



Sols & Territoires

Réseau Mixte Technologique

# Atelier capteurs sol

Caractériser les sols à différentes échelles  
du profil à la parcelle

Lionel Cottenot, Isabelle Cousin, Guillaume Giot,  
Marine Lacoste, Blandine Lemercier, Maud Seger

# Introduction

**Axe 3 du RMT Sols et territoire**  
Acquisition et capitalisation des données sol

## Action 3.1

Développer et rendre opérationnelle la cartographie des sols par modélisation statistique (CSMS)

B. Lemerancier, P. Lagacherie

## Action 3.2

Apport de capteurs opérant à différentes échelles

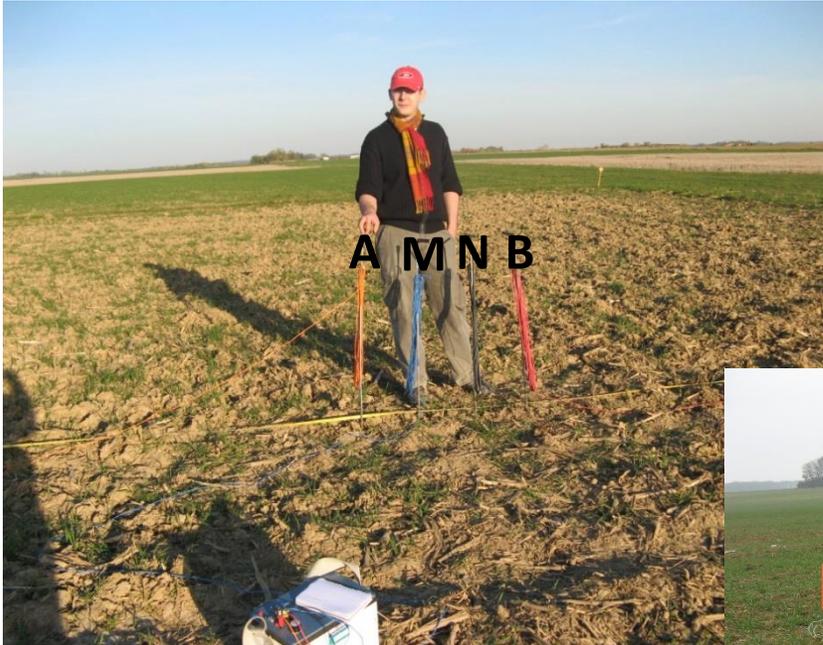
G. Coulouma, M. Seger

## Action 3.3

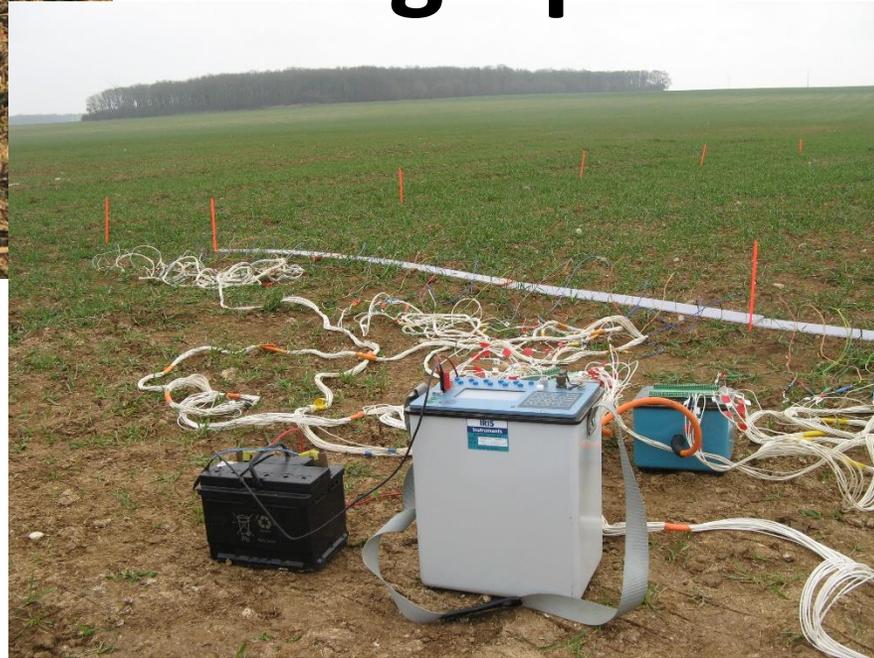
Collecte de données par des citoyens (recherches participatives)

B. Lemerancier, J. Sauter

# Sondage 1D



# Tomographie 2D



# Cartographie



Sol calcique  
moyennement profond  
(70 cm)

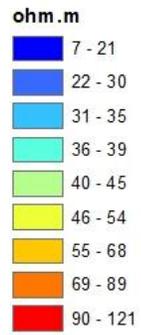
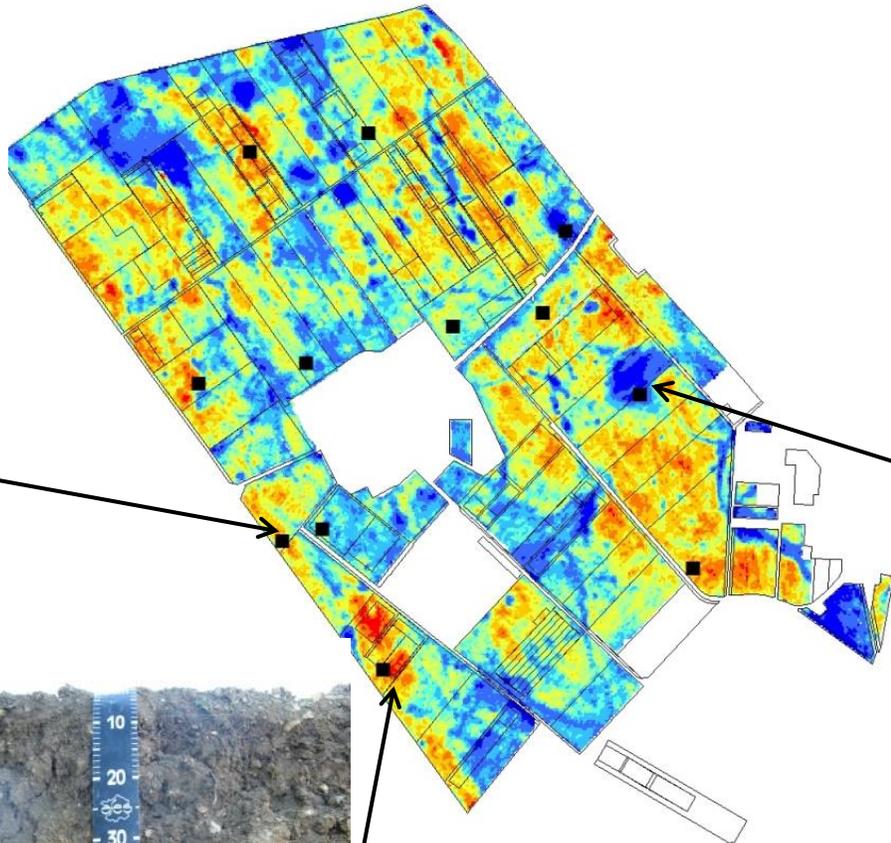


40 Ω.m

Sol calcaire superficiel  
(30-40 cm)



60 Ω.m



Sol calcique, AL-ALO,  
hydromorphe, profond (200  
cm)

