

Etat hydrique des sols: quels outils ?

Claude Doussan

INRA – UMR 1114 EMMAH, INRA/UAPV, AVIGNON, France



Environnement **M**éditerranéen et
Modélisation des **A**gro-**H**ydrosystèmes



Etat hydrique des sols: C'est quoi la question ?

1/ Quel est l'objectif et la précision souhaitée:

- Quantifier un stock d'eau ?
- Localiser et quantifier l'eau dans le sol (sur un profil, répartition à l'échelle de la parcelle) ?
- Suivre des variations dans le temps (e.g régulation système irrigation) ?
- Analyser des processus (e.g absorption hydrique, écoulement préférentiel) ?

2/ Etat hydrique d'un sol = 2 variables d'état

⇒ potentiel hydrique (état de liaison de l'eau avec le sol – bars, Mpa, m CE)

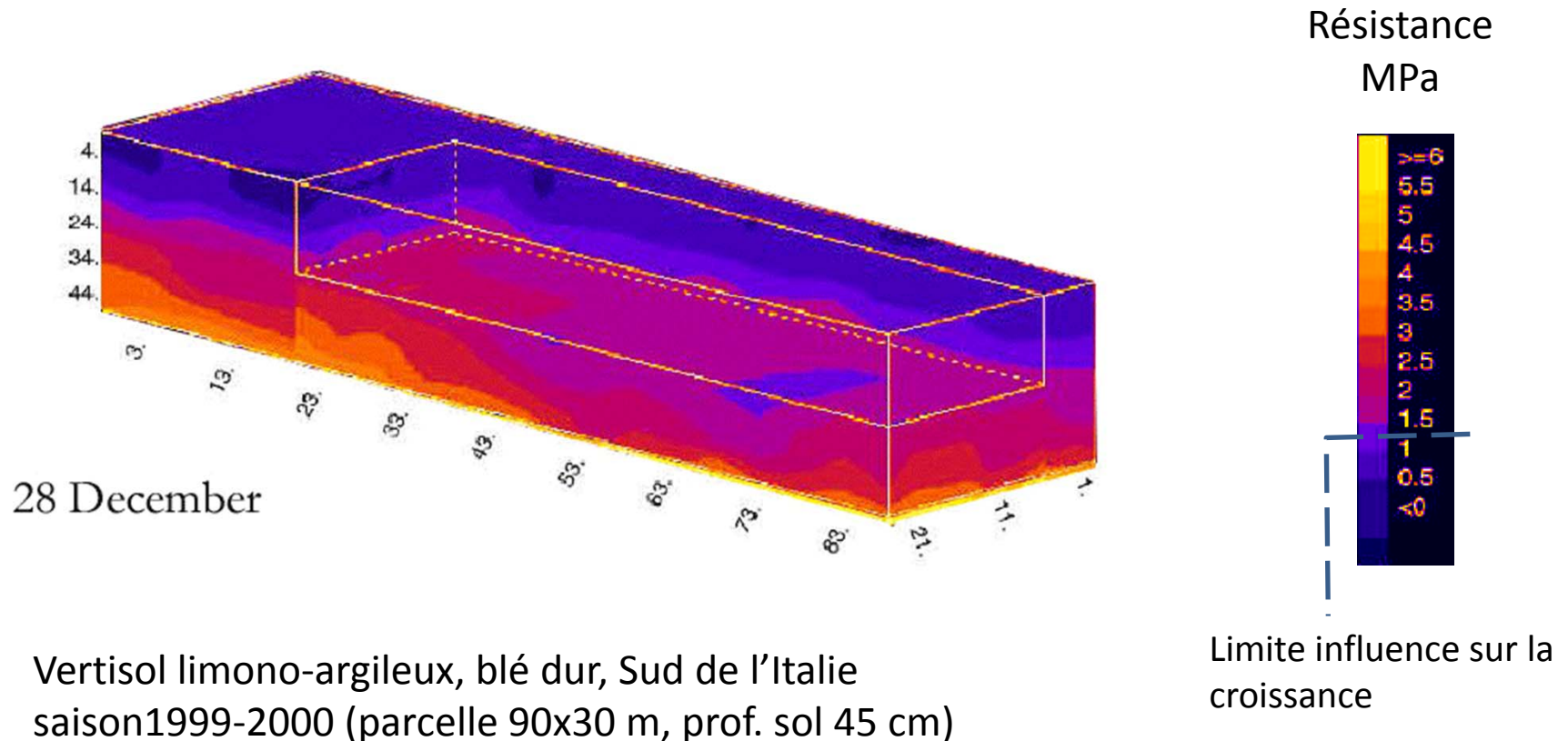
⇒ Humidité volumique (Volume eau/ Volume sol)

3/ Le sol est hétérogène dans l'espace et le temps :

Structure, propriétés physique, chimie. L'hétérogénéité existe à toutes les échelles.

Hétérogénéité physique du sol

Variabilité spatio-temporelle de la *résistance à la pénétration*



Castrignano et al. (2002) Soil, Till. Res. 65, 95-108

A vertical bar on the left side of the slide with a color gradient from light pink at the top to orange at the bottom.

Développements actuels sur caractérisation de l'état hydrique des sols et analyses des processus... en laboratoire

Actuellement, développement “rapide” de méthodes d'imagerie non-invasive pouvant suivre l'eau et/ou les racines dans du sol ...

... from the lab :

- X-Rays radiography and Computer assisted tomography (CT)
- Magnetic Resonance Imaging (MRI)
- Neutron radiography & CT
- Light transmission Imaging

... to the field :

- Electrical resistivity tomography (ERT)
- GPR*

Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

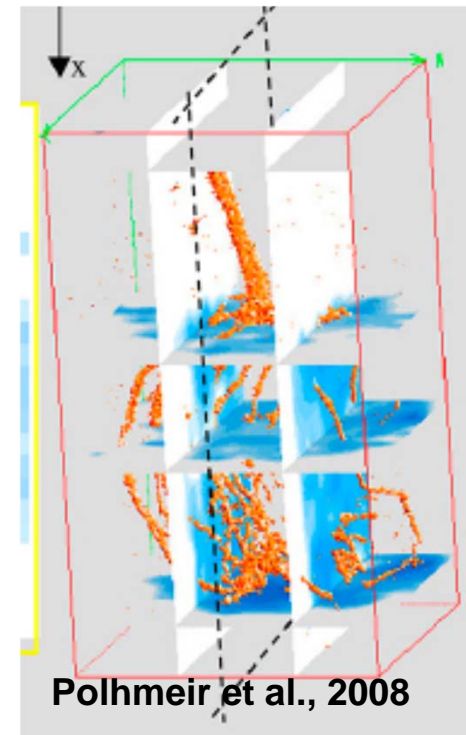
Magnetic resonance Imaging

H Spin relaxation in a magnetic field

Roots of Pinus and water content



Roots of Ricinus and water content





Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

Magnetic resonance Imaging

Positive points :

Highly sensitive to water (sensing H quantity)

Negative points :

Resolution => small samples

Pb with aimantation of soil solids (Fe)

Scanning time for 3D

Low Accessibilty ? Price ?

Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

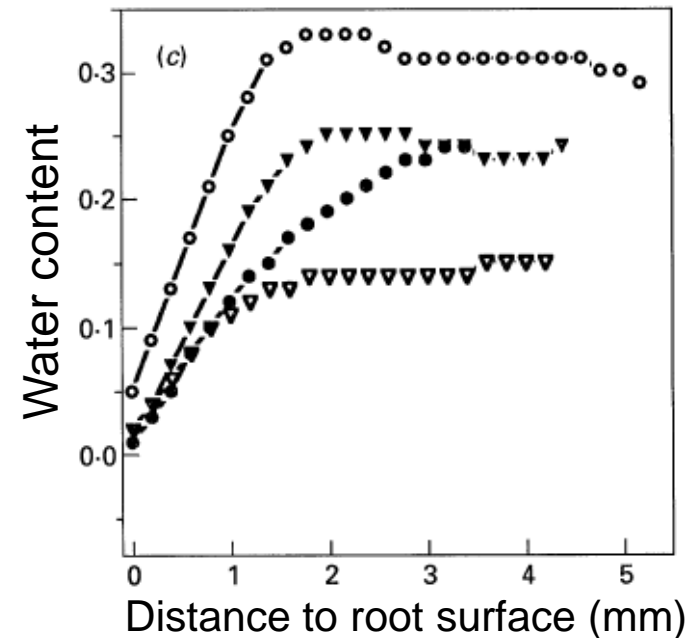
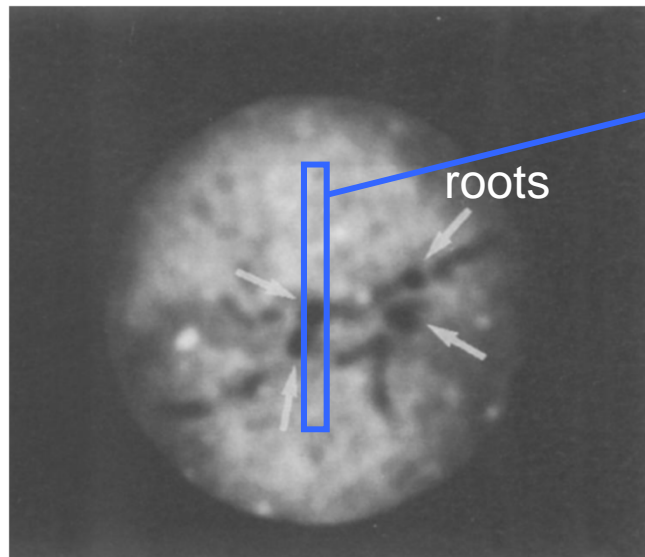
X-Rays radiography and Computer assisted tomography



