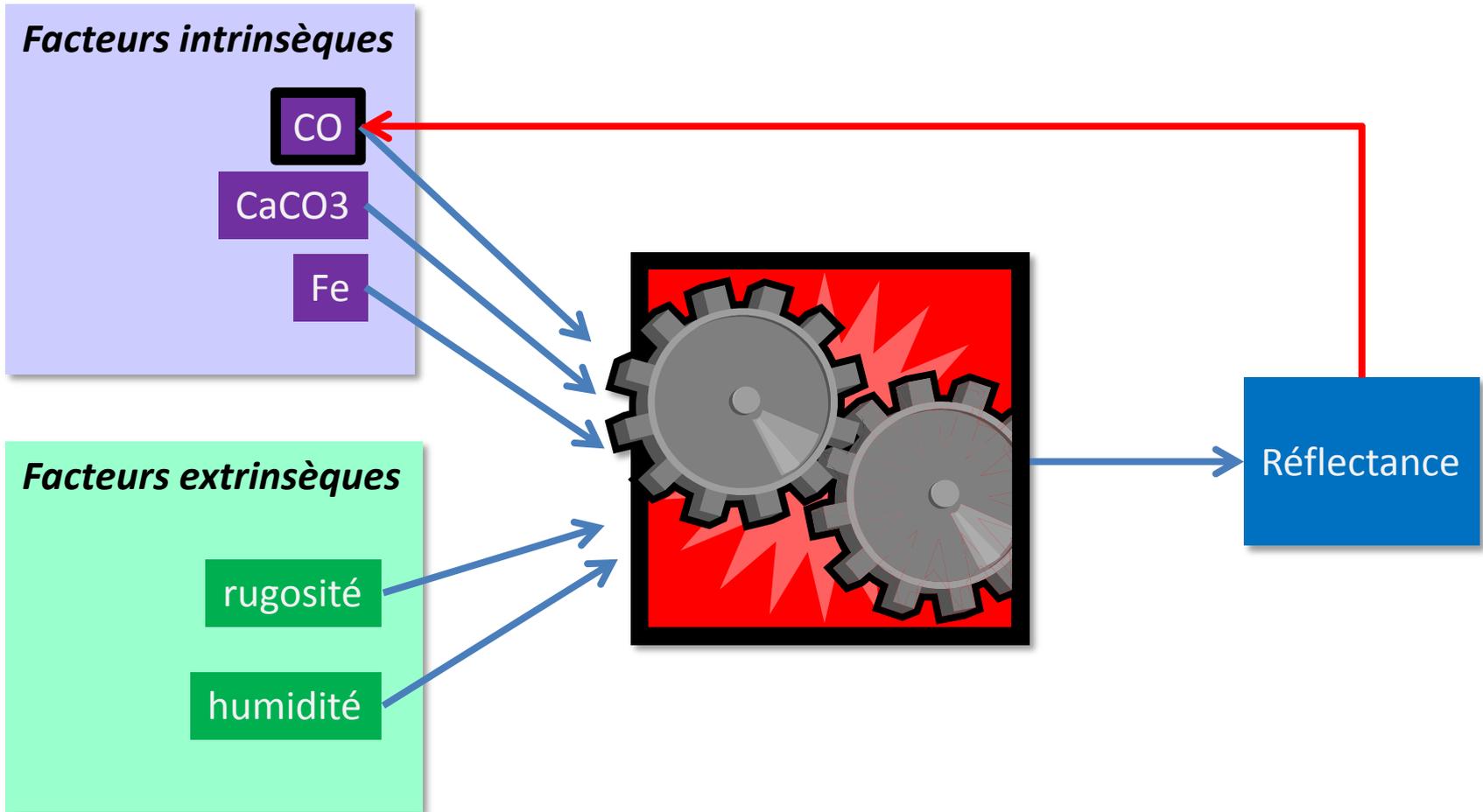
Capteur radiométrique





Capteurs radiométriques pour mesurer dans le rayonnement visible et dans le rayonnement « invisible » à l'œil humain



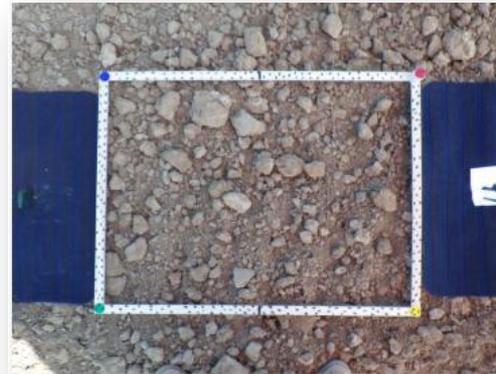


Mesures photogrammétriques -> rugosité

23 placettes de contrôle terrain



Mesure spectrale de terrain
ASD FieldSpec



Localisation DGPS



Description pédologique



Prélèvement de sol



Analyses laboratoire
Humidité par pesées

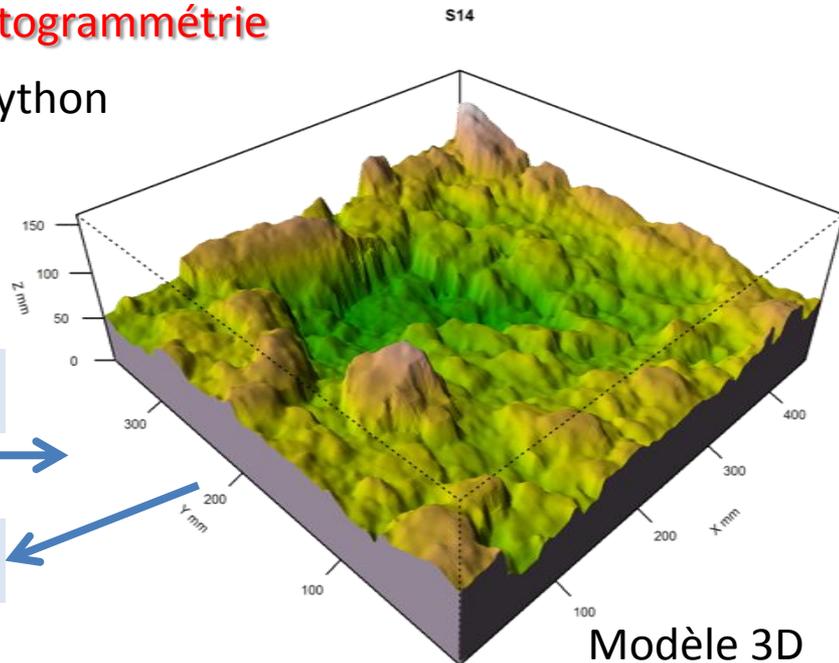
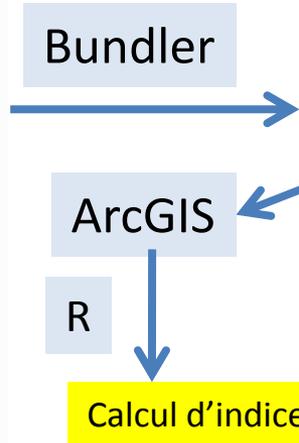


Estimation de la rugosité du sol par photogrammétrie

Photos de la placette prises sous différents angles



Programme python



www.agroparistech.fr

●●●● 4 disques colorés aux 4 coins du cadre: géoréférencement en absolu automatique par analyse d'image



$$W\% = \frac{m_w \text{ masse d'eau évaporée}}{m_d \text{ masse matériaux sec}} \times 100$$

Détermination de l'humidité du sol par pesée



Modèle de régression $CO = fct(GREEN, RED, REDEGE, NIR)$

$$CO = \alpha_R R + \alpha_{RE} RE + \alpha_{PIR} pIR + \alpha_G G + \beta$$

Facteurs de correction de la réflectance des effets de l'humidité et de la rugosité

$$Fa_{Ru} = \frac{1}{e^{(\alpha_{Ru\lambda} \cdot Ru)}} \quad \text{et} \quad Fa_w = \frac{1}{e^{(\alpha_{wc\lambda} \cdot Wc)}}$$