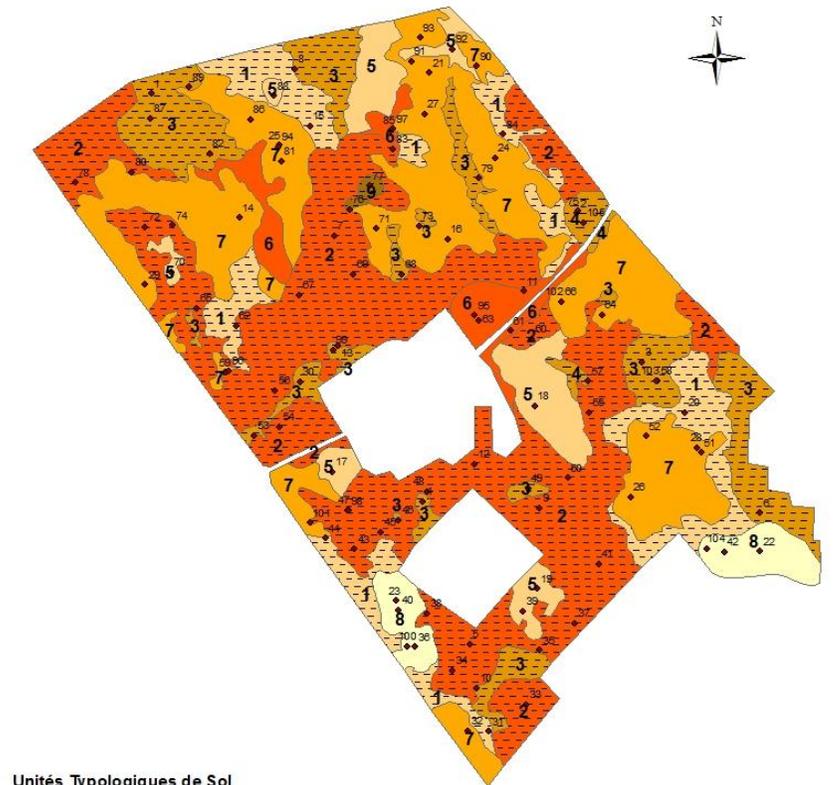


20 Ω.m

# Carte des Unités Typologiques de Sol de l'Unité Expérimentale d'Epoisses

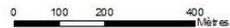


Girot G., Séger M.,  
Novembre 2015

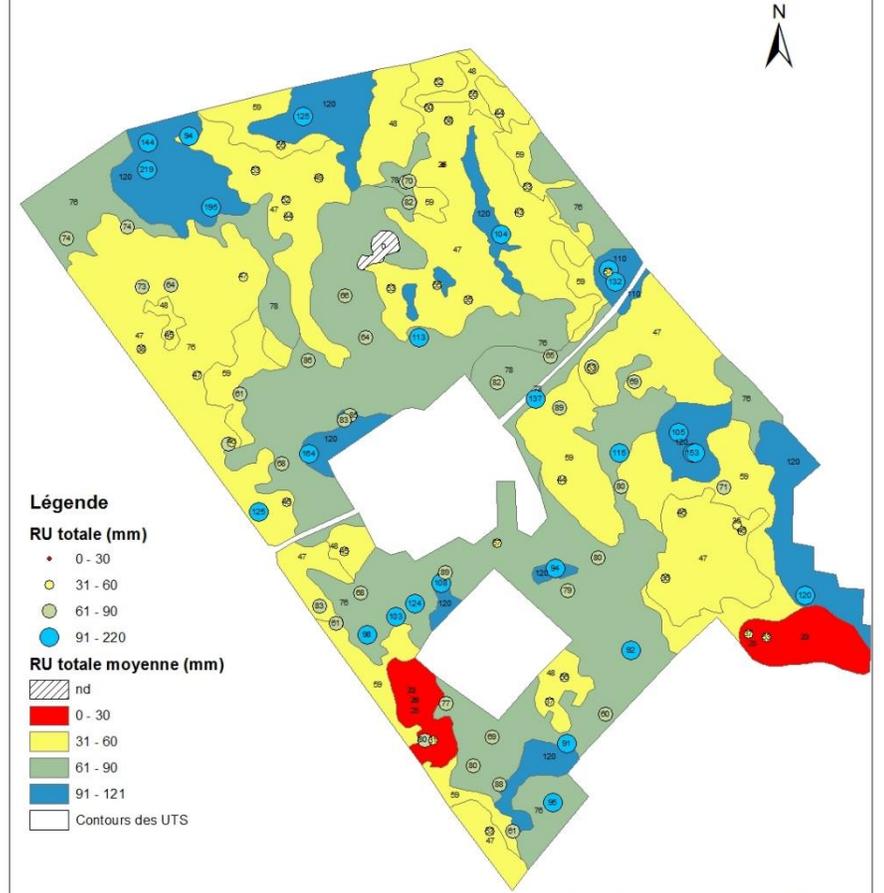


## Unités Typologiques de Sol

- 1. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, peu profonds
  - 2. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, moyennement profonds
  - 3. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, profonds
  - 4. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd hydromorphes à partir de 50 cm, calciques, à fente de retrait en période sèche, profonds
  - 5. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques à calcaires, à fente de retrait en période sèche, peu profonds
  - 6. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, moyennement profonds
  - 7. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calciques, à fente de retrait en période sèche, superficiels
  - 8. Sols alluviaux argilo-limoneux à argileux lourd non hydromorphes, calcaires, à fente de retrait en période sèche, superficiels
  - 9. Sols alluviaux argilo-limoneux hydromorphes, lessivés à planosoliques (changement textural argileux brusque), profonds
- Fosses pédologiques
  - Sondages pédologiques 2014-2015
  - Sondages pédologiques 2013