- Pionnering work of Aylmore (80s')
- Now increase in resolution and scanning time

Water content profile in rhizosphere

Soil slice imaged with wheat roots

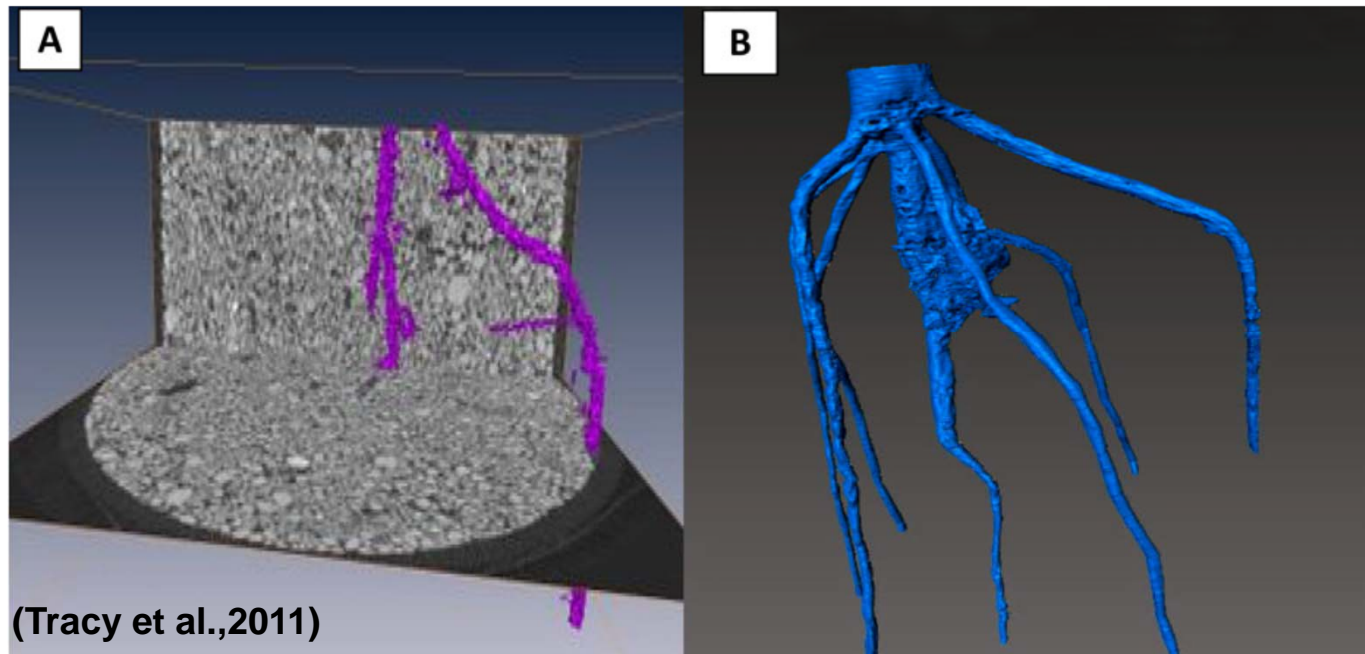


Goose et al., 1996

Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

X-Rays radiography and Computer assisted tomography

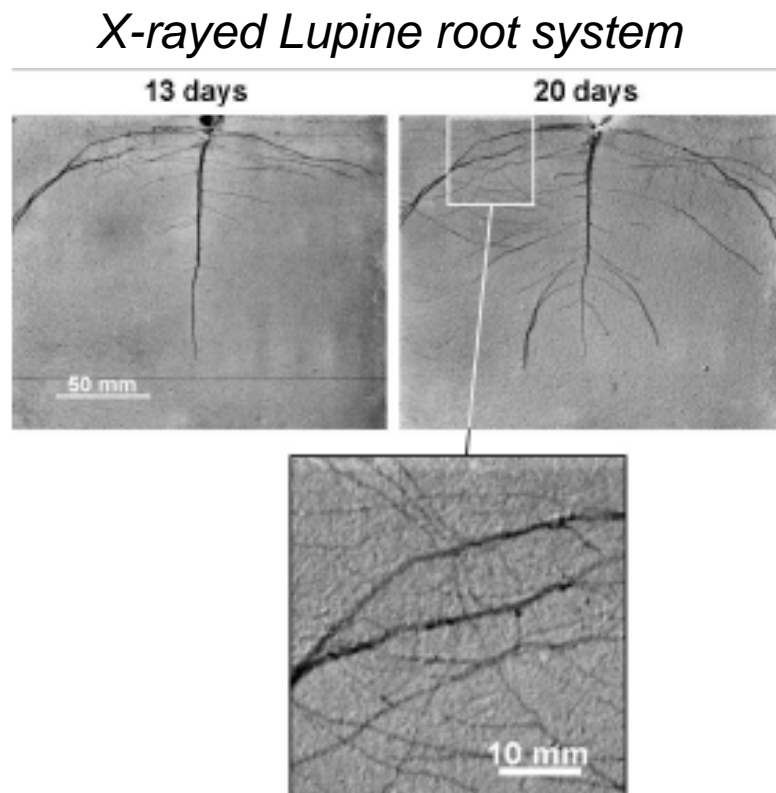
Possibility to image 3D roots (not straightforward)



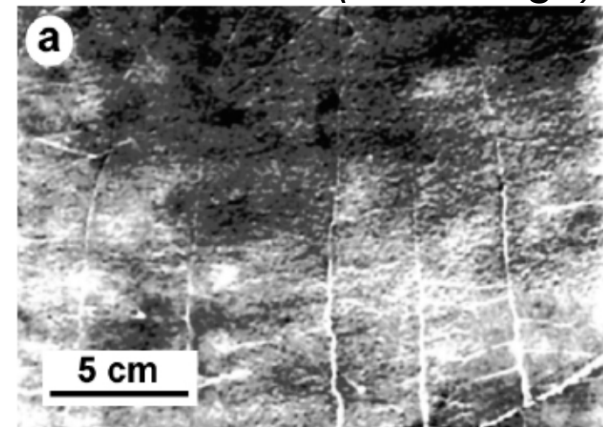
Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

X-Rays radiography and Computer assisted tomography

Possibility to use X-ray radiography for 2D soil rhizotrons (increased resolution)



X-rayed Lupine root system water content variation (black=high)



(Pierret et al., 2003)

But low sensitivity to water content variation ($>0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) at that time (better now)



Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

X-Rays radiography and Computer assisted tomography

Positive points :

Now increase in resolution and decreasing scanning time

More and more used at various scales (but resolution/length compromise)

Possible to image roots

Negative points :

Scanning time for 3D

Relationship water content – X-ray not always good (signal/noise)
and bulk density variation influence

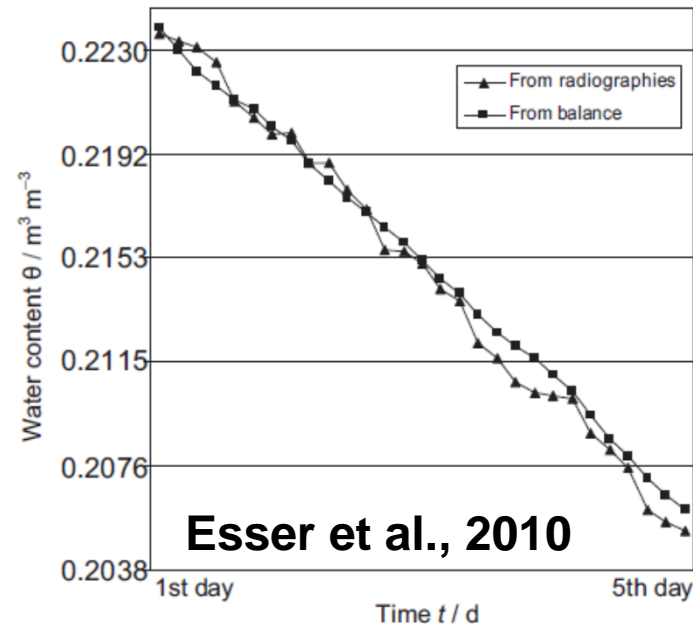
Accessibility (increasing) ? Price (decreasing) ?

Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

Neutron radiography and Computer assisted tomography

- Exposure to neutron beam (like neutron probe for soil)
- High sensitivity to water content (and H atoms)

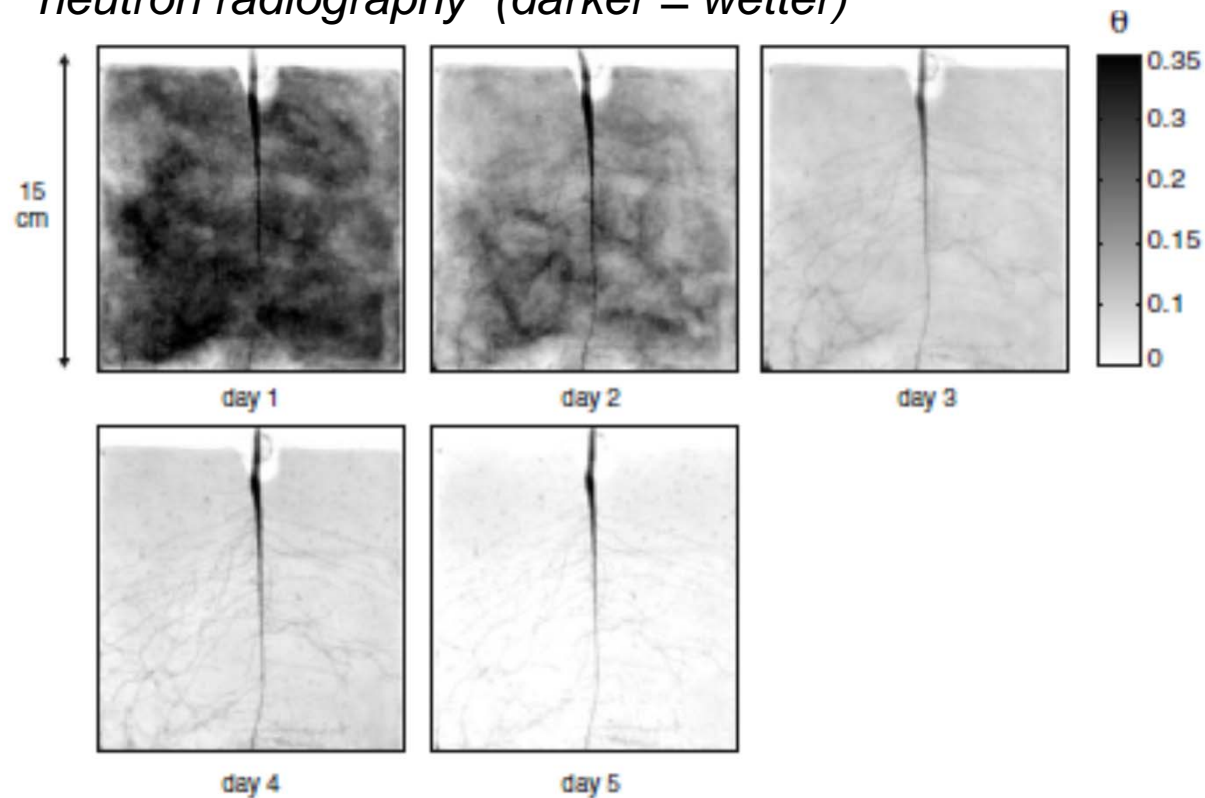
Comparison between gravimetric water content and neutron radiography for a rhizotron



Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

Neutron radiography and Computer assisted tomography

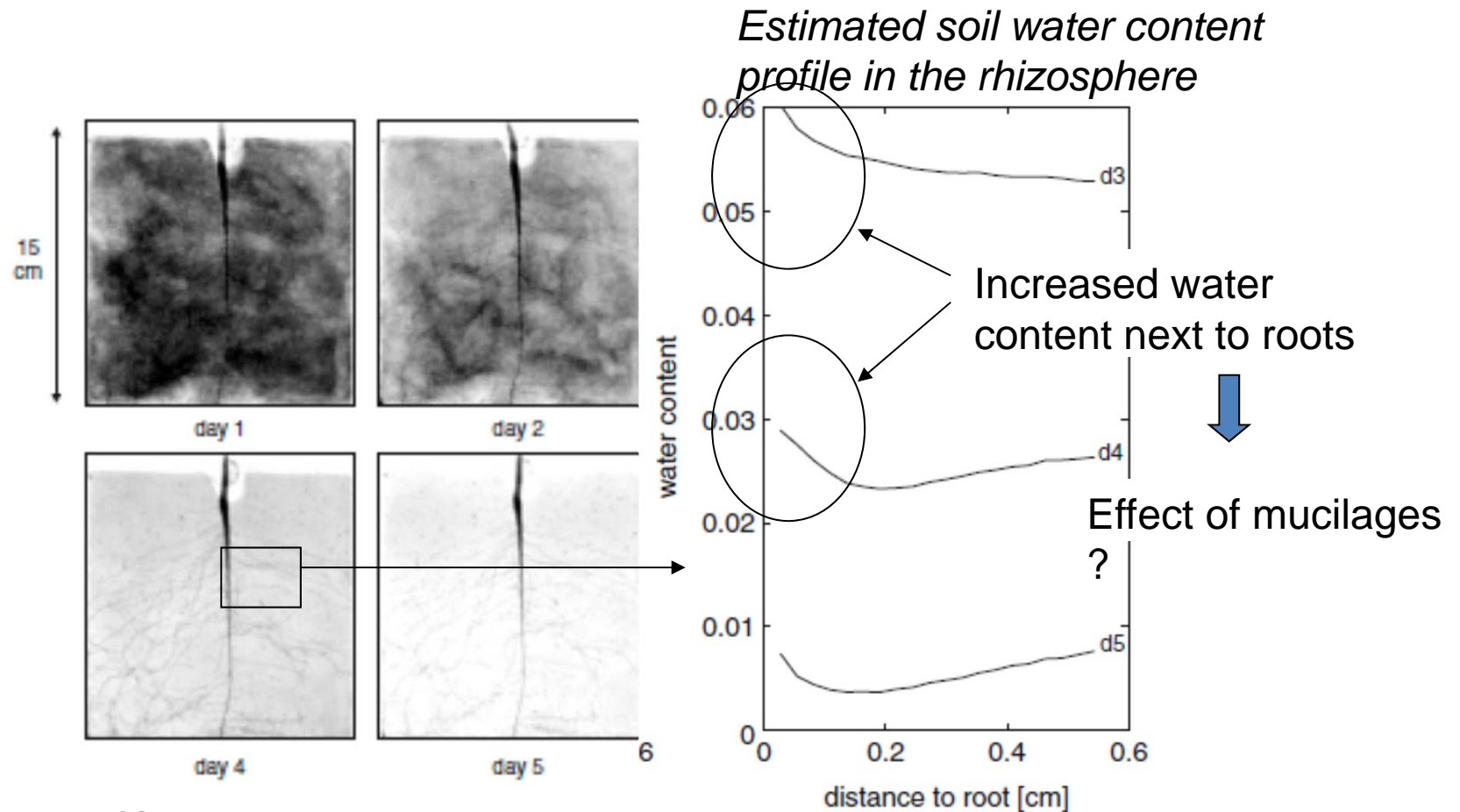
Soil drying by lupine in rhizotron during 5 days imaged by neutron radiography (darker = wetter)



(Carminati et al.,
2010)

Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

Neutron radiography and Computer assisted tomography



(Carminati et al., 2010)

A vertical decorative bar on the left side of the slide, featuring a gradient from light pink at the top to orange at the bottom.

Quick overview of imaging methods for water and roots in soils

Neutron radiography and Computer assisted tomography

Positive points :

- High sensitivity to water content

- Roots and water imaging

Negative points :

- Rather small root box (~20 cm)

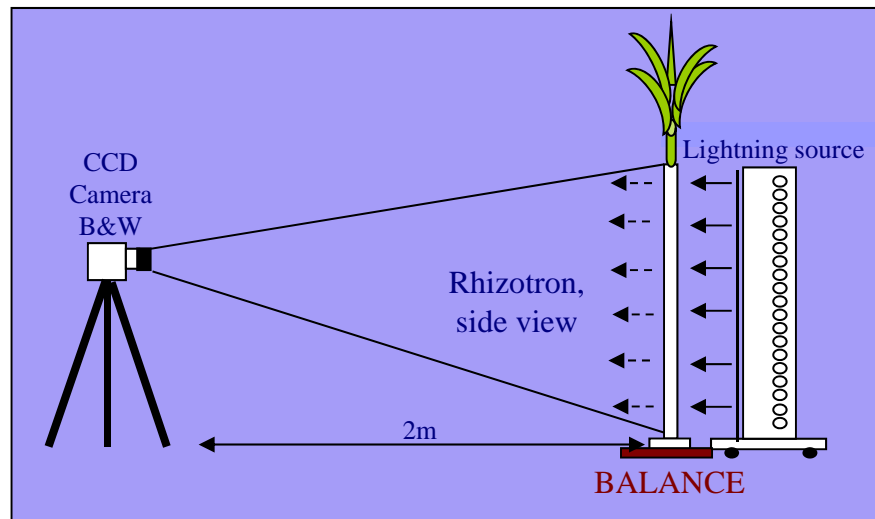
- Accessibilty ? => Paul Scherrer Institute (CH)

Light transmission imaging of root zone water content

Light transmission increases with water content in a sandy medium

(matching of refraction index between sand and water)