$Ru \in [0,1]$: la proportion d'ombrage lié à la rugosité

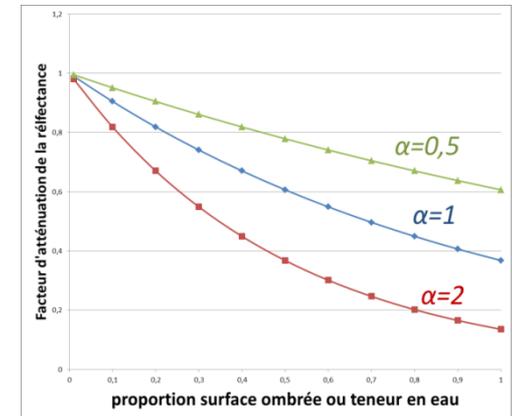
$Wc \in [0,1]$: l'humidité

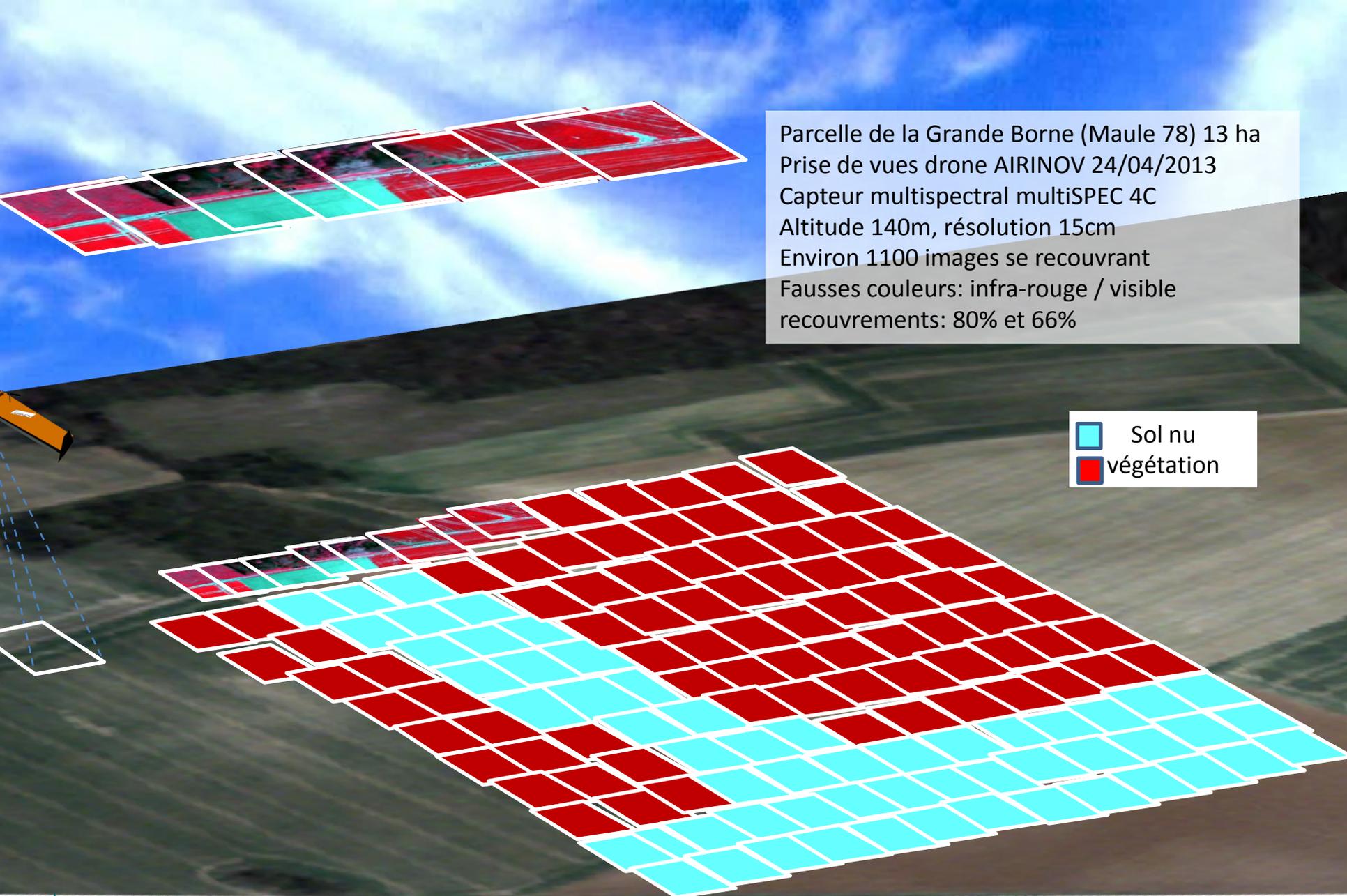
$\alpha_{Ru\lambda}$: coefficient lié à l'ombrage à la longueur d'onde λ

$\alpha_{wc\lambda}$: coefficient lié à l'humidité à la longueur d'onde λ

$$Rei_\lambda = Re_\lambda \cdot e^{(\alpha_{Ru\lambda} \cdot Ru)} \cdot e^{(\alpha_{wc\lambda} \cdot Wc)}$$

$$Rei_\lambda = Re_\lambda \cdot e^{(\alpha_{Ru\lambda} \cdot Ru + \alpha_{wc\lambda} \cdot Wc)}$$



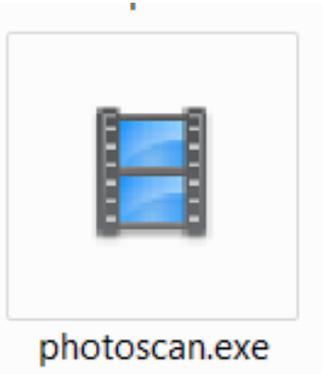


Parcelle de la Grande Borne (Maule 78) 13 ha
Prise de vues drone AIRINOV 24/04/2013
Capteur multispectral multiSPEC 4C
Altitude 140m, résolution 15cm
Environ 1100 images se recouvrant
Fausses couleurs: infra-rouge / visible
recouvrements: 80% et 66%

 Sol nu
 végétation



Les logiciels utilisés:



Agisoft Photoscan



Module développé en python
pour le calage et calibration des bandes



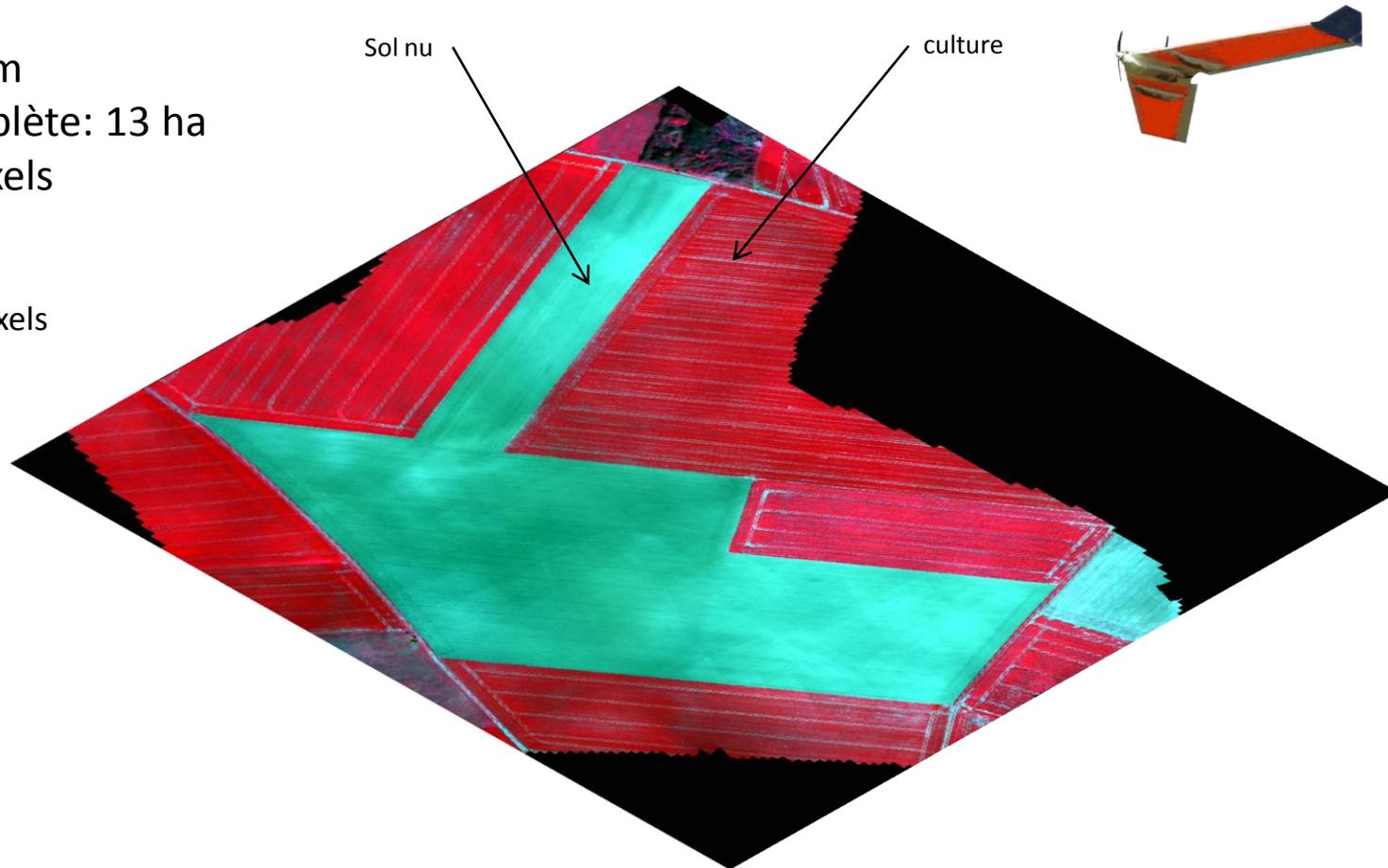
ArcMap 10.3 + Spatial Analyst



La mosaïque finale des 1100 images en fausses couleurs infrarouge visible.

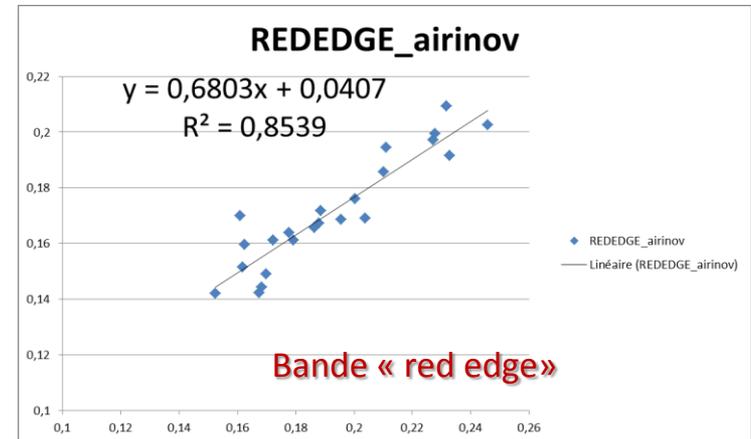
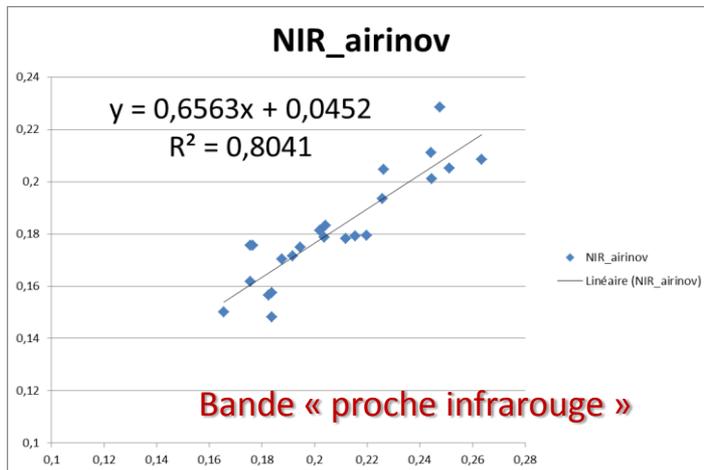
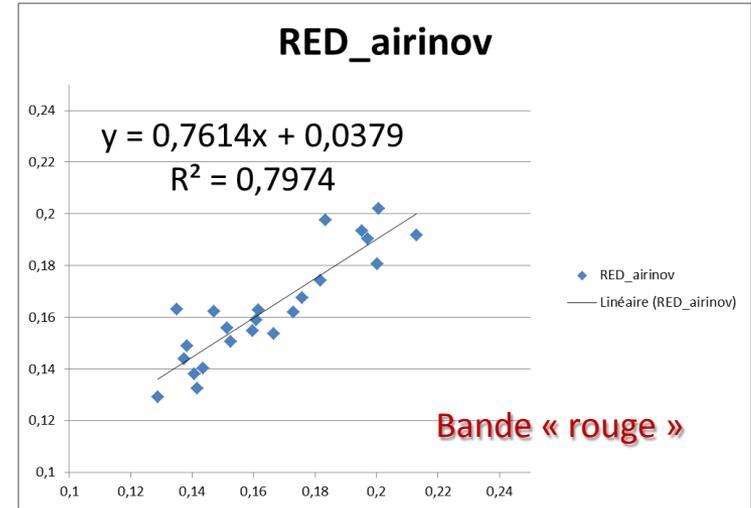
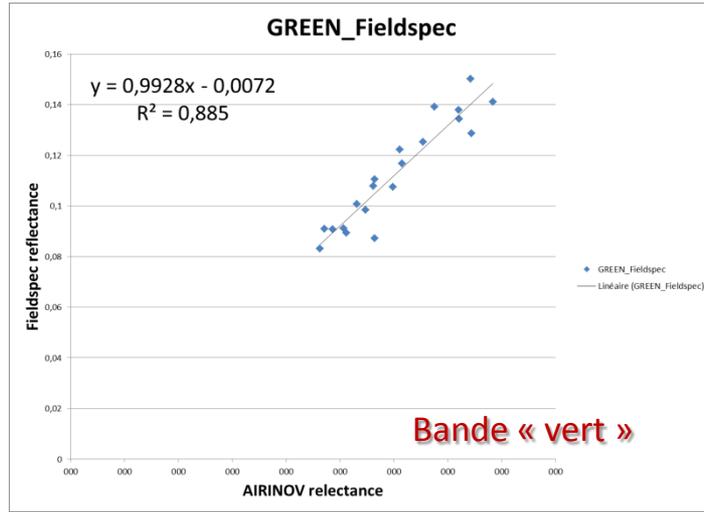
Résolution 15cm
Mosaïque complète: 13 ha
4410 x 4753 pixels