# Carte du réservoir utilisable



## Légende

### RU totale (mm)

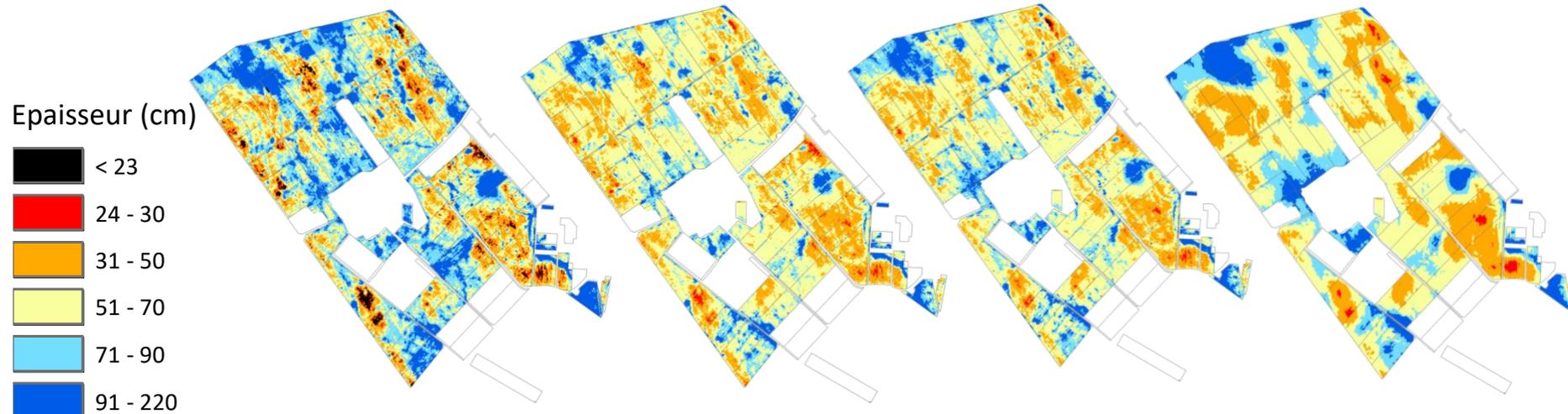
- 0 - 30
- 31 - 60
- 61 - 90
- 91 - 220

### RU totale moyenne (mm)

- ▨ nd
- 0 - 30
- 31 - 60
- 61 - 90
- 91 - 121
- Contours des UTS



# Travaux sur la modélisation de l'épaisseur du sol



	Régression linéaire simple		Krigage avec dérive externe	
	Variable explicative : Une des 3 voies de mesure	Variable explicative : Indicateur 1	Dérive externe : Indicateur 1	Dérive externe : Indicateur 2
r	0.77	0.74	0.86	0.93
Erreur moyenne (cm)	5	10	8	7
RMSE (cm)	30	33	26	20
précision < 10 cm	23	40	48	54
précision > 20 cm	46	34	26	26

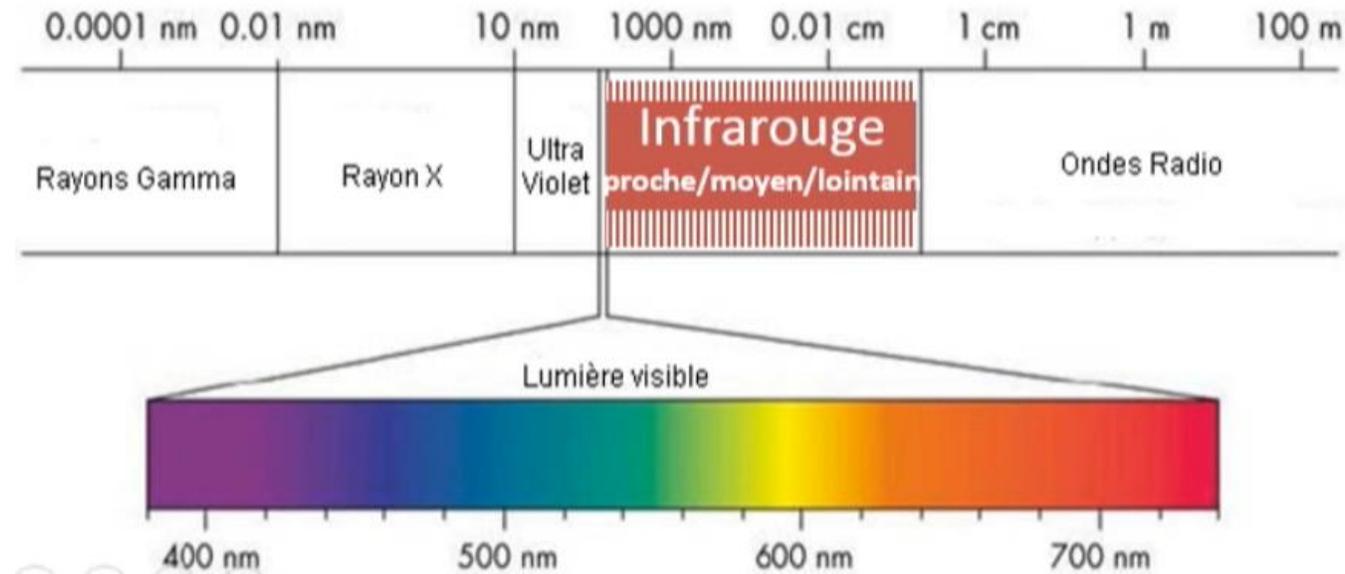
# Spectroscopie proche infra-rouge (SPIR – NIRS)

- La spectroscopie est l'étude de l'interaction rayonnement électromagnétique et de la matière
- Technique analytique intégrative sensible à la composition organique et inorganique de la matière
- Basée sur la signature spectrale des éléments du sol :
  - Matière organique ; texture ; minéralogie argileuse, humidité, carbonates
  - Mais aussi structure, fertilité, capacité de rétention en eau

- Acquisition d'information rapide, non-destructive, "peu coûteuse", sans produits chimiques  
- Utilisable sur le terrain

- Méthode alternative dépendant d'une méthode de référence  
- Souvent produit-dépendant (autant de calibrations que de produits)

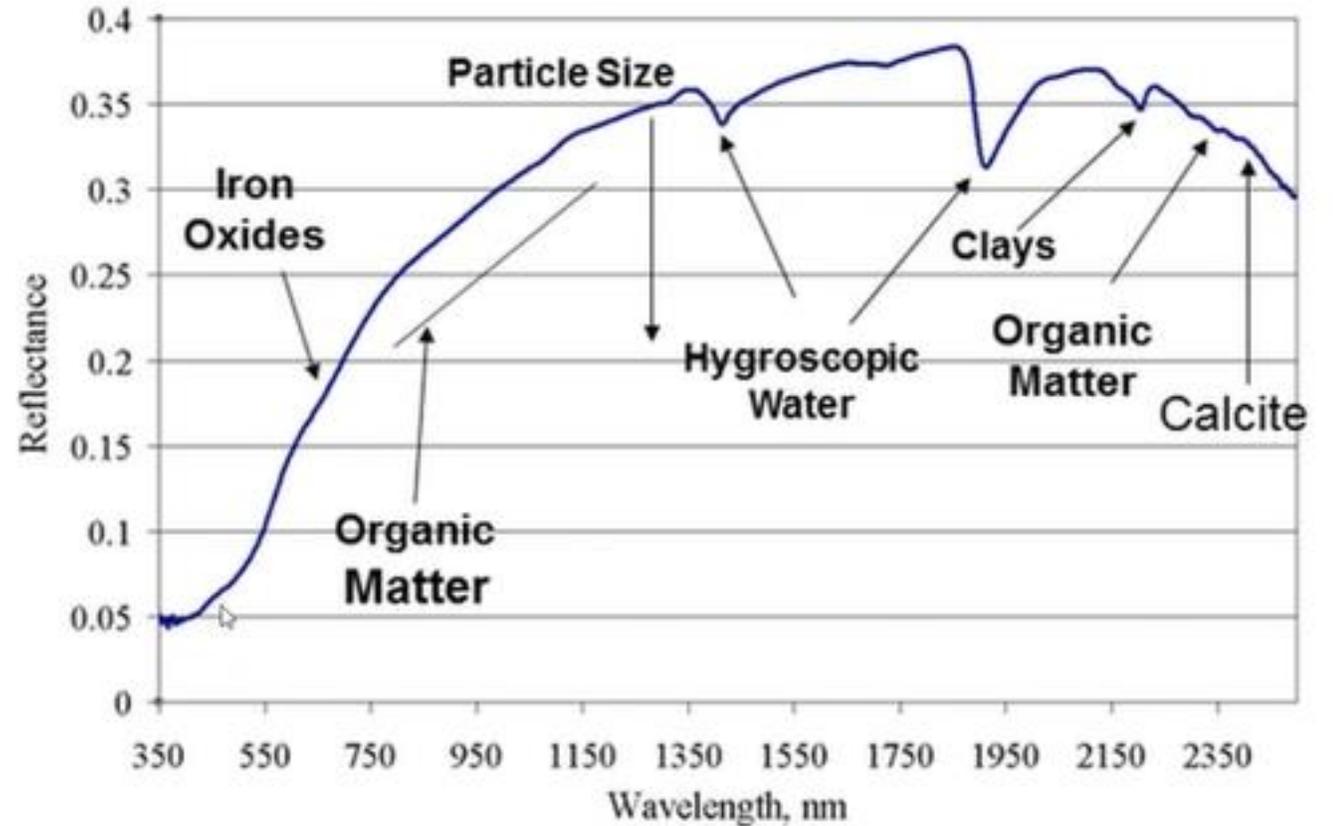
# Spectroscopie de vibration



Le sol est un matériau solide complexe (éléments ayant des fréquences de vibrations voisines) → Le recouvrement des bandes d'absorption dans le NIR complique l'exploitation des spectres