Rooting medium = rhizotron filled with sand + clay



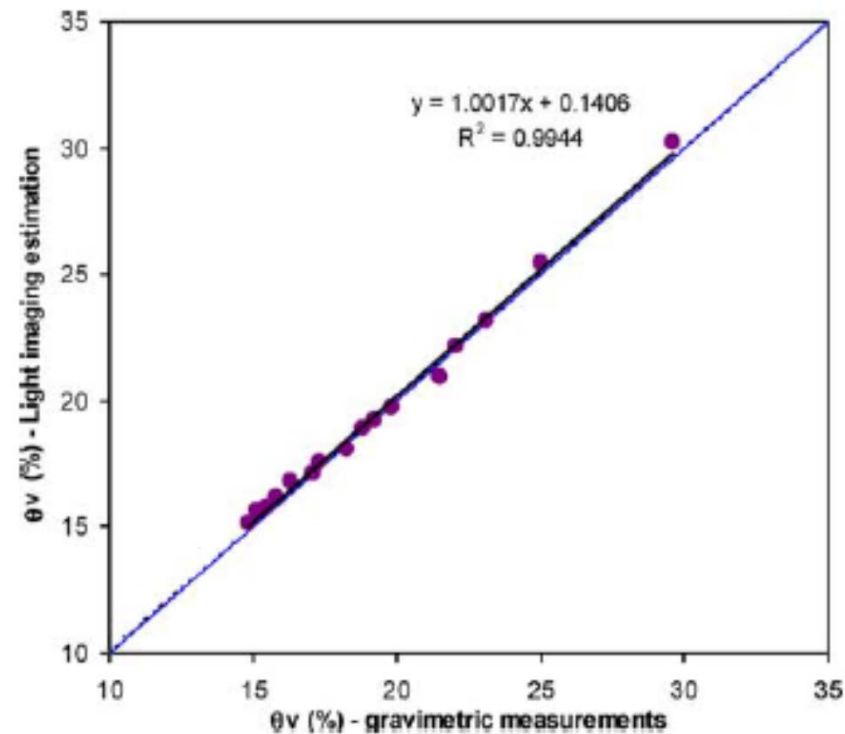
Experimental setup



Light transmission imaging of root zone water content

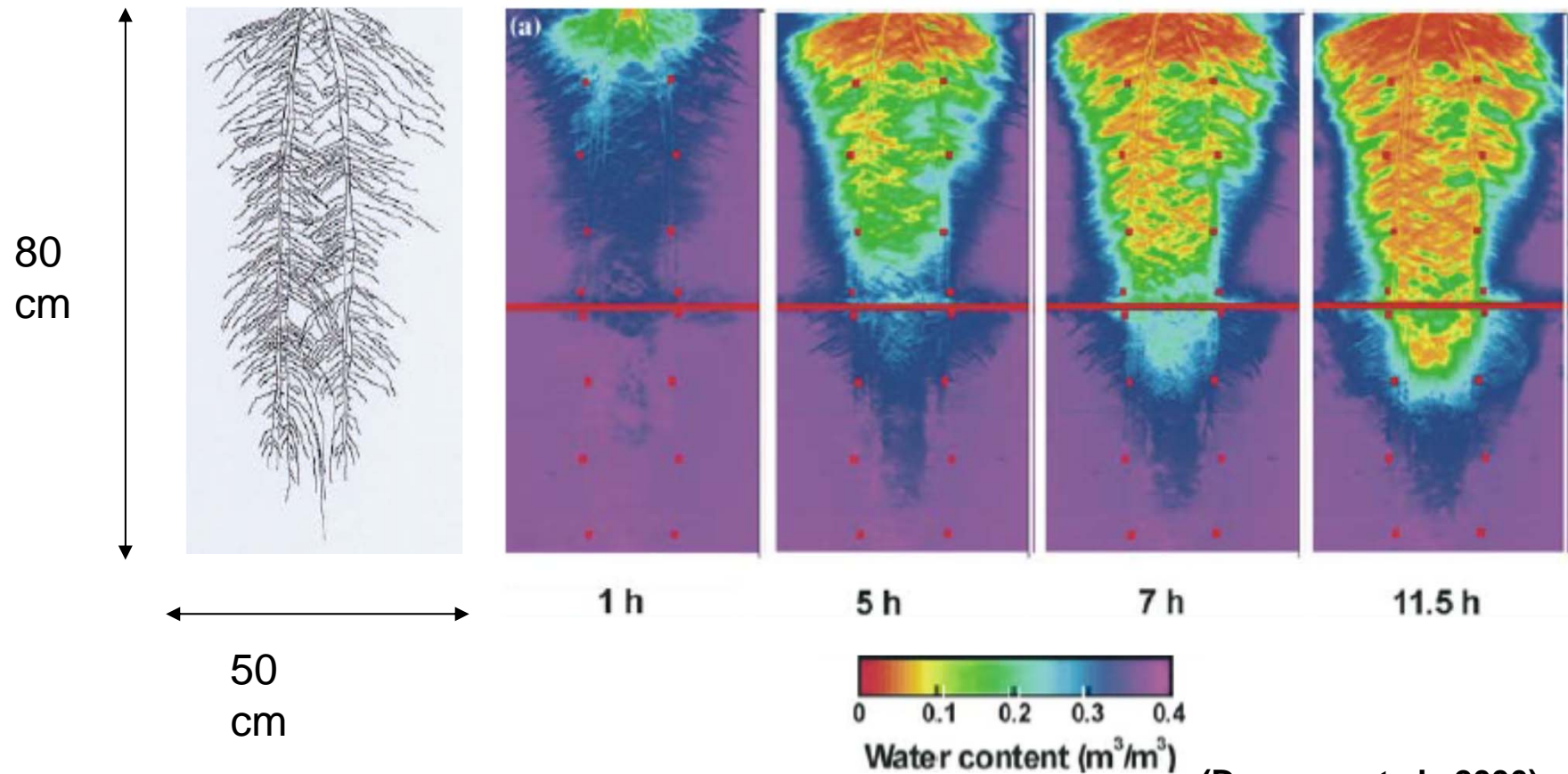
Good sensitivity to water content

Relationship between water content measured by gravimetric method and light imaging on the whole rhizotron



Light transmission imaging of root zone water content

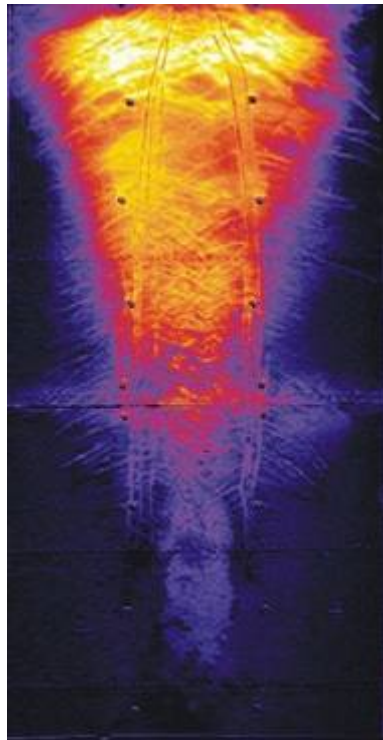
Imaging of water uptake with time of a Lupine in a rhizotron box : water uptake front with time



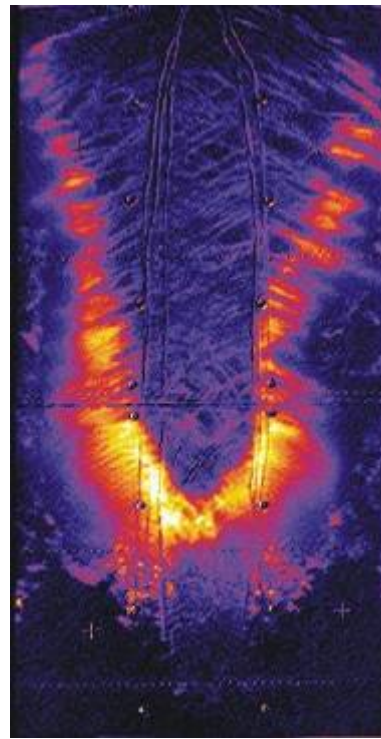
(Doussan et al., 2006)

Water uptake of Lupin (light transmission - Image differences)

Image difference = zones of water uptake

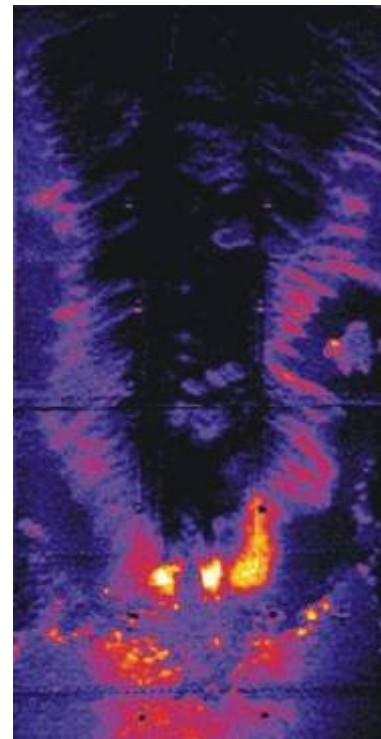


Day 1



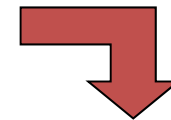
Day 2

(8:30 - 13:00)



Day 3

Zones of warmer colors correspond to zones of higher uptake



Downwards and laterally expanding uptake front

(Lupin: artificially fibrous root system)



Ligth transmission Imaging :

Positive points :

- Easily accessible and relatively cheap
- High sensitivity to water content
- Possibility of high resolution CCD camera
- Fast imaging

Negative points :

- Thin 2D rhizobox
- Only sand + (specific) clay medium => specific soil properties
- Soil can rapidly limit water transfer

A vertical bar on the left side of the slide with a color gradient from light pink at the top to orange at the bottom.

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Des techniques de références, toujours en usage : prélèvement / gravimétrie ; sonde neutron, tensiométrie

aux techniques en expansion : mesures à base électromagnétique (TDR, sondes capacitatives), blocs gypse...