1100 images
Image: 752 x 480 pixels





Validation des mesures spectrales drone (multiSPEC 4C) par les mesures terrain spectro-radiomètre ASD Fieldspec: régression linéaire

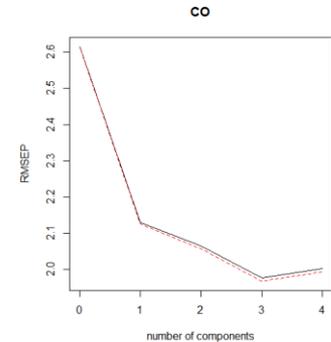
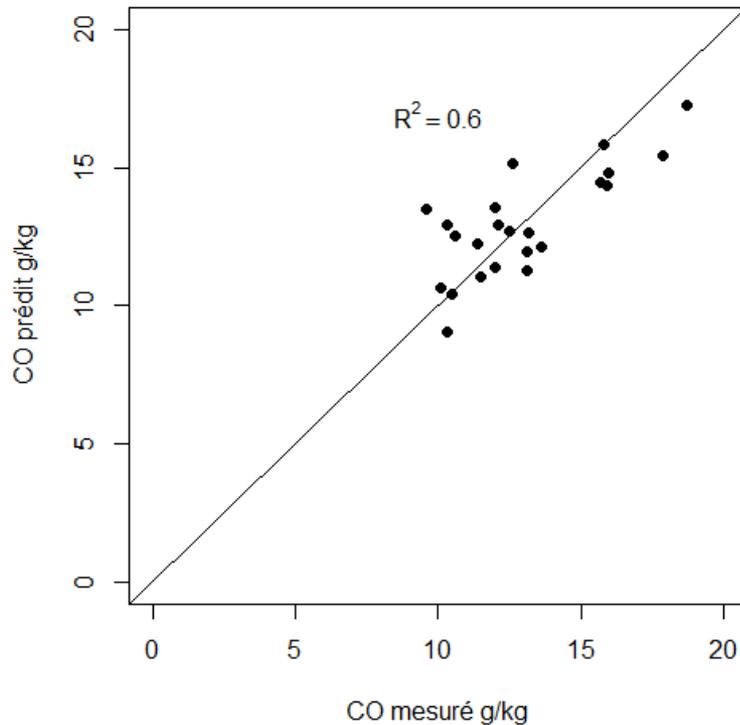




Le modèle de prédiction

$$CO = - 187,55 * R - 266,39 * RE - 20,72 * pIR + 468,27 * G + 37.74$$

CO prédit à partir des réflectances en fonction du CO analysé au laboratoire



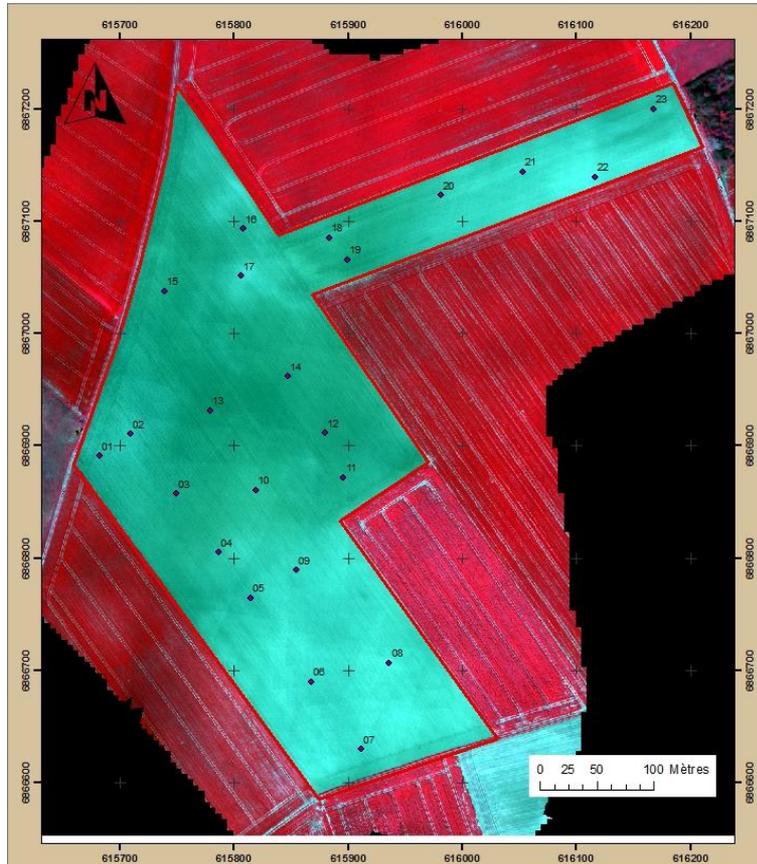
Choix du nombre de composantes

RMSE = 1,97 g CO / kg de sol (0,197 %)

VALIDATION: RMSEP

Cross-validated using 23 leave-one-out segments.

	(Intercept)	1 comps	2 comps	3 comps	4 comps
CV	2.615	2.129	2.065	1.975	2.001
adjCV	2.615	2.126	2.058	1.967	1.992



Composition colorée infra-rouge / couleur

d'après images drone AIRINOV du 24/04/2013
parcelle "Grande Borne" commune de Maule

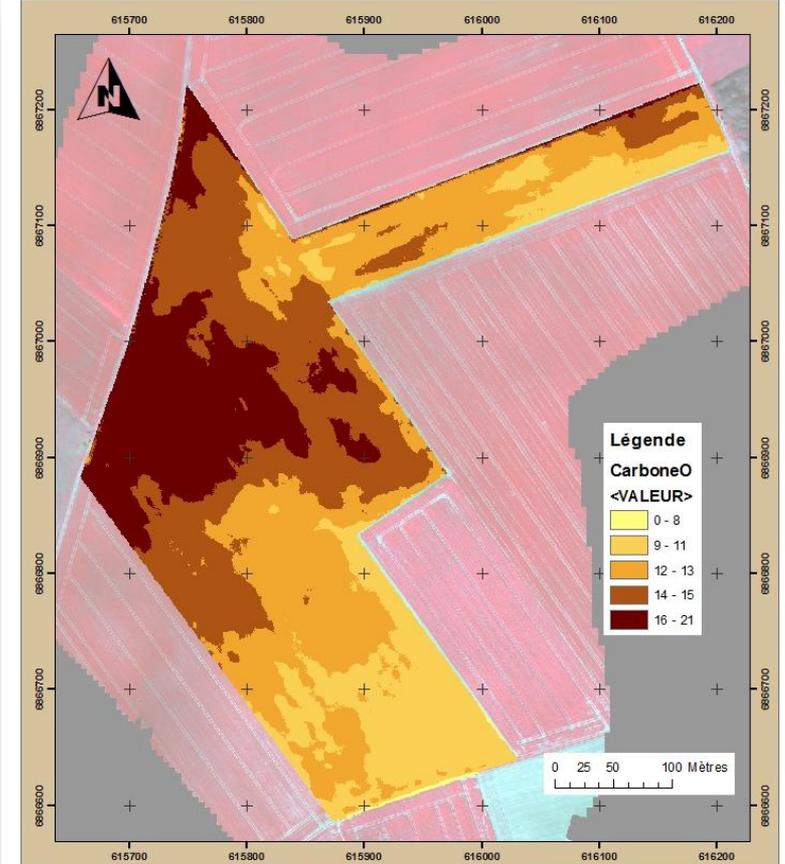


UMR EGC 78850 GRIGNON

Lambert 93



jean-marc.gilliot@agroparistech.fr



Teneur en Carbone Organique des sols en g / kg

d'après images drone AIRINOV du 24/04/2013
parcelle "Grande Borne" commune de Maule

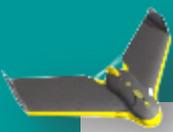


UMR EGC 78850 GRIGNON

Lambert 93



jean-marc.gilliot@agroparistech.fr



Résultats: avec le correction des effets de la rugosité et de l'humidité

$$Rei_V = Re_V \cdot e^{(5.Ru + 9.Wc)}$$

$$Rei_R = Re_R \cdot e^{(0,05.Ru + 8.Wc)}$$

$$Rei_{RE} = Re_{RE} \cdot e^{(8.Ru + 3.Wc)}$$

$$Rei_{pIR} = Re_{pIR} \cdot e^{(10.Ru + 0,5.Wc)}$$

Le modèle de prédiction obtenu par PLSR (3 composantes)

$$CO = - 43,69 * R - 30,63 * RE + 11,56 * pIR + 22,75 * G + 35,32$$

$$RMSE = 1,61 \text{ g de CO / kg de sol } (0,161 \%)$$

Amélioration de 18% de la qualité de la prédiction en CO

À développer avec plus de points et plus de variabilité de rugosité et d'humidité