# Spectre de réflectance

Les fréquences « absorbées » apparaissent comme une diminution du signal détecté et sont représentées par un spectre qui donne en % le rayonnement réfléchi vs. longueur d'onde (réflectance spectrale).

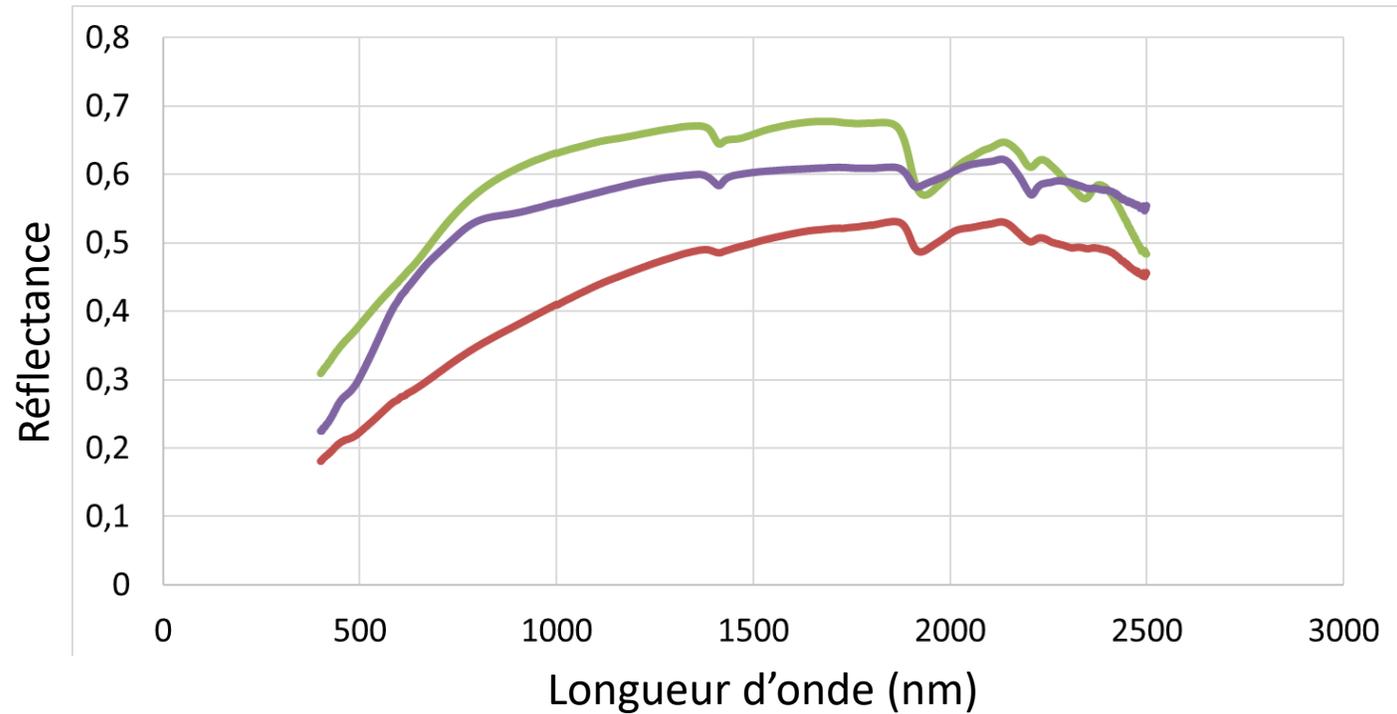


Spectre de réflectance d'un sol (Haploxeralf) avec ses chromophores

Ben Dor et al. (1999)

# Spectre de réflectance

Les fréquences « absorbées » apparaissent comme une diminution du signal détecté et sont représentées par un spectre qui donne en % le rayonnement réfléchi vs. longueur d'onde (réflectance spectrale).

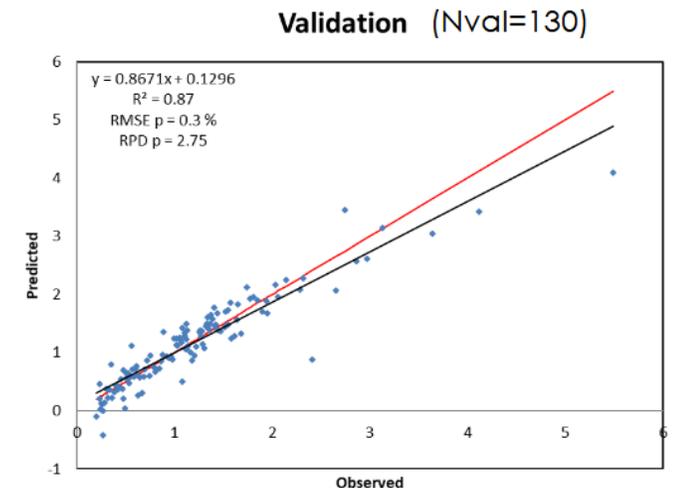
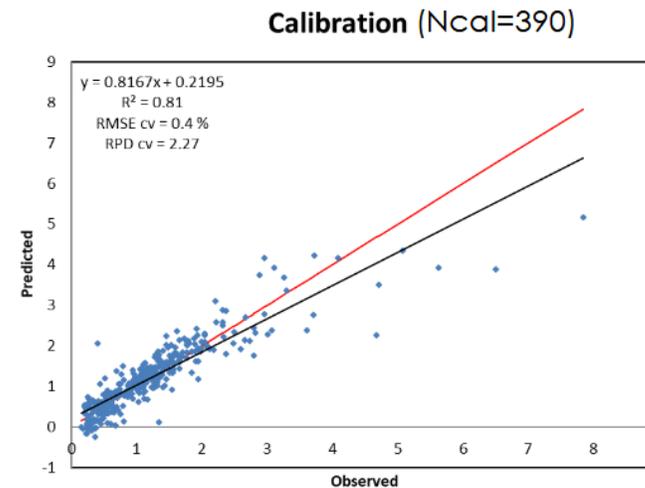


Ech	Arg	LF	LG	SF	SG	C	pH	CEC (cob)
420	150	181	335	109	225	48,20	5,73	8,73
713	36	18	28	383	535	7,28	8,67	2,94
608	174	258	463	86	19	5,18	5,69	3,81

# Traitement et interprétation des spectres

- Post-traitements : lissage, transformation, calculs d'indicateurs
- Recours à la chimiométrie pour extraire l'information des spectres en la rapportant statistiquement aux données chimiques (modèles)

Calibration par méthode *leave-one-out* cross-validation + Régression PLS (Partial Least Squares).



