Résistivité électrique : outil d'aide à la cartographie des sols

Maud Seger, Guillaume Giot, Catherine Pasquier, Pierre Courtemanche, Isabelle I. Cousin

▶ **To cite this version:**

Maud Seger, Guillaume Giot, Catherine Pasquier, Pierre Courtemanche, Isabelle I. Cousin. Résistivité électrique : outil d'aide à la cartographie des sols. Ecole technique GPS-SIG (Résistivité électrique : outil d'aide à la cartographie des sols), 2013. hal-02808328

HAL Id: hal-02808328
https://hal.inrae.fr/hal-02808328

Submitted on 6 Jun 2020

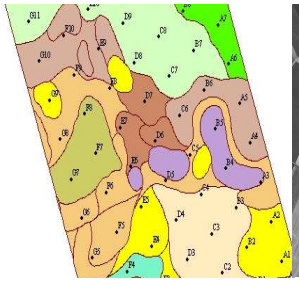
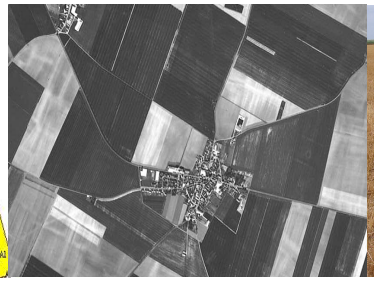
HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

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.

Ecole technique GPS-SIG Auzeville 13-15 mars 2013

Résistivité électrique : outil d'aide à la cartographie des sols

Séger M., Giot G., Pasquier C., Courtemanche P. Cousin I.

UR SOLS
Unité de Recherche de Science du Sol d'Orléans

INRA

Introduction

La mesure

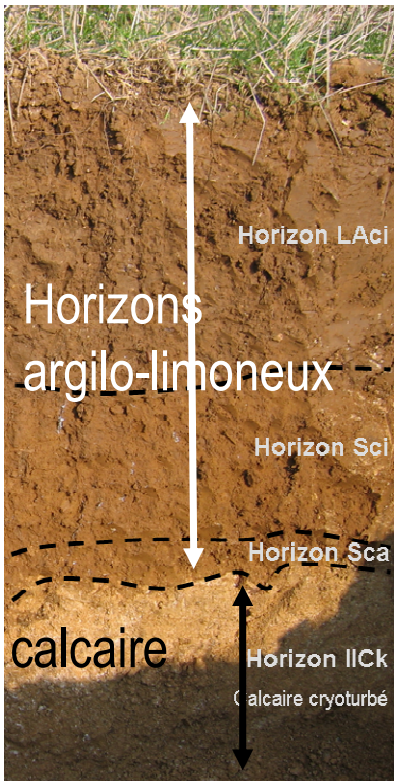
Le traitement

L' interprétation

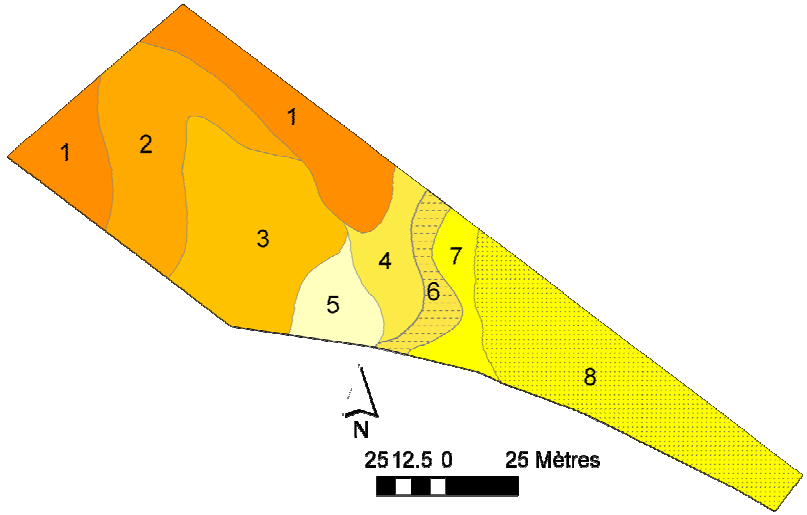
Applications

Le sol, un milieu hétérogène dans l'espace

Hétérogénéité verticale



Hétérogénéité latérale



UCS

1 Calcisol épais développé sur matériau cryoturbé beige
2 Calcisol moyennement épais développé sur matériau cryoturbé
3 Calcosol peu épais sur matériau cryoturbé
4 Calcosol épais sur matériau cryoturbé et calcaire tendre
5 Calcosol peu épais sur matériau cryoturbé et calcaire tendre
6 Calcosol épais sur matériau cryoturbé et calcaire tendre à dalle calcaire profonde (80 à 110 cm)
7 Calcosol sur dalle calcaire moyennement profonde (60cm)
8 Calcosol caillouteux sur calcaire dur