Hauteur des cultures par photogrammétrie 3D



www.agroparistech.fr



SOERE PRO

Système d'Observations et d'Expérimentations au long terme pour la Recherche en Environnement sur les Produits Résiduaire Organiques
Site de QualiAgro (78)



Essai au champ d'apports de différents Produits Résiduaire Organiques (PRO) sur 40 placettes



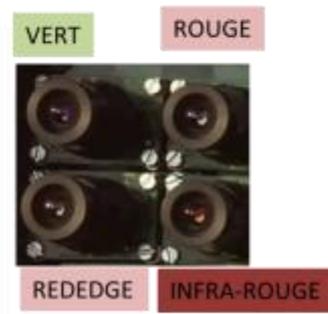
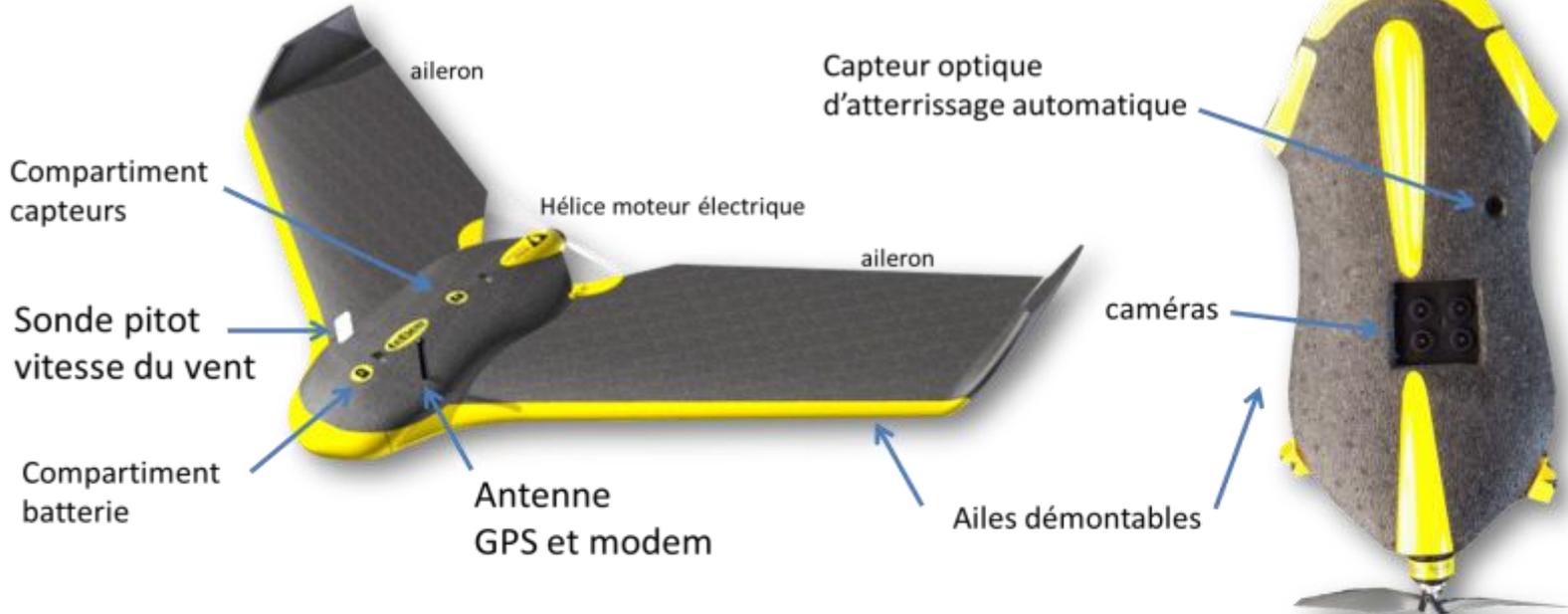
composts de biodéchets (BIO),
Ordures ménagères résiduelles (OMR) ou boues d'épuration (DVB), pour comparer avec des engrais minéraux (N) et du fumier de bovins (Fumier)

Essai suivi depuis 1998



Le drone eBee sensefly

Moins de 2kg 40 minutes d'autonomie



www.agroparistech.fr



Apports de la télédétection par drone en Agriculture: application à la cartographie de la fertilité des sols



ECOLE NATIONALE
D'INGENIEURS DE TUNIS

Séminaire international: Drones et moyens légers
aéroportés pour les applications géospatiales en
recherche : État des lieux et perspectives
TUNIS 3-5 novembre 2015