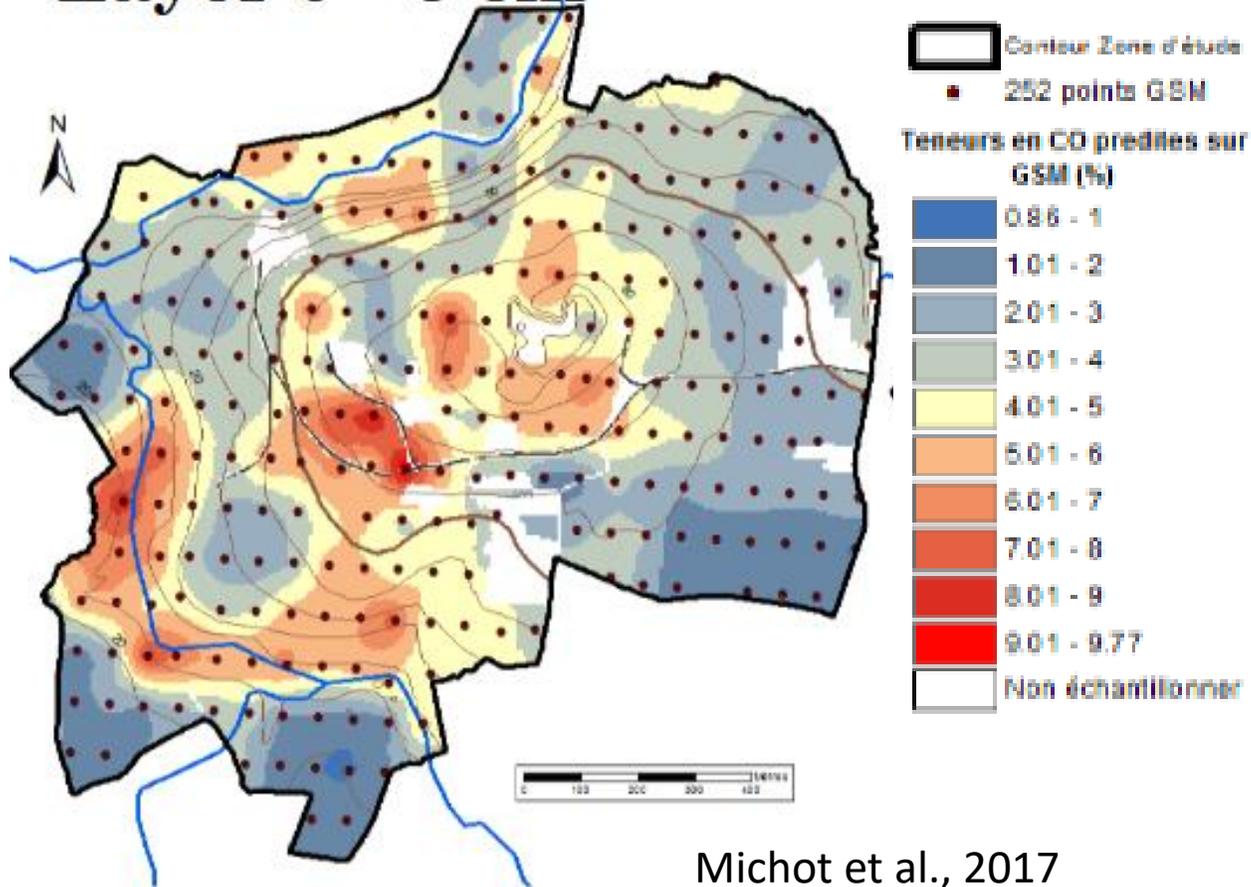
OC (%)	Min (%)	Max (%)	Mean (%)	ET (%)
Observed	0.15	7.84	1.20	0.91
Predicted	-0.24	5.16	1.20	0.82

OC (%)	Min (%)	Max (%)	Mean (%)	ET (%)
Observed	0.20	5.49	1.18	0.81
Predicted	-0.43	4.09	1.15	0.76

→ Besoin de bases de calibration

# Exemple de carte : prédiction de la teneur en C organique sur un territoire du 22

## Layer 0 – 5 cm



Tertre de Brandefert – 140 ha

Krigeage ordinaire de valeurs prédites par SPIR

→ Couplage d'un modèle spectro et de techniques de spatialisation

# Réflexions

- Répétitions
- Préparation des échantillons
- Effet de l'humidité
- Calibration
- Valeurs de référence (diversité méthodes selon les pays)
- Le fait d'avoir les spectres peut permettre de remonter le temps (nouvelles propriétés évaluées)
- Spectroscopie aéroportée / par satellite

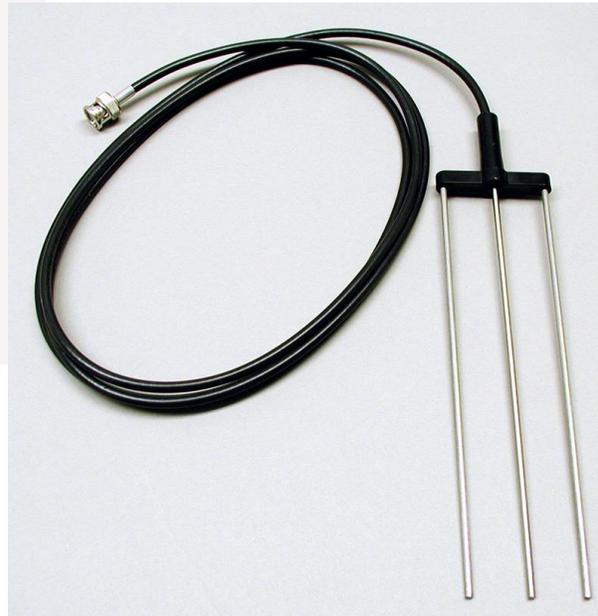
## Pour aller plus loin :

- Webinaire AFES n°40 – 2019 Bas van Wesemael : Utilisation des méthodes spectroscopiques appliquées aux sols  
<https://vimeo.com/channels/webinairesafes/316136227>
- Séminaire de la Chaire AgroTIC - 5 décembre 2017 - Bordeaux Sciences Agro : Lauric Cécillon : La spectroscopie pour caractériser les propriétés chimiques des sols  
<https://www.canal-u.tv/chaines/univ-bordeaux/caracteriser-les-sols-agricoles-le-point-sur-les-technologies-numeriques/la>