Vers l'imagerie : mesures à base de résistivité électrique (Tomographie électrique) ou électromagnétique (GPR)

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques de références et traditionnelles (teneur en eau)

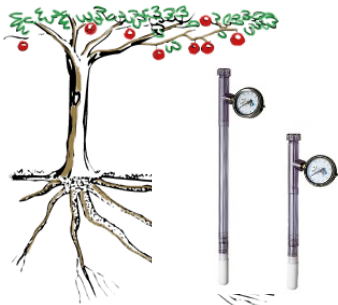


Gravimétrie: prélèvement manuel + mesure poids humide / sec à 105°C. **Référence**. Nécessité mesure **masse volumique**.



Sonde Neutron: nécessité étalonnage gravimétrique suivant horizons. Volume mesure: R mesure ~20-30 cm. Précision: 0,01-0,02 m³/m³.
mais **Habilitation spécifique IRSN et contrôles** (3 sondes dans Dept EA)

Techniques de références et traditionnelles (Potentiel hydrique)



Tensiomètre: bougie poreuse+ eau+manomètre: gamme limitée : 0 à -0.7 bars.

A vertical bar on the left side of the slide with a gradient from light pink at the top to orange at the bottom.

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques de références et traditionnelles : problèmes

- Données **ponctuelles** dans le temps (et l'espace).
- La gravimétrie est une méthode **destructive**.
- La tensiométrie classique est **limitée en gamme** et en conditions opérationnelles, risque de pollution par le mercure.
- Usage de la sonde à neutrons très réglementé, risque par rapport à la radioactivité, coût reprise/recyclage.
- Temps, délais, pénibilité, main d'œuvre...

A vertical decorative bar on the left side of the slide, featuring a gradient from light pink at the top to orange at the bottom.

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

Basées sur des mesures de paramètres électromagnétiques:

- permittivité diélectrique (haute fréquence) => Teneur en eau
- résistivité électrique (basse fréquence) => potentiel hydrique

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

Teneur en eau :

Lié à la mesure permittivité diélectrique (K_a), qui représente l'interaction entre onde EM et charge/dipôles (polarisabilité) du milieu.

$K_a \sim \text{Vitesse Onde EM dans le milieu} / \text{Vitesse Onde EM dans le vide}$.

Milieu	K_a
Air	1.
Minéraux	2 – 4
Eau	80

Fort contraste de K_a entre eau et reste constituants du sol => relation teneur en eau K_a (ex.: Sol sec: $K_a \sim 4$; Sol 25% humidité $K_a \sim 11-12$)

Certains espoirs en une relation teneur en eau - K_a universelle (eg Topp)... ?

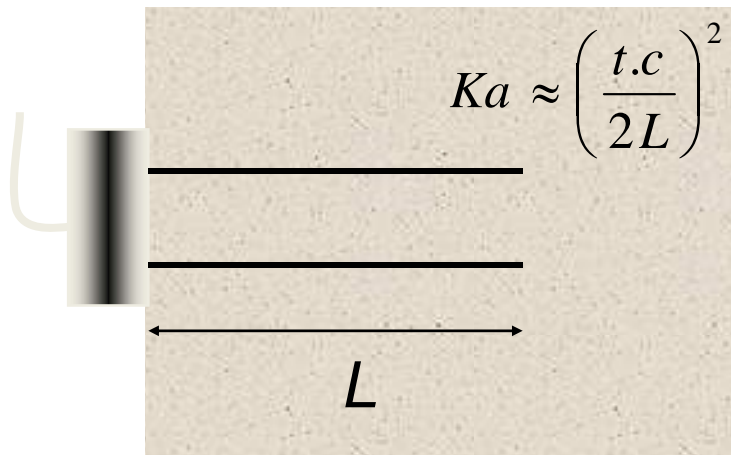
Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

Teneur en eau : principes mesure

Méthodes temporelles (TDR):

Mesure **du temps de propagation** d'un pulse de tension ($\sim 1.5 \times 10^{-10}$ s) le long d'un guide d'onde inséré dans le sol => permittivité diélectrique (K_a)



$L = 6$ à 30 cm ou plus...



Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

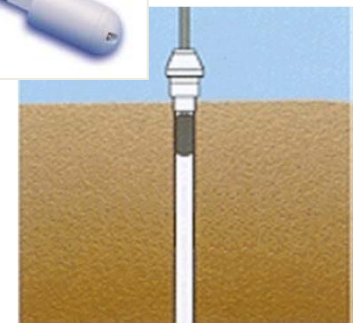
Teneur en eau : principes mesure

Méthodes capacitives (sondes capacitives):

Mesure **de la capacité (C)** formée par le sol entre 2 conducteurs (f=Mhz) :

$$C = A.Ka$$

ou A est un facteur de forme ne dépendant que de la géométrie de mesure



Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

Teneur en eau par mesure diélectrique : bilan

Les + :

- Caractère opérationnel
- Disponibilité d'instruments adaptés + acquisition / transmission info = plug and play
- Mesure ponctuelles (surface ou dans une fosse) ou profils (tubes)
- Monitoring temporel pouvant être très fin (e.g. toutes les 10 minutes).
- Capteurs capacitifs= assez peu chers

Les - :

- Volume de mesure très faible (mesure neutron $R \sim 25$ cm, mesure diélectrique $R < 2$ cm) ! => Forte influence hétérogénéités locales (cailloux, structure sol...)
- Résultats mesure sensibles à la pose matériel: qlques mm d'air font chuter la réponse de $\sim 50\%$ => Pb sols à retrait ou caillouteux !
- Capteurs capacitifs plus « variables » que TDR: guide d'onde => plus grand volume de mesure, volume mesure mieux contraint
- TDR= cher
- Nécessité étalonnage (relation de Topp pas universelle...), influence température et salinité sur signal..

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

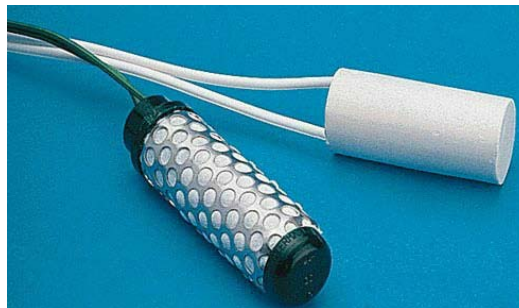
Techniques en expansion

Potentiel hydrique : principes mesure

Méthodes suivi résistivité milieu granulaire + gypse

Mesure **de la résistivité** (ou permittivité) d'un milieu poreux connu en équilibre avec en équilibre hydrique avec le sol (Etalonnage resistivité-potentiel hydrique).

Gammes variable : 0-1.5 bar (e.g. WaterMark); 1.5 - 6 bars (bloc gypse).



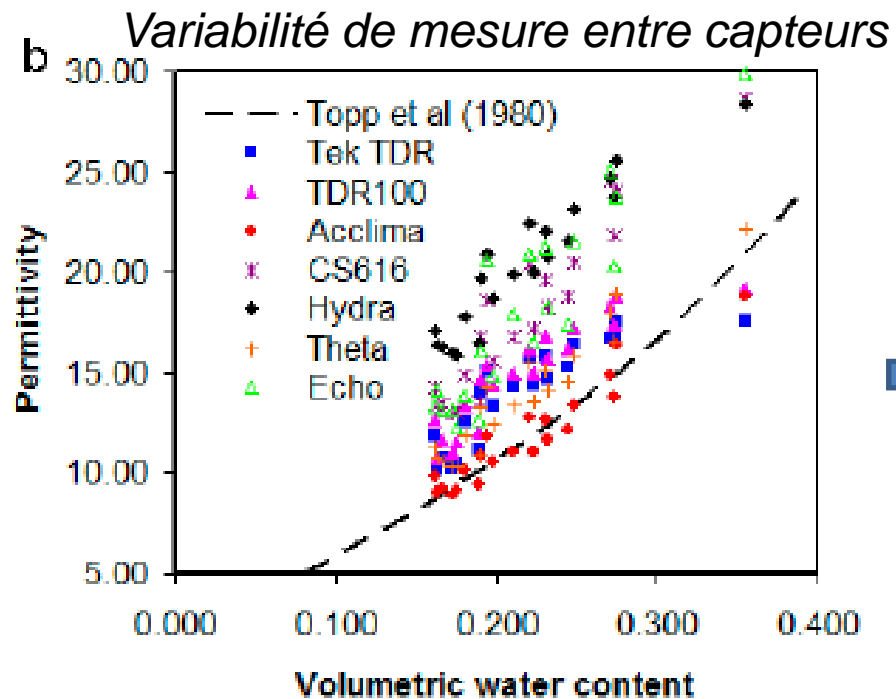
Les +: Peu cher, monitoring, abandonnable...

Les -: Peut être peu précis (0.1 à 0.5 bars), dérive dans le temps possible, temps de mise équilibre hydrique pouvant être long.