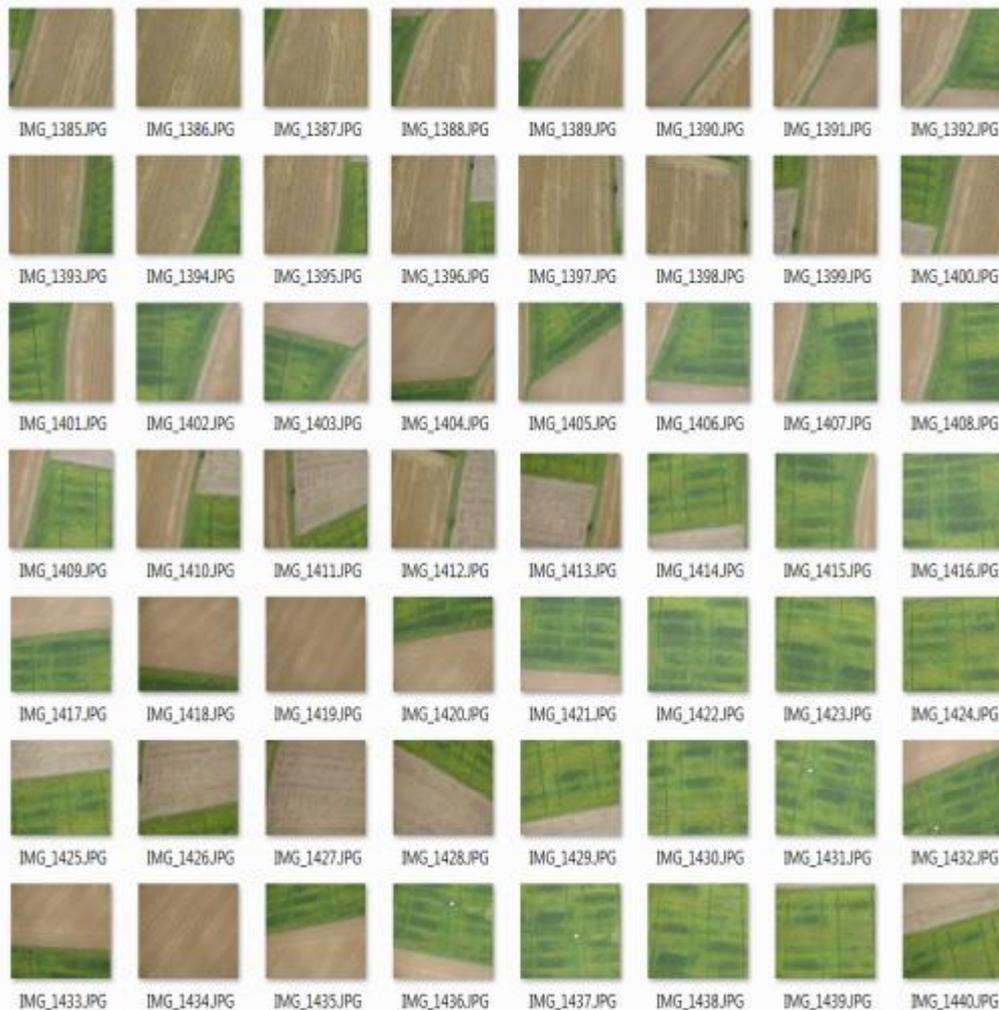


Institut de recherche
pour le développement

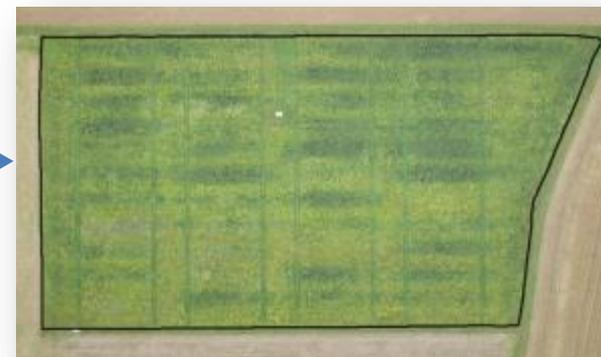
www.agroparistech.fr



200 photos

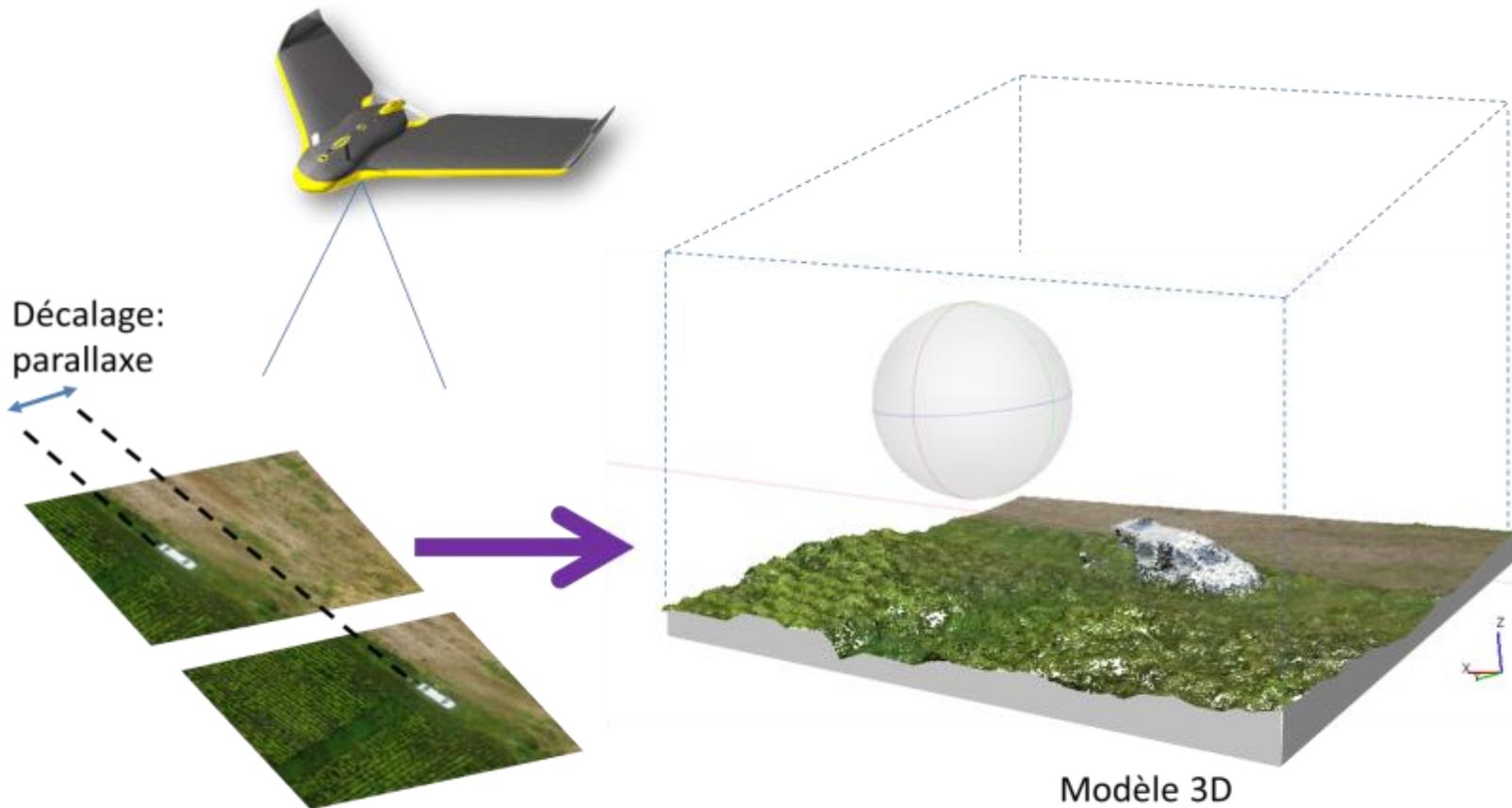


Orthophoto parcelle entière mosaïque





Le principe de la mesure photogrammétrique



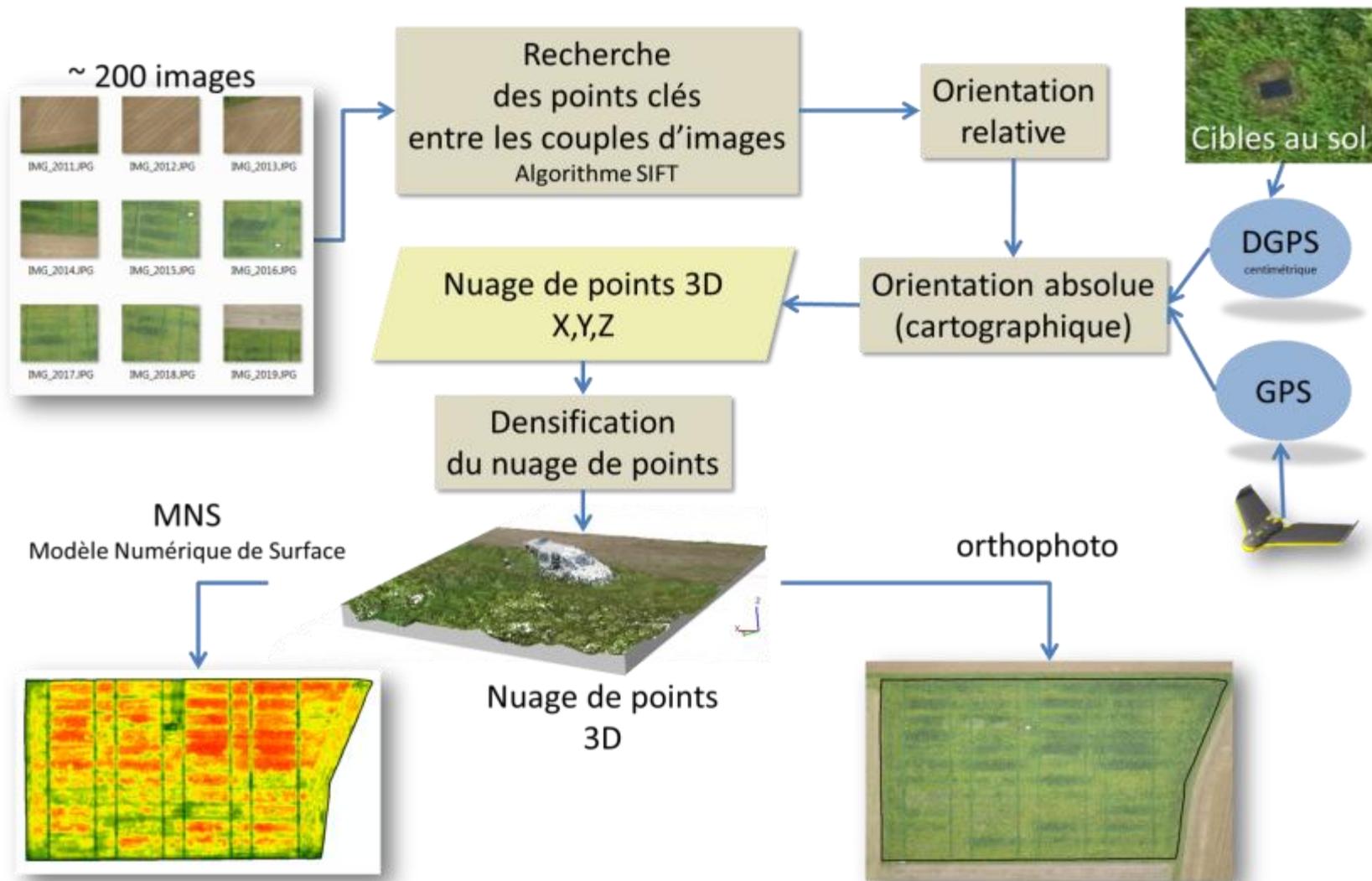
Fort recouvrement entre les images
est nécessaire

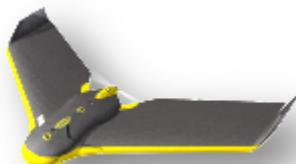
Modèle 3D
nuage de points 3D / 3D cloud points

www.agroparistech.fr



La chaîne de traitements

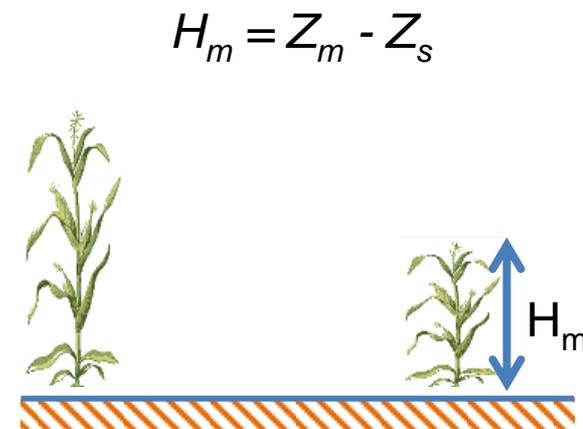
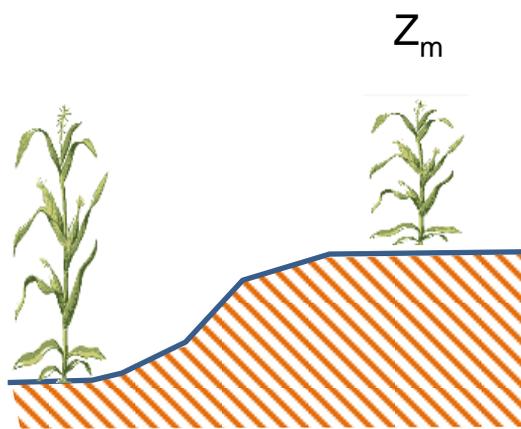
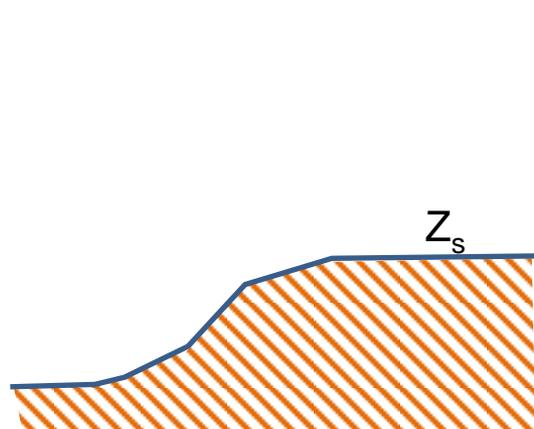




Prise de vues sur sol nu
sans végétation le 29/04/2014



Prise de vues sur maïs
le 27/08/2014



$$H_m = Z_m - Z_s$$



VALIDATION des hauteurs du maïs : Mesures au champ: **38 points de contrôle**

Mesure des hauteurs de maïs.

Base de la fleur.