# Sondes TDR

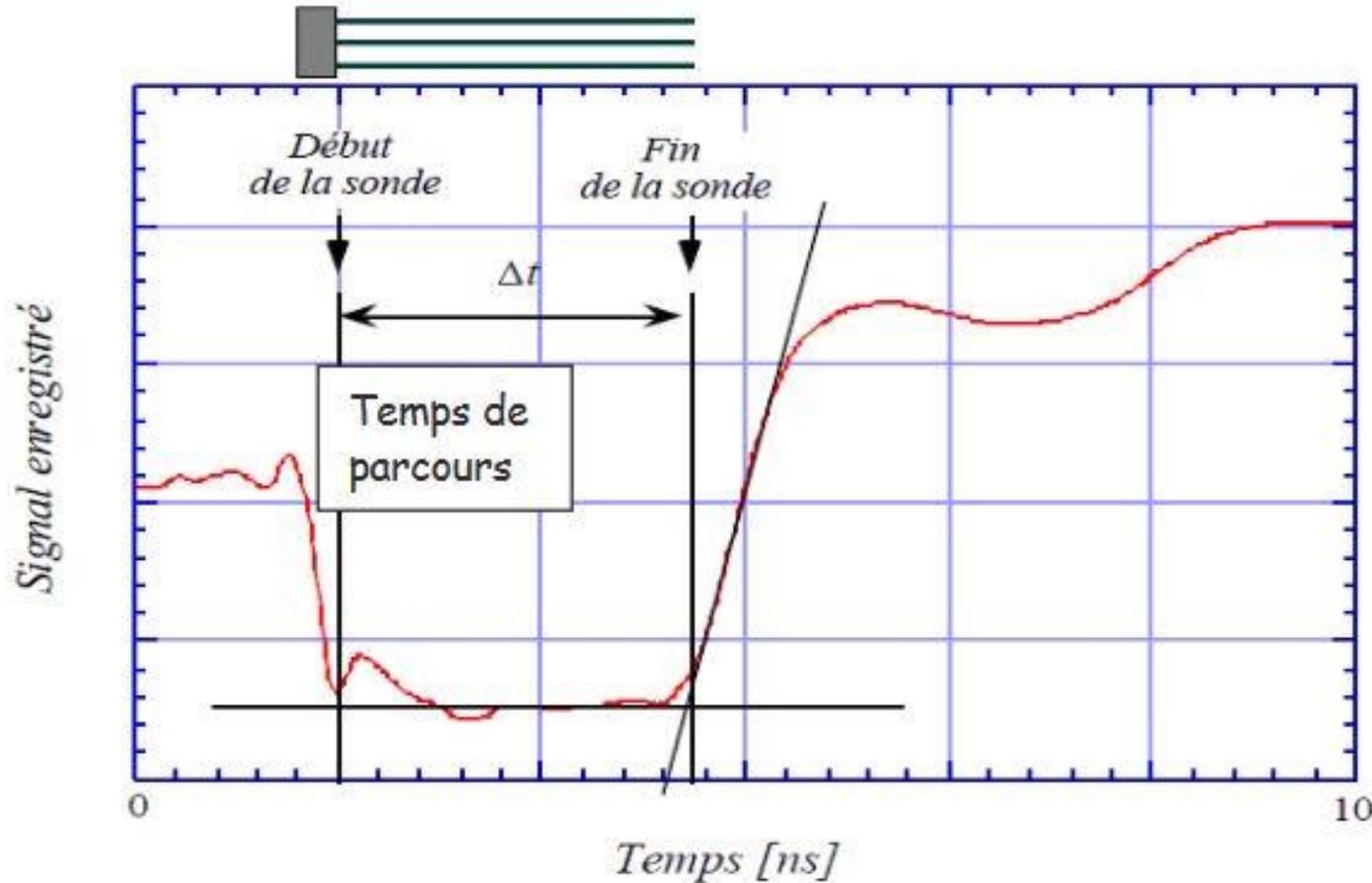


Time Domain Reflectometry  
⇒ Mesure de la permittivité diélectrique ( $K_a$ )



- Introduction d'un guide d'onde dans le sol
- Envoi d'une impulsion électrique
- Enregistrement de la tension réfléchie
- Traitement du signal =>  $K_a$

# Sondes TDR

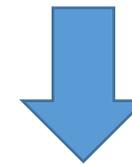


Mesure du temps de transit (nS)



Mesure de la constante diélectrique ( $K_a$ )

$$K_a = \left[ \frac{c \times t}{2 \times L} \right]^2$$

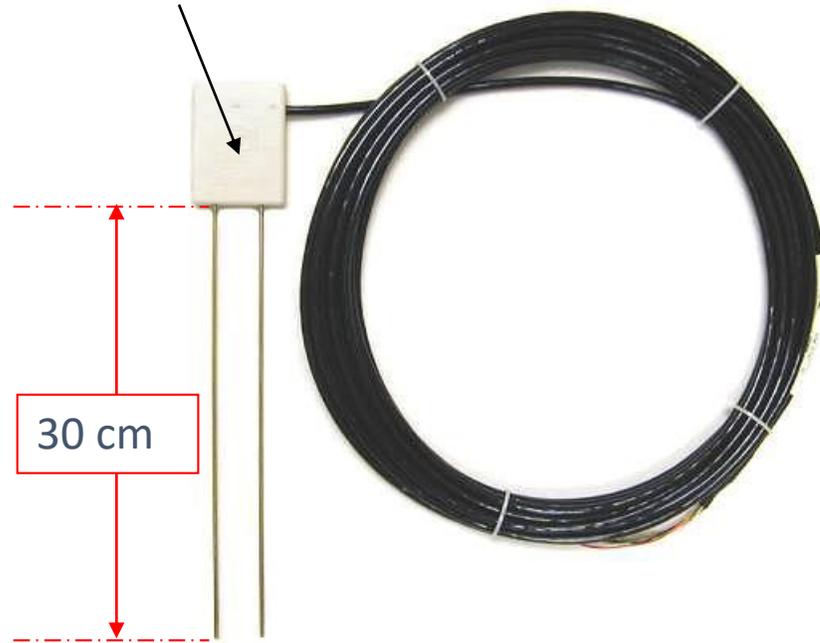


Détermination de la teneur en eau volumique  $\theta$  ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ )  
Relation empirique de Topp  
 $\theta = f(K_a)$

# Sondes FDR

Frequency Domain Reflectometry  
Sondes capacitives

Oscillateur  
( $\approx 100$  MHz)



Former un condensateur avec le sol  
Déterminer une relation d'ajustage pour en déduire la teneur en eau volumique  
Facilement automatisables et multiplexables  
Rapport qualité prix attractif  
Multitudes de modèles et de géométries

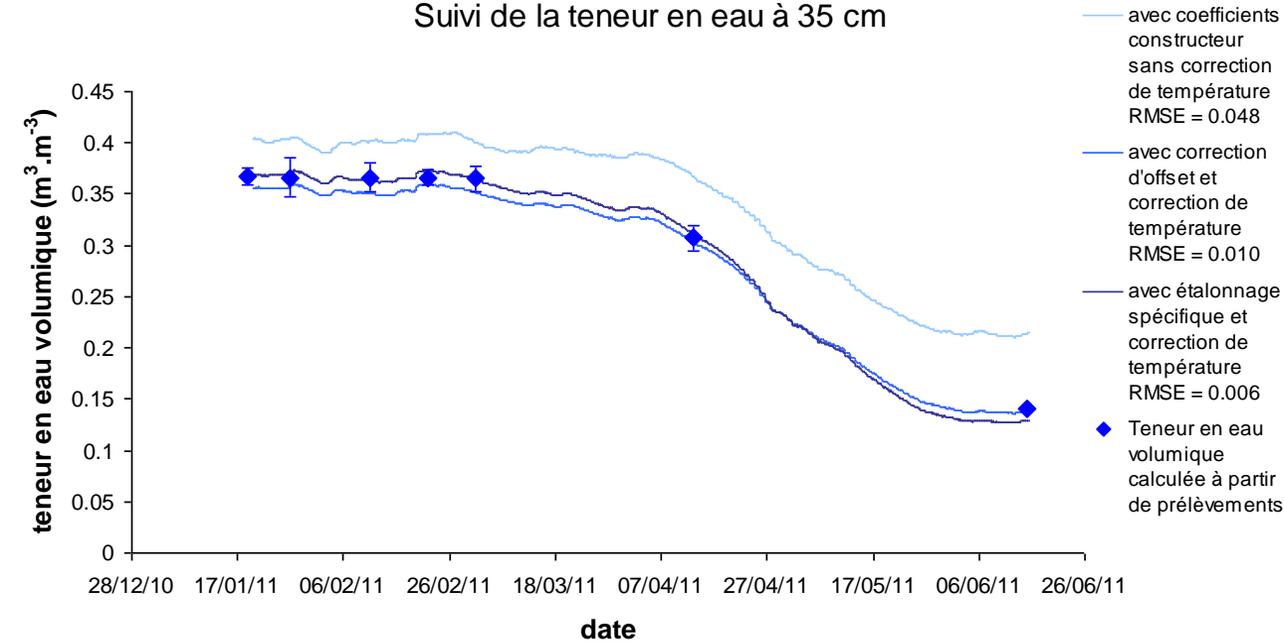


- Diversité et qualité des capteurs existants
- Nombreux facteurs d'influence (température, texture, masse volumique...)