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

Teneur en eau par mesure diélectrique : exemples



Erreur d'étalonnage

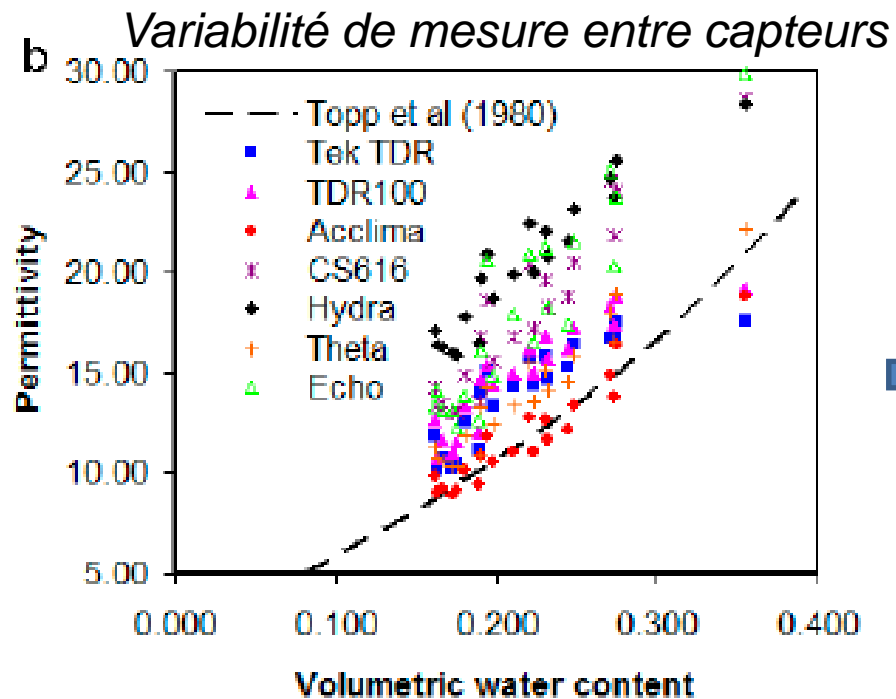
Sensor	RMSE after offset adjustment	Offset error	Water content range	Soil type
<hr/>				
<hr/>				
<hr/>				
Acclima	± 0.014	0.002	0.17–0.36	Silt loam
Theta	± 0.017	0.056	0.17–0.36	Silt loam
TDR100	± 0.022	0.081	0.17–0.36	Silt loam
Hydra	± 0.024	0.194	0.17–0.36	Silt loam
Tektronix TDR	± 0.025	0.060	0.17–0.36	Silt loam
CS-616	± 0.031	0.140	0.17–0.36	Silt loam
ECH ₂ O EC-20	± 0.041	0.136	0.17–0.36	Silt loam
Enviroscan	± 0.027	–	0–0.4	
Enviroscan	± 0.026	–	0–0.4	
Enviroscan (FC)†	± 0.05	–	~0.40	

† FC, factory calibration;

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

Teneur en eau par mesure diélectrique : exemples



Erreur d'étalonnage

Sensor	RMSE after offset adjustment	Offset error	Water content range	Soil type
<hr/>				
	<hr/>		<hr/>	
	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$			
Acclima	± 0.014	0.002	0.17–0.36	Silt loam
Theta	± 0.017	0.056	0.17–0.36	Silt loam
TDR100	± 0.022	0.081	0.17–0.36	Silt loam
Hydra	± 0.024	0.194	0.17–0.36	Silt loam
Tektronix TDR	± 0.025	0.060	0.17–0.36	Silt loam
CS-616	± 0.031	0.140	0.17–0.36	Silt loam
ECH ₂ O EC-20	± 0.041	0.136	0.17–0.36	Silt loam
Enviroscan	± 0.027	–	0–0.4	
Enviroscan	± 0.026	–	0–0.4	
Enviroscan (FC)†	± 0.05	–	~0.40	

† FC, factory calibration;

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

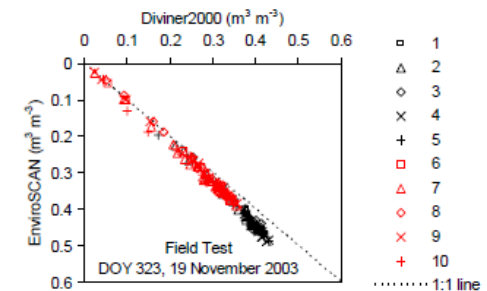
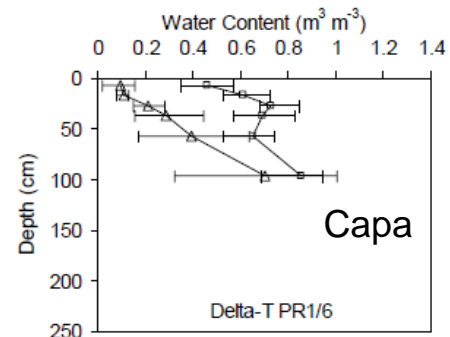
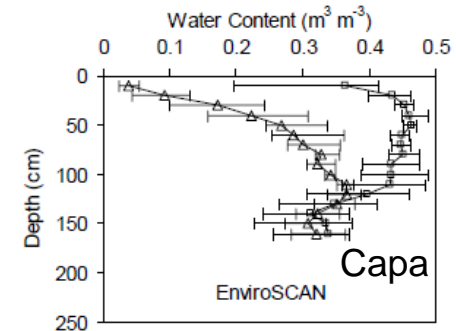
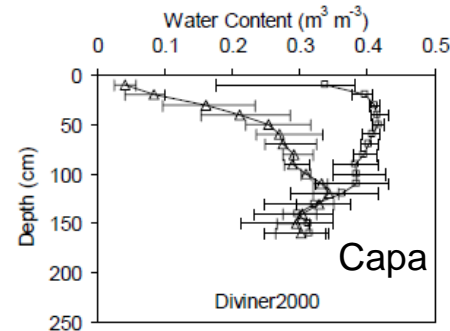
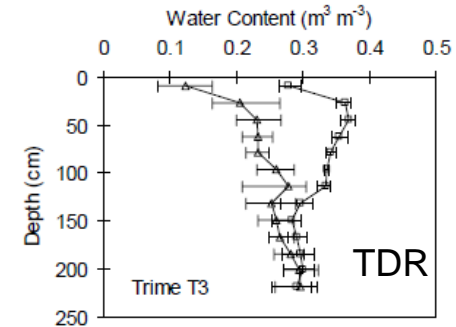
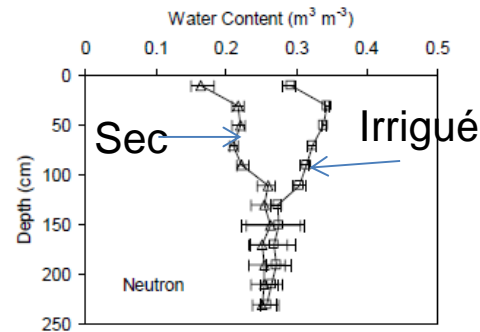
Teneur en eau par mesure diélectrique : exemples

Variabilité de mesure entre capteurs (IAEA, 2008)

- Sol cultivé sec et irrigué
- 10 tubes (profils) par traitement et capteur
- Sol limono-argileux



- forte variabilité mesure diélectriques
- mesures incohérentes avec relations calibration constructeurs (> à WFC)



Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

Techniques en expansion

Teneur en eau par mesure diélectrique : exemples

Conséquence variabilité de mesure entre capteurs: Nombre N de tubes pour estimer stock hydrique avec précision d= 0.1 ou 1 cm (IAEA, 2008)

Method	Soil condition	$\alpha =$	0.05	0.10
		$u_{\alpha/2} =$	1.96	1.64
		$d \text{ (cm)} =$	1	0.1
		S	N	N
Diviner 2000 ^a	Irrigated	1.31	6.6	464
	Dryland	2.42	22.5	1584
EnviroSCAN ^a	Irrigated	1.52	8.9	625
	Dryland	2.66	27.2	1914
Delta-T PR1/6 ^a	Irrigated	2.72	28.4	2002
	Dryland	12.16	568.0	40006
Trime T3	Irrigated	0.75	2.2	152
	Dryland	2.38	21.8	1533
Gravimetric	Irrigated	0.45	0.8	55
	Dryland	0.70	1.9	133
Neutron	Irrigated	0.15	0.1	6
	Dryland	0.27	0.3	20

^a Capacitance type sensors.

$$N = \left(\frac{u_{\alpha/2} S}{d} \right)^2$$

U= valeur loi
normale seuil α

S= ecart-type mesures

A vertical bar on the left side of the slide with a color gradient from light pink at the top to orange at the bottom.