Règle rigide

Niveau à bulle



Localisation

DGPS

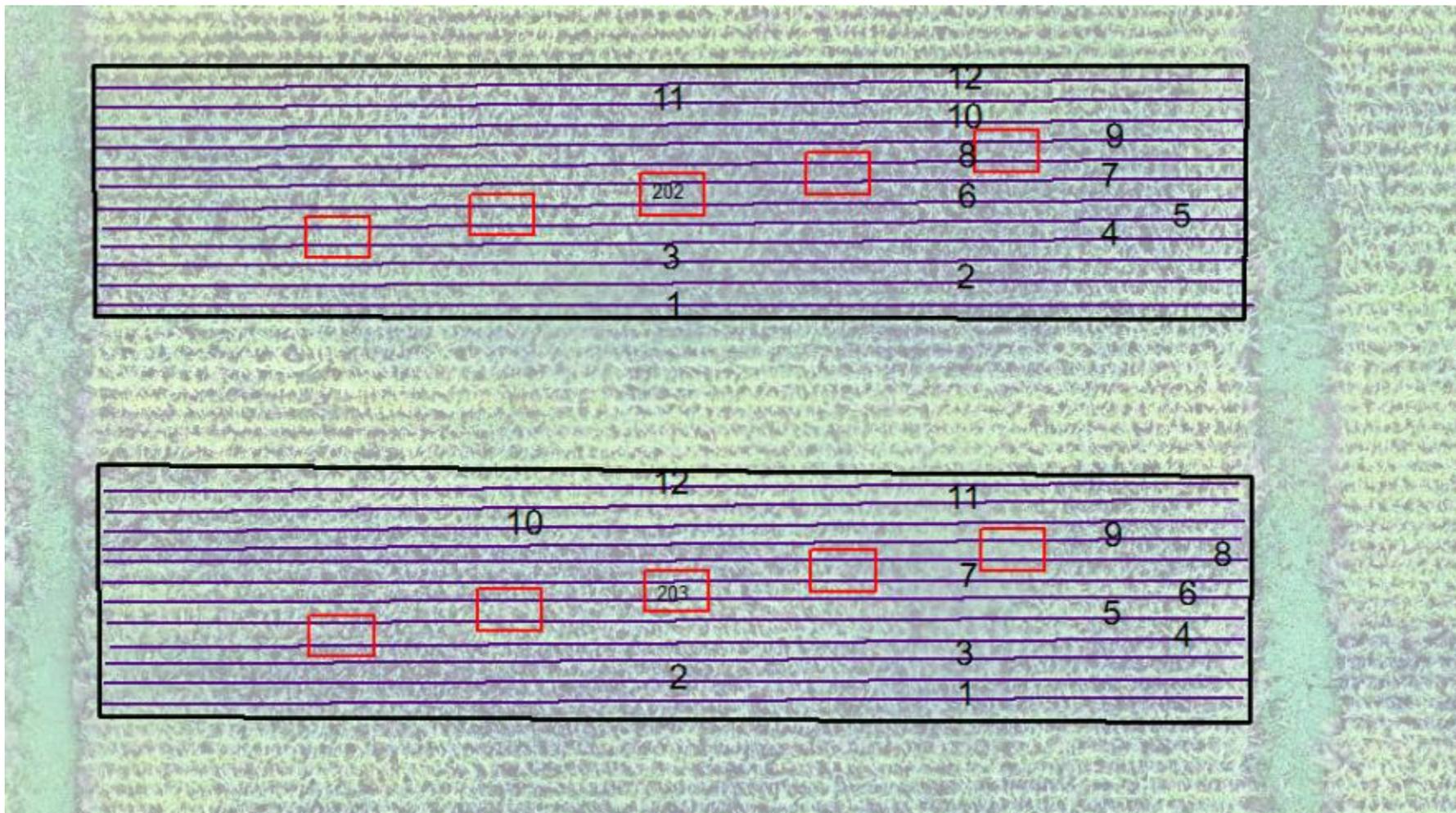
centimétrique

Trimble

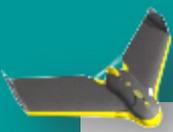




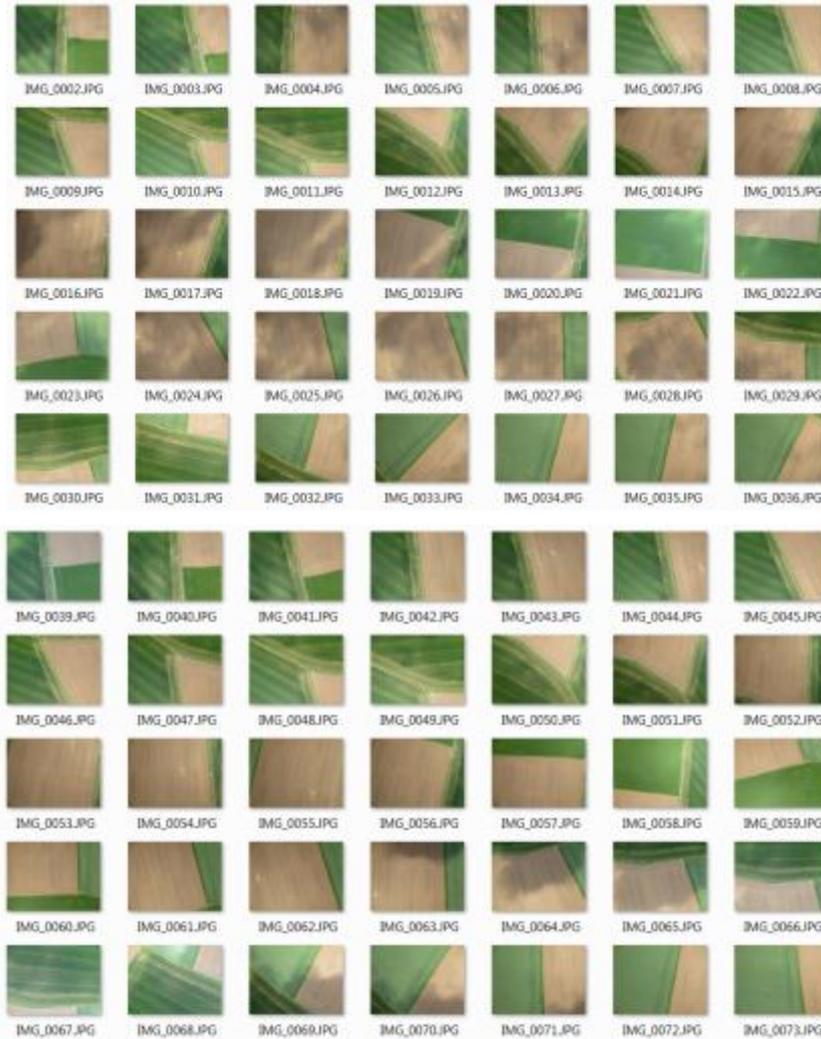
200 placettes de prélèvement du maïs à la récolte: mesures du rendement sur les 40 placettes qualiagro



www.agroparistech.fr



Les prises de vue sur sol nu sans culture le 29/04/2014



hauteur de 120 m

38 images de 12 MPixels ont été produites

correspondant à une résolution au sol de environ 4 cm

www.agroparistech.fr

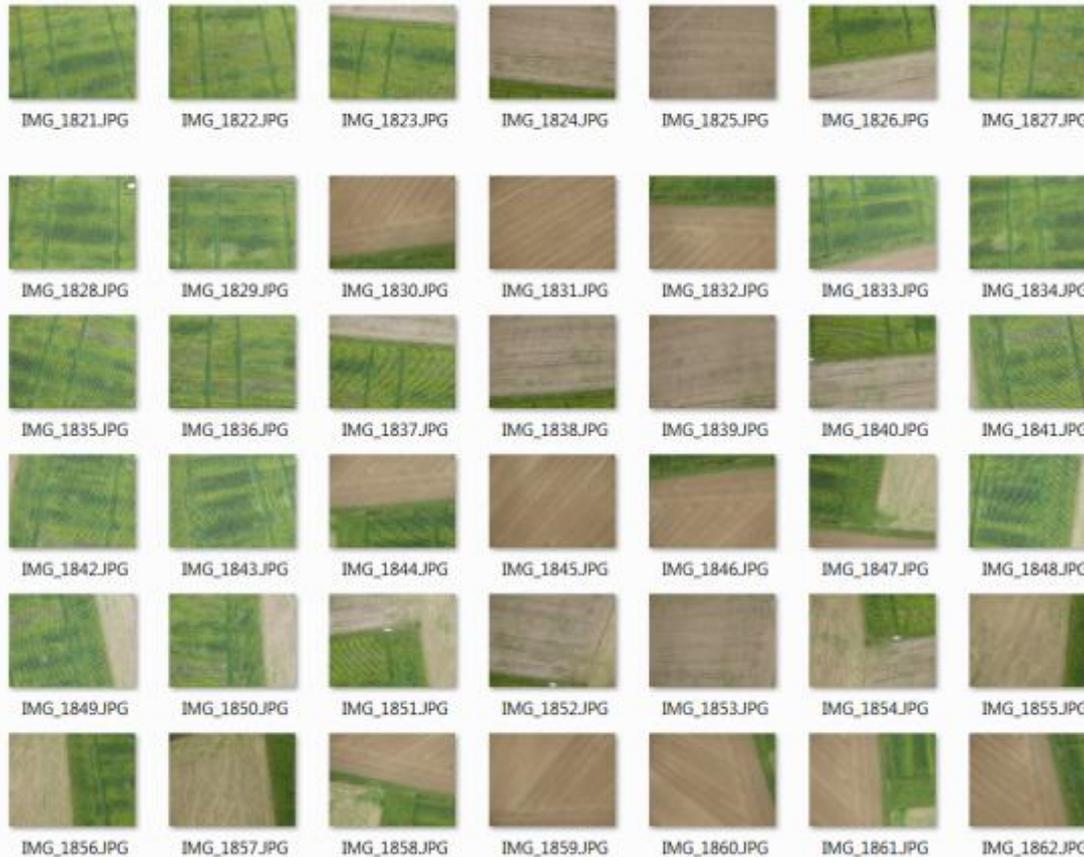


La mosaïque « sol nu » du 29/04/2014





Les prises de vue sur maïs le 27/08/2014



2 vols ont été effectués à une
hauteur de 60 m

pour un total de 414 images

à 2 cm de résolution

taux de recouvrement entre
les photos successives :