# Sondes FDR

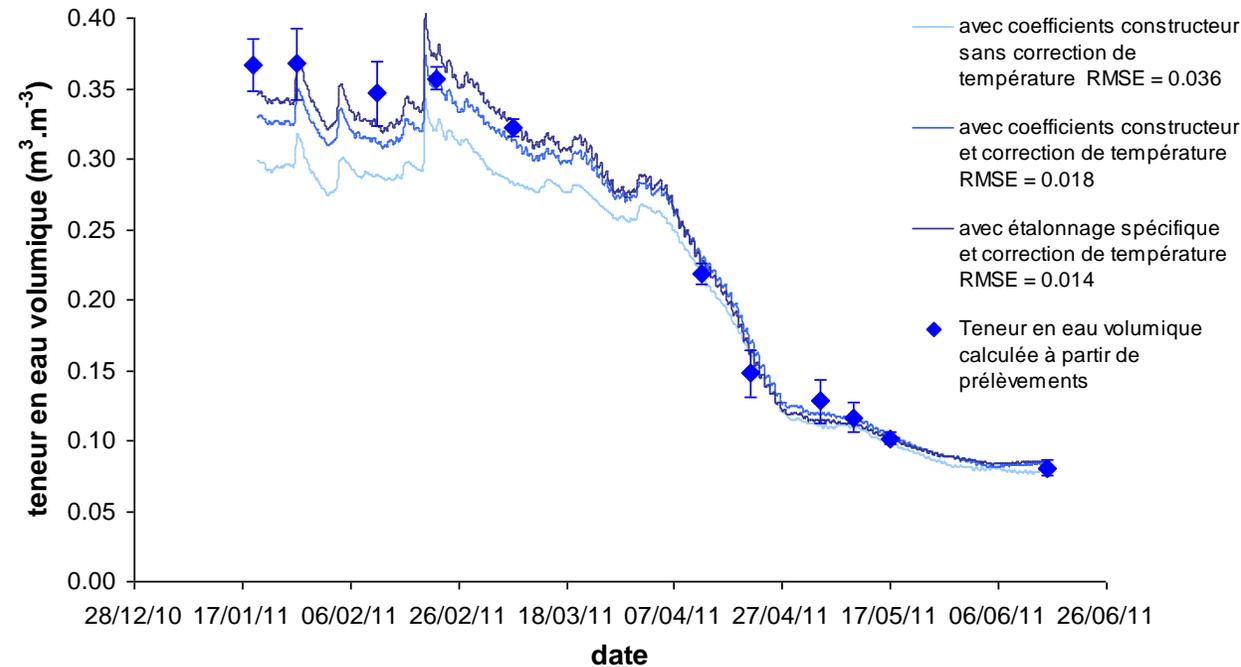
Suivi de la teneur en eau à 35 cm



- Nécessité d'une correction de l'effet de la température
- Ajustement d'un modèle empirique à partir des prélèvements gravimétriques effectués *in situ* au cours de la saison culturale

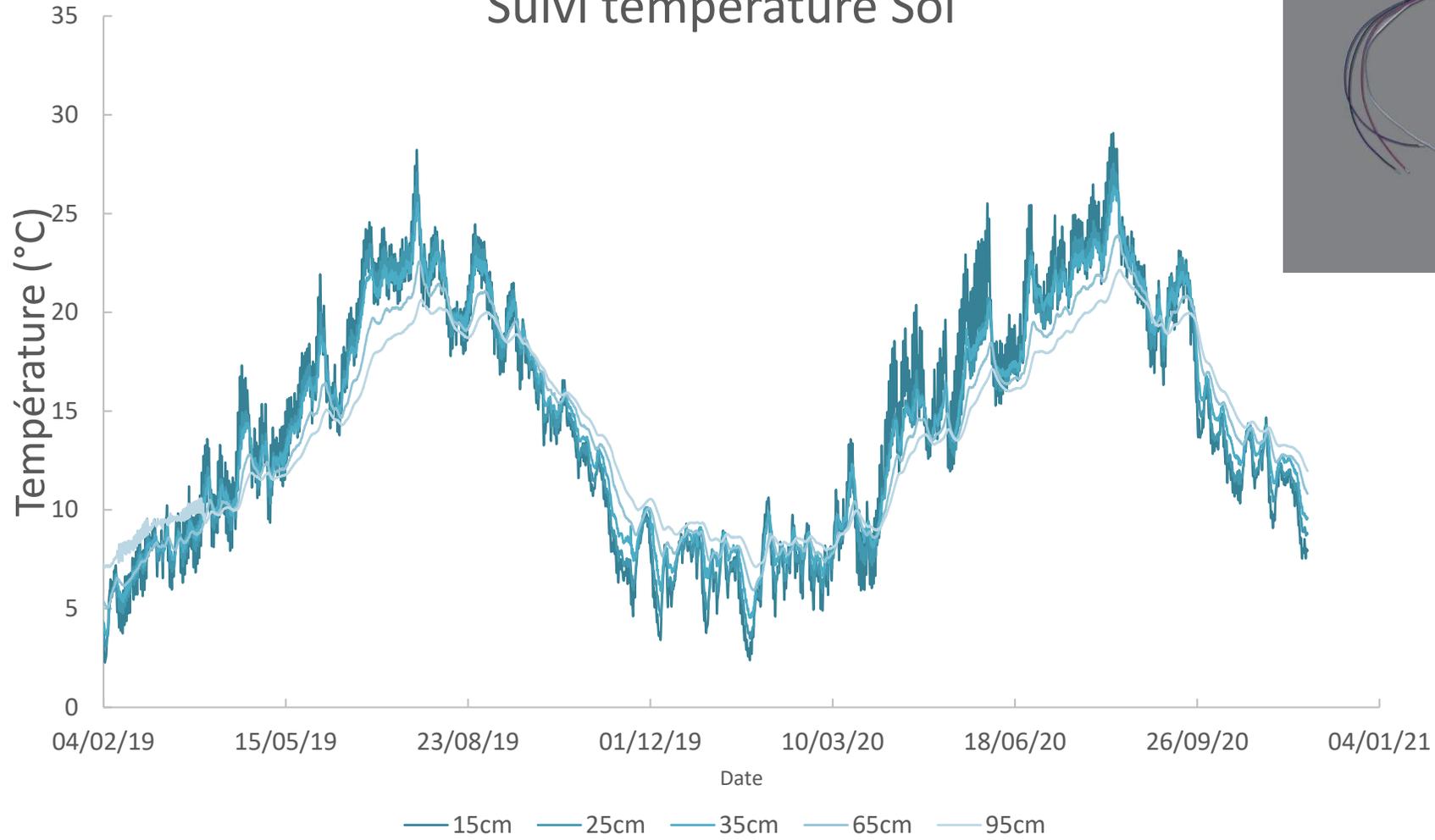
Chroniques de teneur en eau volumique à partir de réflectomètre CS616 connectées à une centrale d'acquisition CR1000

Suivi de la teneur en eau volumique à 15 cm



# Sondes de température

## Suivi température Sol



- Thermistance pour le monitoring de la température du sol
- Interfaçage avec les centrales d'acquisition Campbell pour suivi temporel
- Profils de température

# Tensiomètres

Le tensiomètre mesure le potentiel matriciel : l'énergie avec laquelle l'eau est retenue par le sol. Plus le sol se dessèche et plus la pression de l'eau (ou succion) est élevée.