Etat hydrique des sols: du laboratoire ... au champ

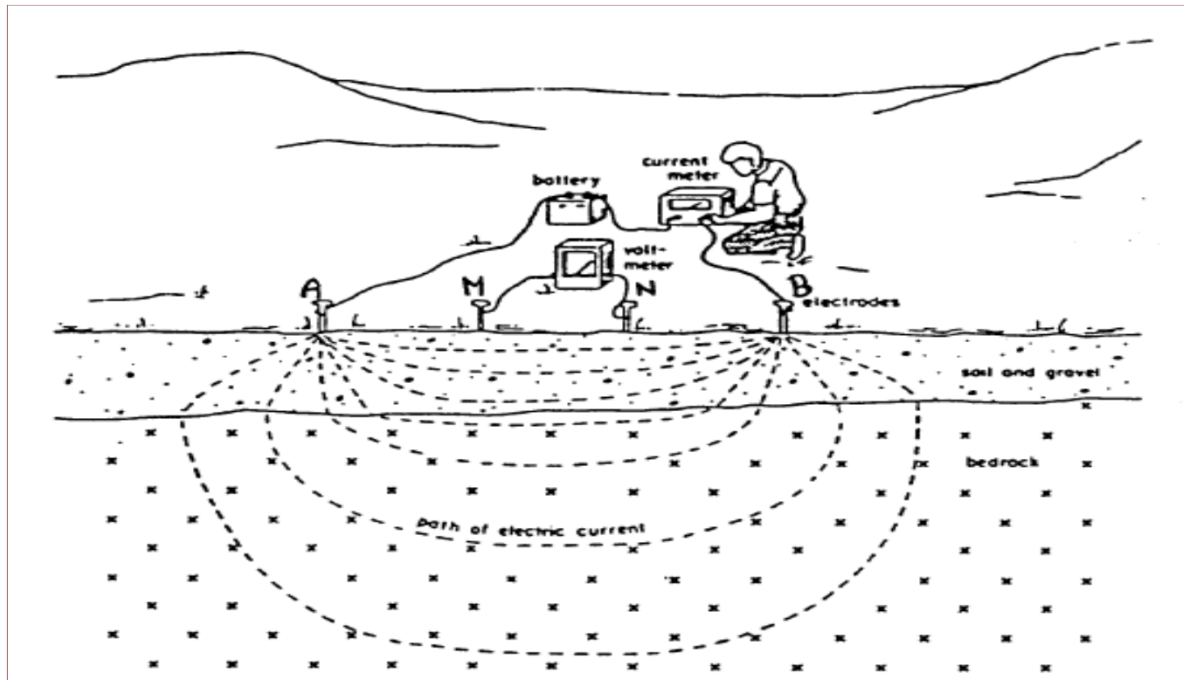
Vers l'imagerie :

mesures à base de :

- résistivité électrique (Tomographie électrique)
- ou électromagnétique (GPR – mais pas encore vraiment opérationnel...)

La tomographie de résistivité électrique

- o Méthode géophysique, utilisée dans la reconnaissance du sous-sol
- o Non destructive
- o Consiste à mesurer la résistivité électrique du sol (en injectant du courant A-B et en mesurant une différence de potentiel M-N)
- o Permet d'obtenir des images 2D ou 3D de la résistivité électrique d'un transect ou d'un volume du sol prospecté

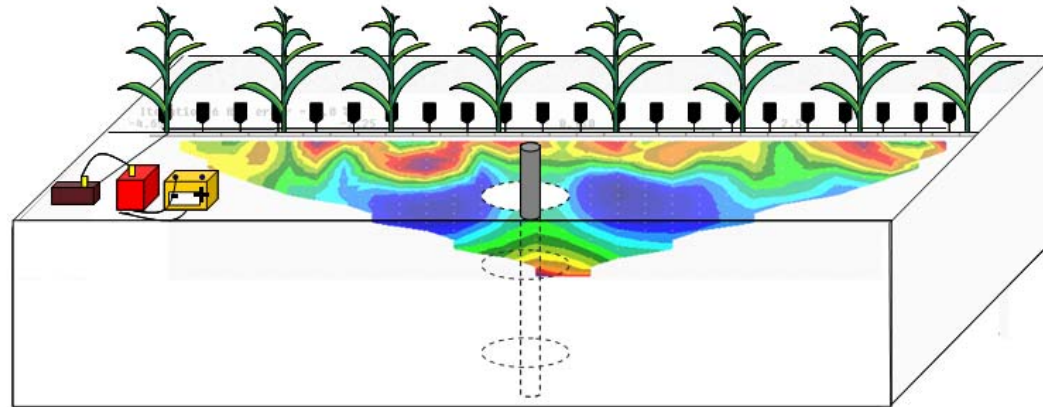


Estimation spatialisée de la teneur en eau au champ: Tomographie de Résistivité Electrique

Tomographie de résistivité électrique (ERT) : Ensemble de mesures de la résistivité électrique du sol par injections de courant et mesure de la tension résultante le long d'un réseau d'électrodes implantées dans le sol



Carte 2D de la résistivité électrique le long d'un profil de sol



➡ Les variations temporelles de la résistivité électrique sont liée à la teneur en eau (plus sec => résistivité plus forte) ➡ Variations spatiales de l'eau du sol après étalonnage

Mesure une fois par semaine.

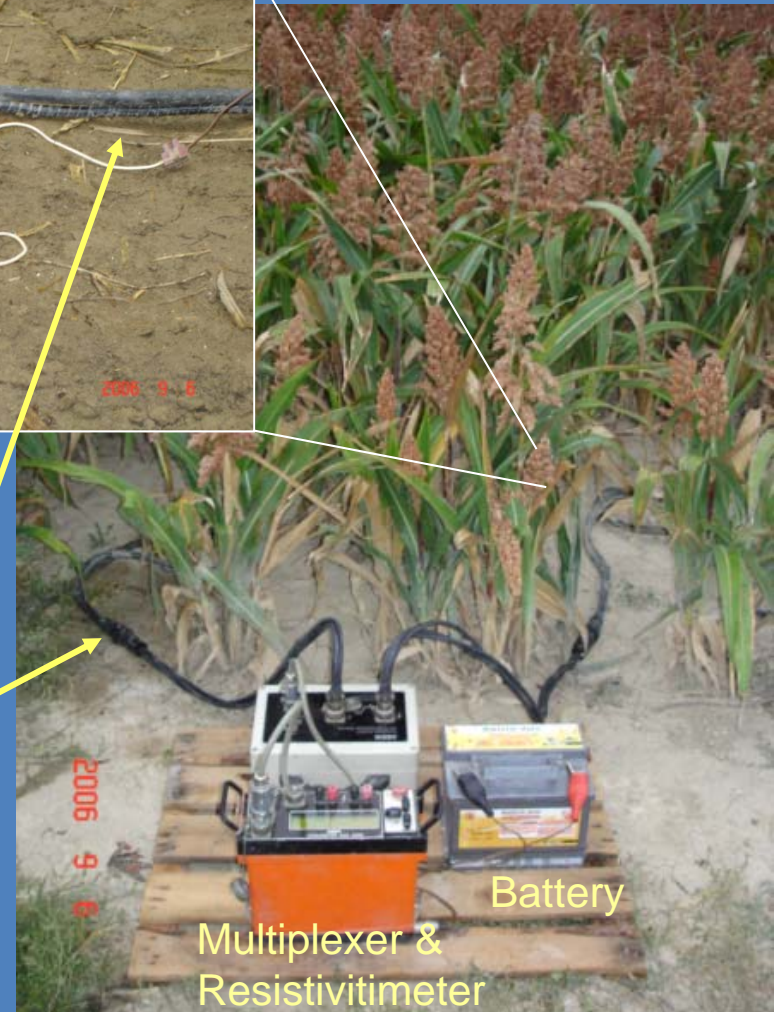
Distribution Spatiale l'eau par ERT

ERT Device and
cables/electrodes



Stainless steel
electrode

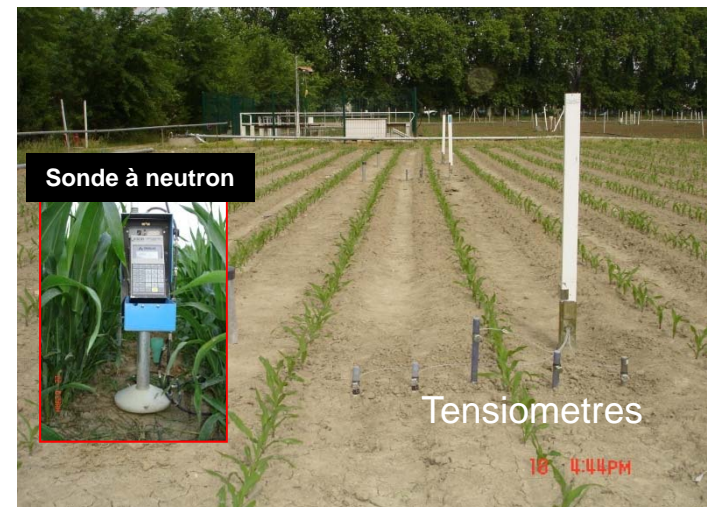
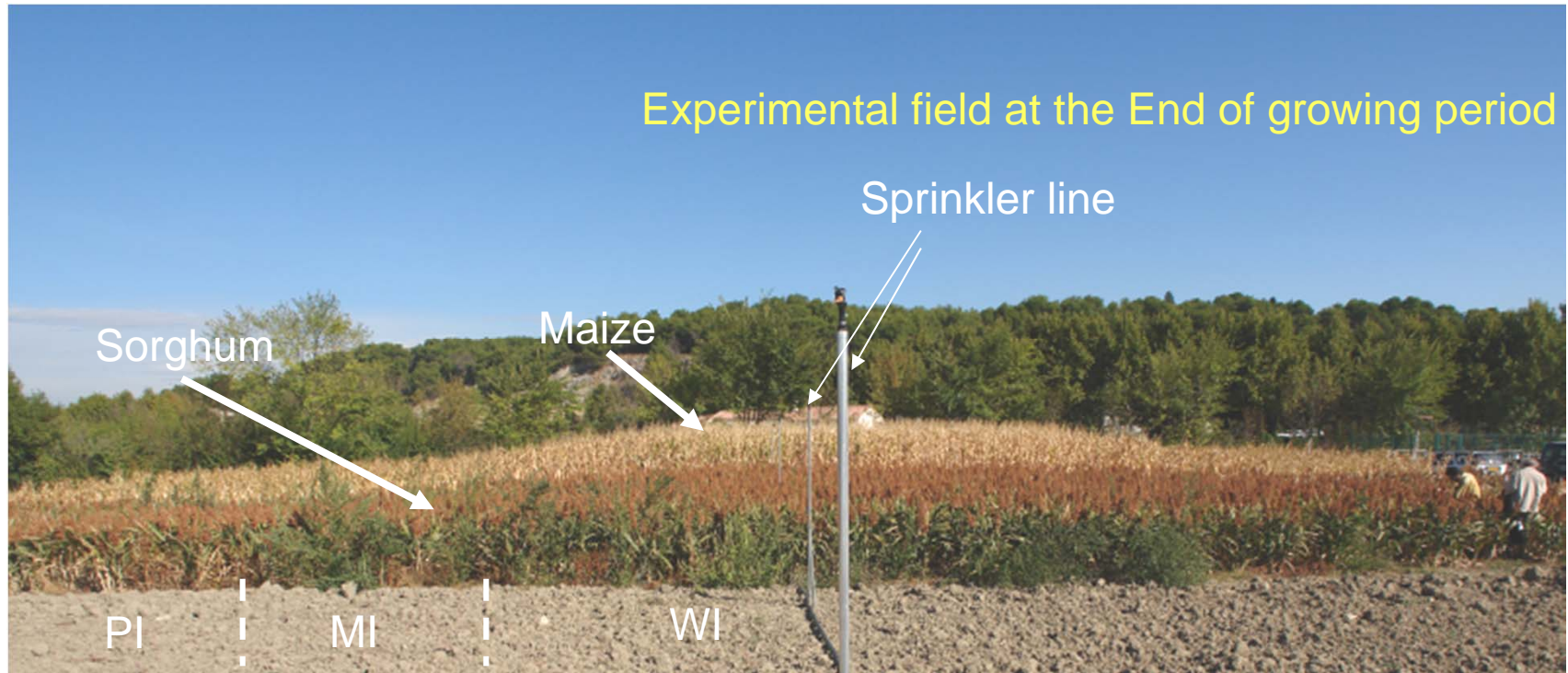
Electrical cables