80% dans le sens longitudinal
75% en latéral

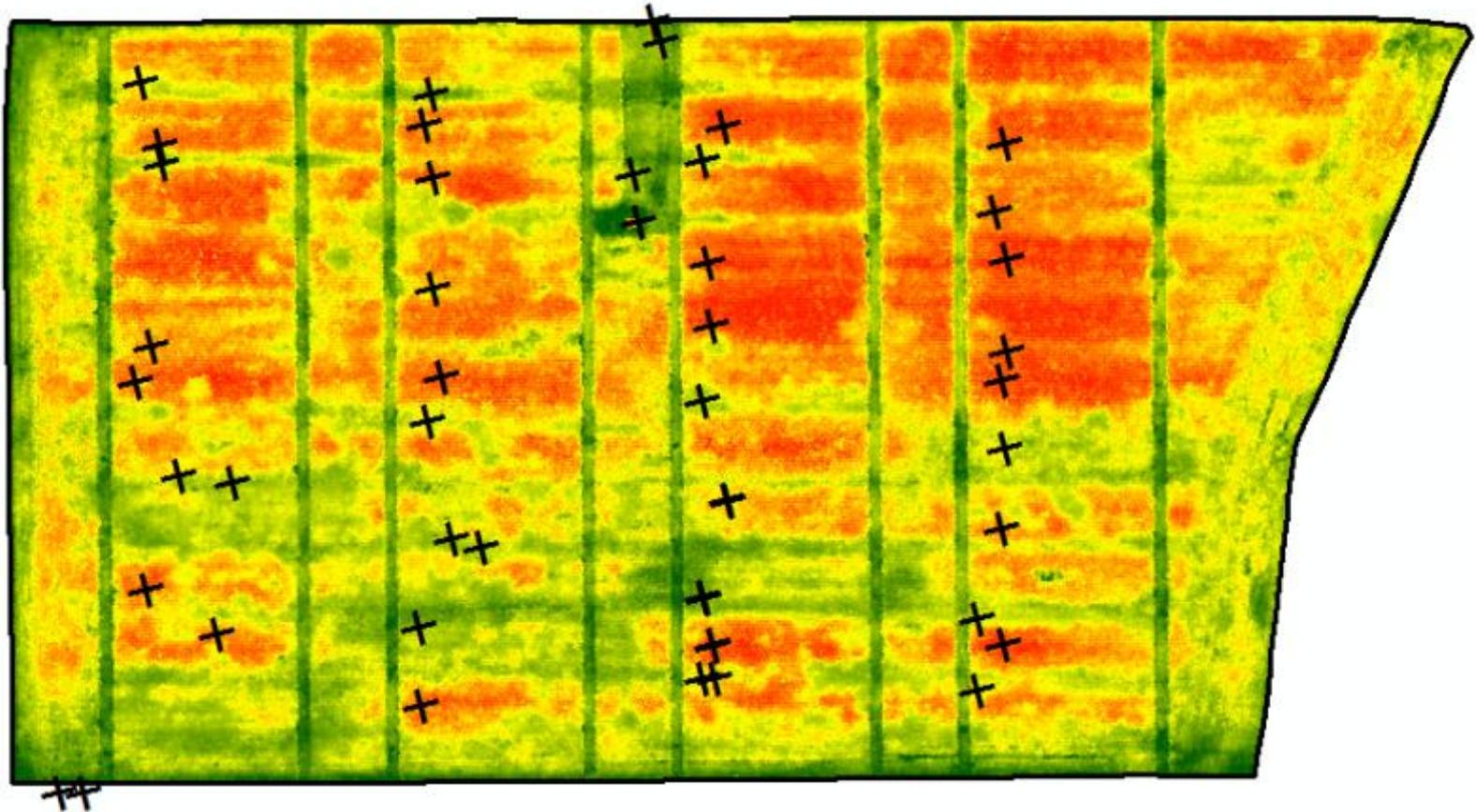


La mosaïque « maïs » du 27/08/2014



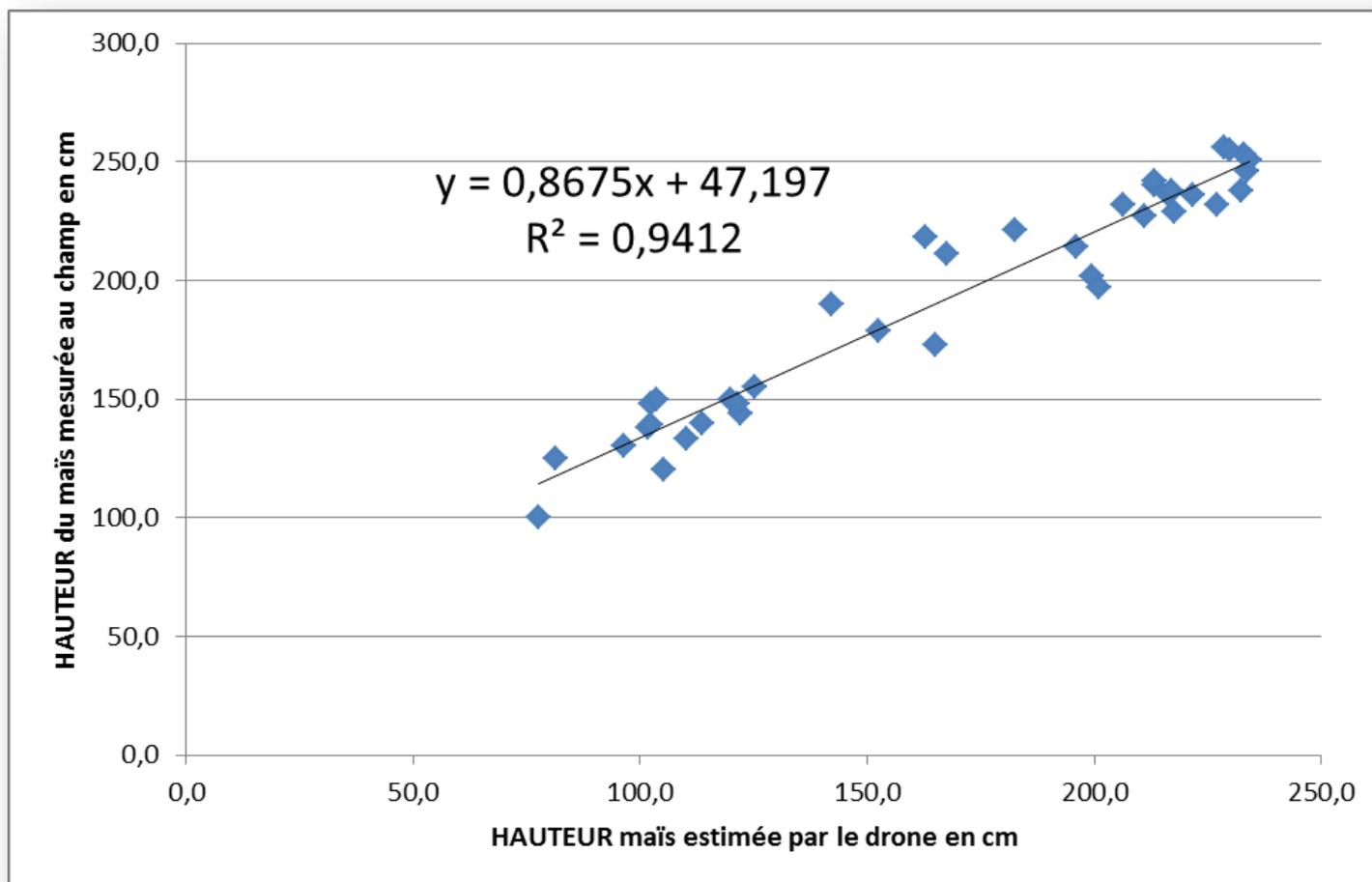


Le MNS de la hauteur du maïs et 38 mesures de références au champ





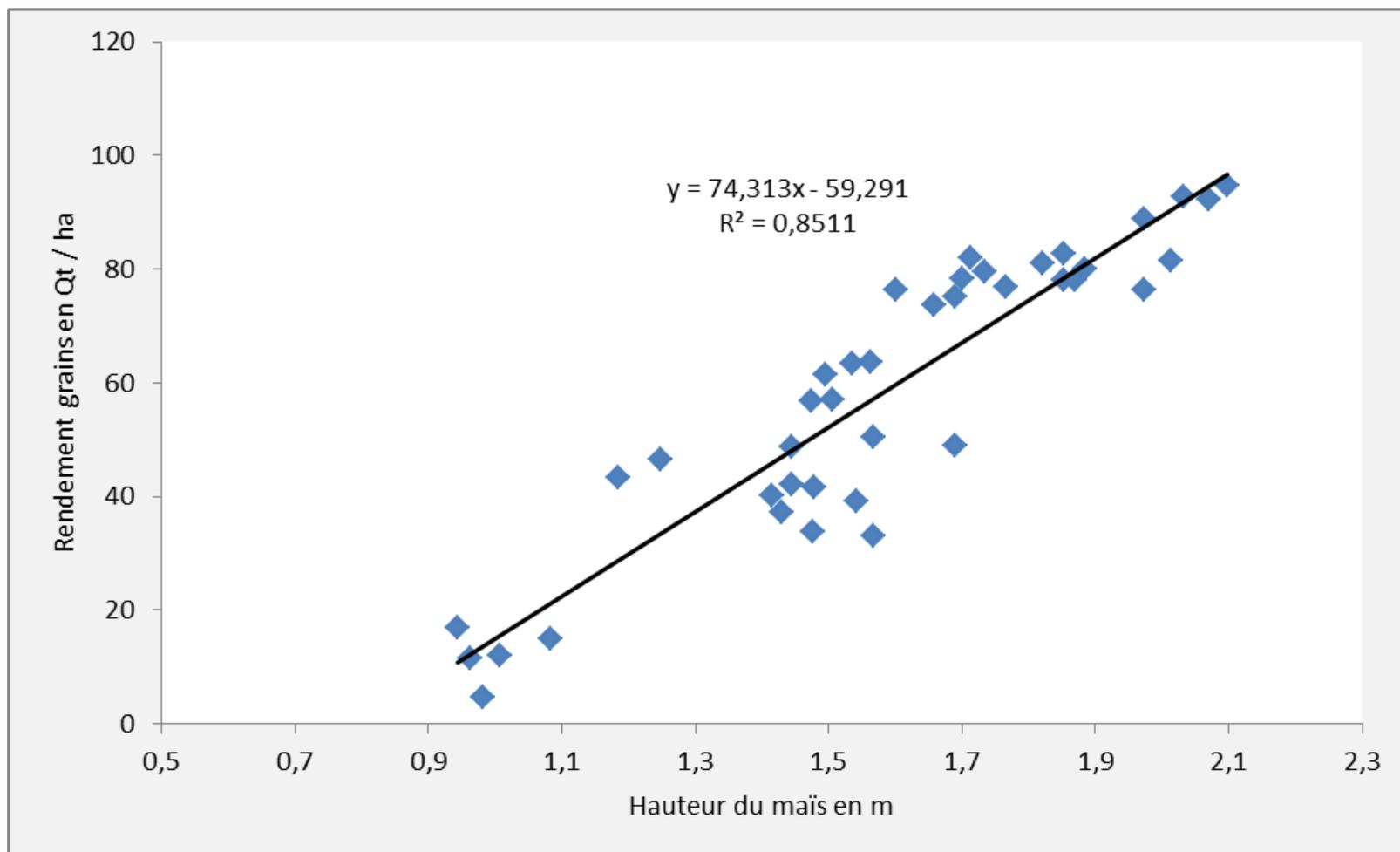
Régression linéaire entre les hauteurs du maïs estimées par drone et les hauteurs Mesurées sur le terrain