La succion est en relation directe avec les transferts et la physiologie des végétaux.

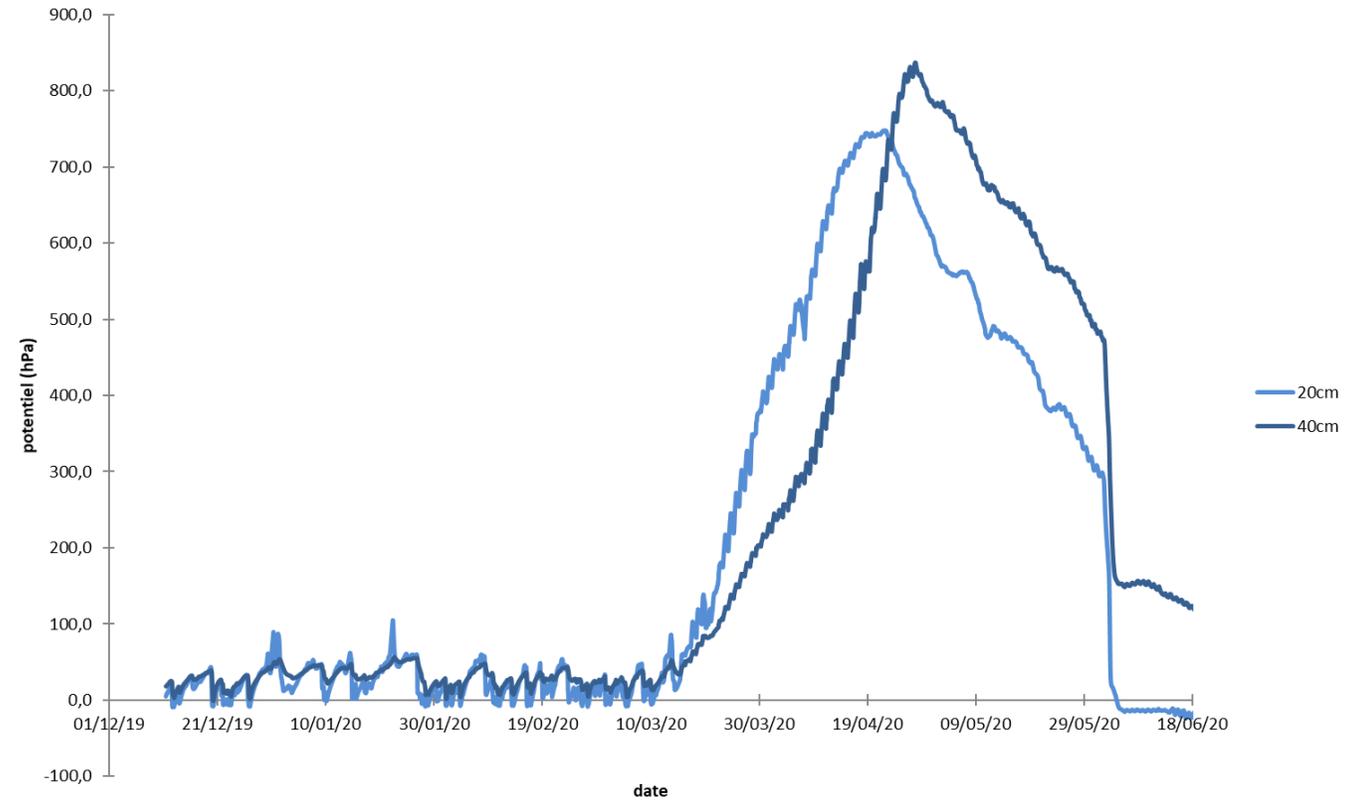
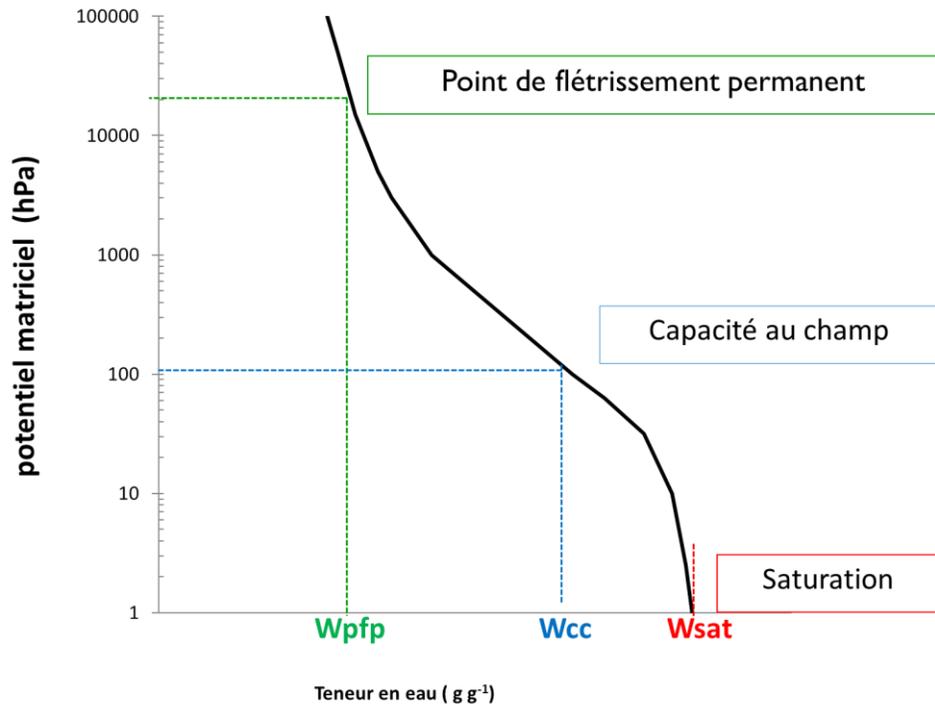
Mesure très sensible au type de milieu et à son degré de saturation.

Les tensiomètres associés à des capteurs de pression (et centrale d'acquisition) peuvent délivrer des mesures en continu.

Inconvénients : gamme limitée de 0 à -80 kPa



# Tensiomètres



Mesure indirecte de la succion  
Capteur Watermark : large gamme  
de mesure mais faible précision

*Relation entre le potentiel matriciel et l'état hydrique du sol*

# *Rhizotron*



**28 octobre**



**7 novembre**

00:00:00

5 cm