Battery

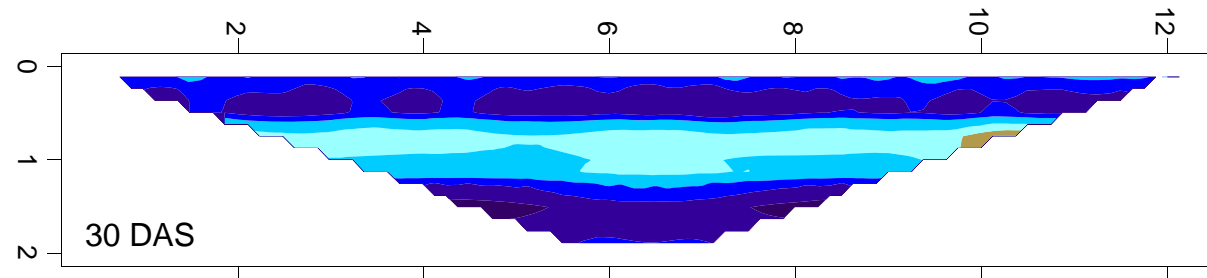
Multiplexer &
Resistivimeter

Efficiencia hidrica del maiz y Sorgo

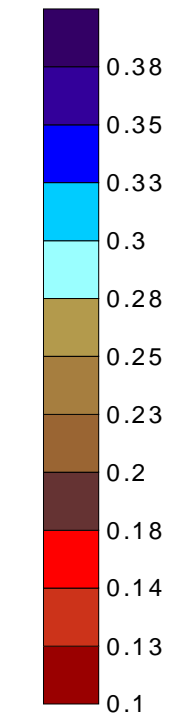
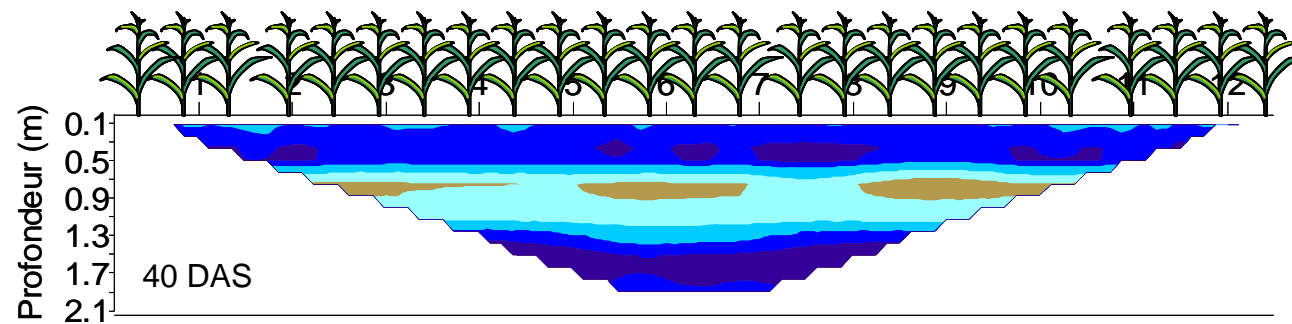


Poorly Irrigated crops

Maize

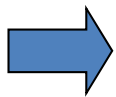
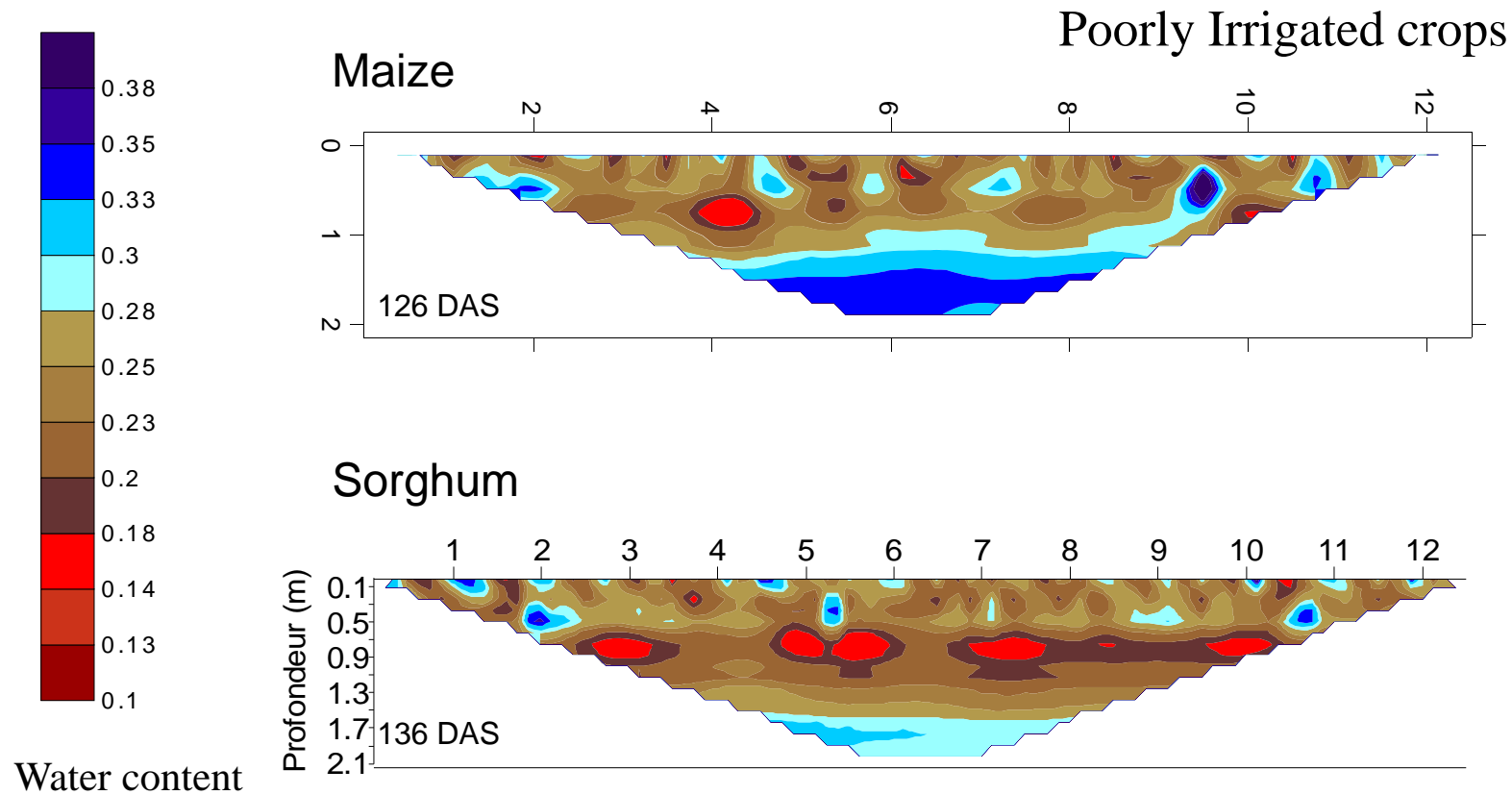


Sorghum



Water content

Teneur en eau du sol **en début** de culture (section perpendiculaire au rang estimé par Tomographie Electrique)



- Hétérogénéité spatiale et temporelle du prélèvement hydrique par les 2 cultures, plus prononcé pour le maïs.
- Patches de zones de sol fortement appauvries en eau (plus bas que point flétrissement permanent)

Teneur en eau du sol **en fin** de culture (section perpendiculaire au rang estimé par Tomographie Electrique)

The End