RMSE : erreur quadratique moyenne de la hauteur ~ 10 cm

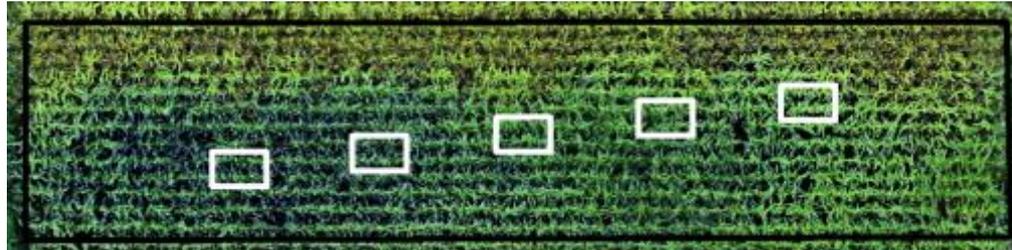


Estimation du rendement en grains à partir de la carte des hauteurs du maïs





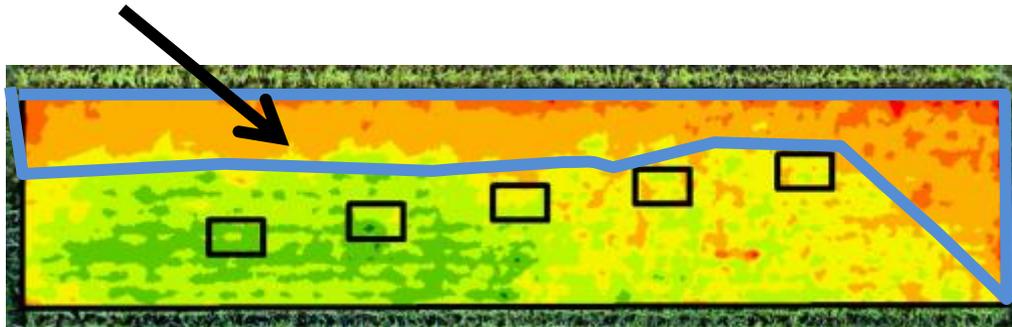
Parcelle 109 BIO



Rendement moyen parcelle estimé à partir des 5 placettes de prélèvement **76,4 qt / ha**

➔ Surestimation du rendement par la méthode des prélèvement

Zones de faible rendement non échantillonnée par les prélèvements



Rendement moyen estimé à partir statistique zonale Du modèle rendement drone Sur toute la parcelle 109 **59,92 qt / ha**

- ▢ Statistiques par bloc
- ▢ Zonaux
- 🔧 Croiser les superficies
- 🔧 Géométrie zonale
- 🔧 Géométrie zonale (table)
- 🔧 Histogramme zonal
- 🔧 Remplissage zonal
- 🔧 Statistiques zonales
- 🔧 **Statistiques zonales (table)**

Intérêt pour le suivi des essais d'avoir une mesure plus exhaustive spatialement pour mieux estimer et aussi analyser l'hétérogénéité.



Conclusions et perspectives

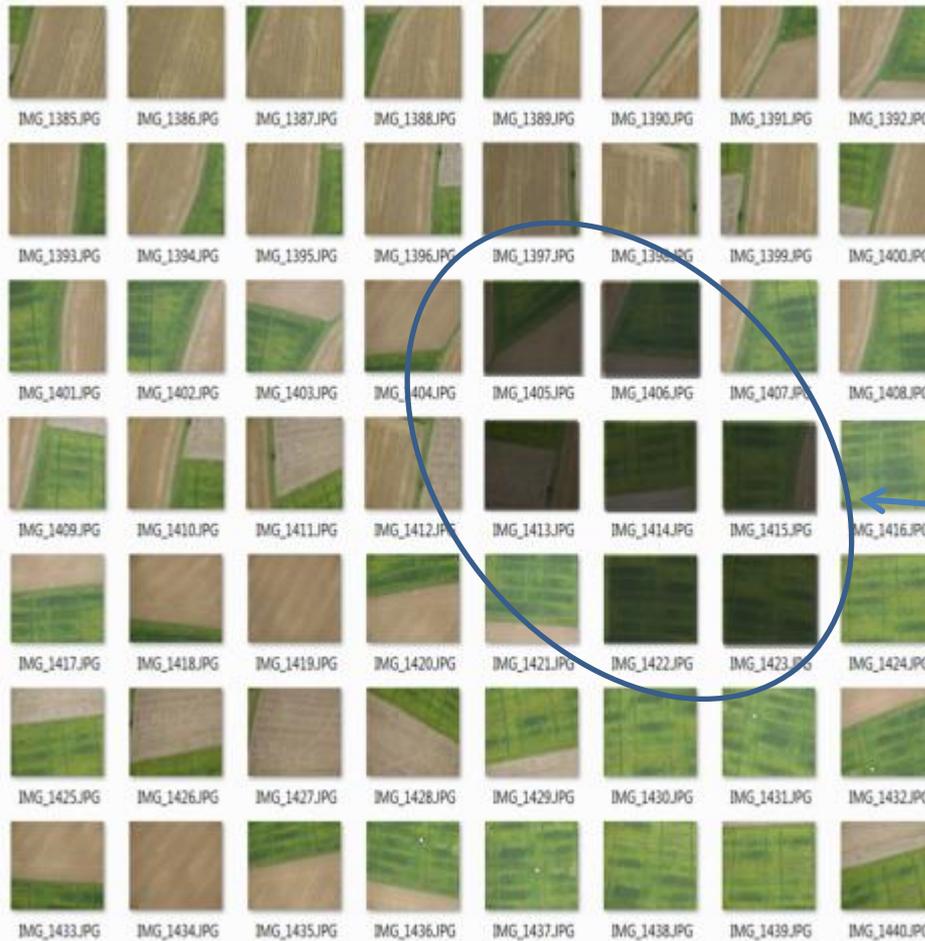
- ❑ Le drone est un outil très intéressant pour les suivis d'essais agronomique au champ car il donne la maîtrise du **moment de la prise de vue**:
 - Choix du moment optimum pour la mesure
 - Synchrones avec des mesures de validation au champ
 - Synchrones avec une pratique agricole ou un évènement
 - Répétition des mesures = suivi dans le temps = diachronie

On peut intégrer ses propres capteurs

- ❑ A partir d'une reconstruction photogrammétrique on a:
 - > Modéliser en 3D une culture de maïs
 - > Estimer la hauteur du maïs
 - > Estimer le rendement
 - > Produit une cartographie détaillée des variations du rendement



❑ Limites Perspectives de développement.



Maitrise des variations d'éclairément entre les images:

- Variations globales
- Variations locales
 - Nuages = ombres portées
 - Nuages = trouées

1 série d'images plus sombres

Correction / égalisation

Capteur d'éclairément



Airlnov multiSPEC 4C

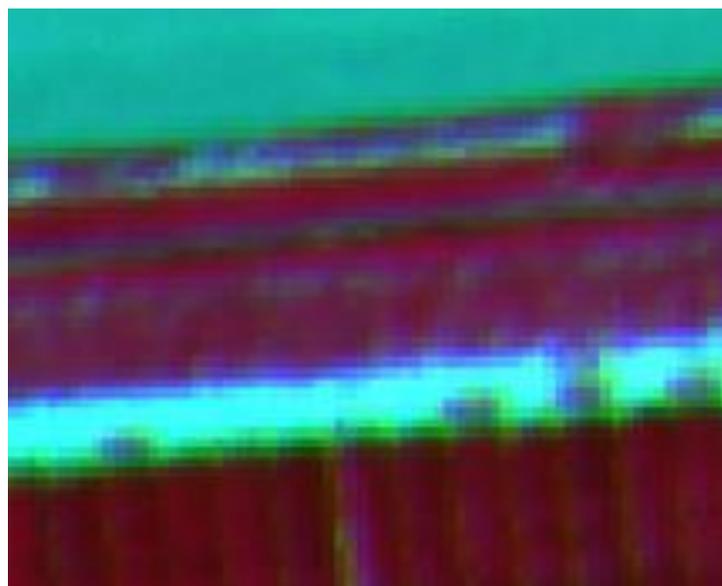


4 bandes spectrales = 4 capteurs séparés

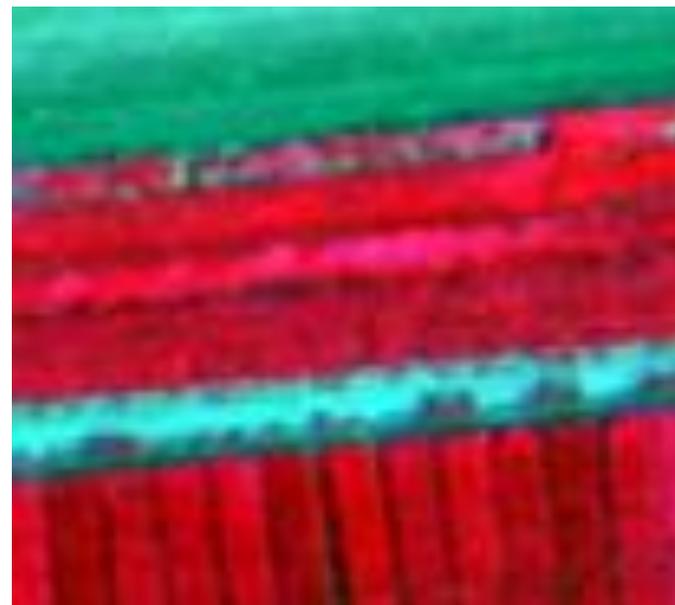


❑ Limites Perspectives de développement.

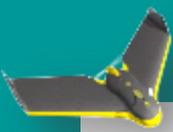
Calage géométrique des acquisitions multicapteurs



Calage de base postflight terra 3D



Calage avec imreg_dft (Discrete Fourier Transform)



☐ Limites Perspectives de développement.

Maitrise des conditions de vol:

- Netteté des images (vent)
- Taux de recouvrement des images
- Résolution souhaitée



Temps de calcul photogrammétrique

- « Gros » PC / station de travail / serveur de calcul
- CPU / GPU multicore cluster de machines



DELL T7610 24 core 32GO
GPU 3D 128 cores



Les drones sont une des facettes de la robotisation en agriculture



Robot bineur OZ



Autoguidage conduite automatique GPS Des engins agricoles



Robot cueilleur fraise

Robot taille de la vigne

robot de traite

robot de nourrissage ...

www.agroparistech.fr



**Apports de la télédétection par drone en Agriculture:
application à la cartographie de la fertilité des sols**



ECOLE NATIONALE
D'INGENIEURS DE TUNIS

Séminaire international: Drones et moyens légers
aéroportés pour les applications géospatiales en
recherche : État des lieux et perspectives
TUNIS 3-5 novembre 2015



Institut de recherche
pour le développement



Merci de votre attention