Et dans le temps …

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

Le sol, un milieu hétérogène dans l'espace

Besoin de connaissance précise des hétérogénéités du sol à l'échelle parcellaire (*applications : modèles de culture, bilans hydriques*) :

→ Prospection conventionnelle à la tarière :

- Nombre de sondages important et fonction de la précision souhaitée
- Difficultés d'interpolation
- Expertise
- Ne permet pas un suivi temporel

Besoin de moyens d'aide à la cartographie et à la reconnaissance de la variabilité spatiale des sols :

- Acquisition rapide et exhaustive d'informations sur le sol
- Permettant la prospection spatiale
- Non intrusifs, permettant un suivi temporel
- Avec une résolution adaptée à la taille des hétérogénéités

Mesure de la résistivité électrique du sol

Plan de l'exposé

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

1. La mesure de résistivité électrique
2. Comment traiter les données acquises ?
3. Comment interpréter les cartes de résistivité électrique ?
4. Quelles applications ?

Introduction

La mesure

Le traitement

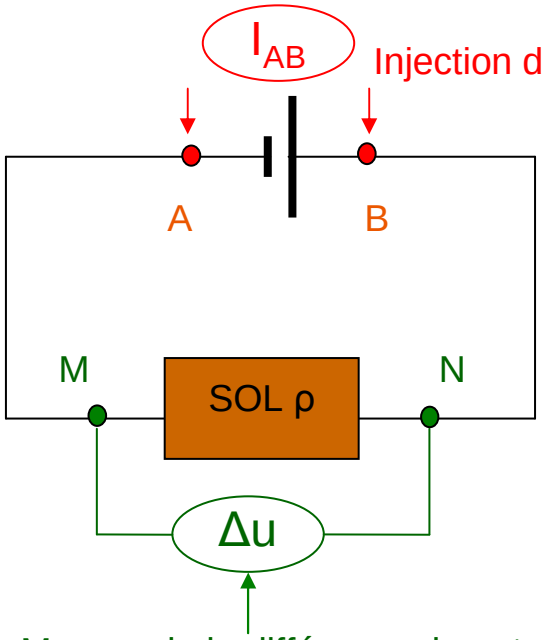
L' interprétation

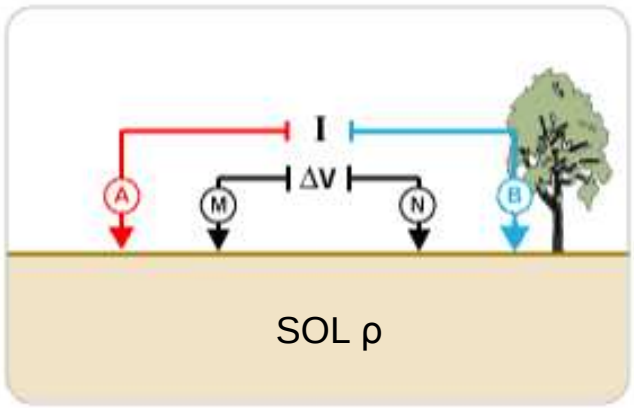
Applications

1. La mesure de résistivité électrique

La résistivité électrique

La **résistivité électrique** ρ d'un sol est sa capacité à limiter le passage d'un courant électrique. Elle s'exprime en **ohm.mètre**.





Grâce aux valeurs de Δu et I_{AB} on calcule ρ avec :

$$\rho = K^* \Delta u / I_{AB} \text{ (Loi d'ohm)}$$

avec K : coefficient géométrique (dépend de la disposition des électrodes dans l'espace)

Le volume caractérisé par la mesure dépend de l'écartement des électrodes : plus l'écartement est grand, plus le volume prospecté est grand.

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

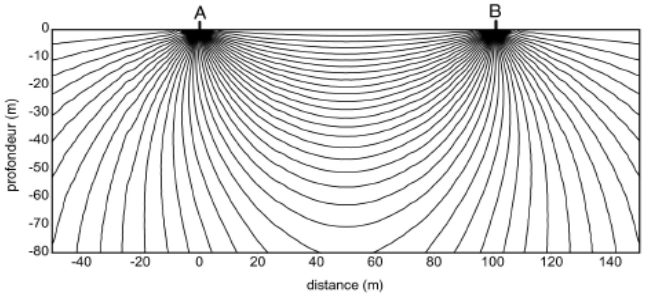
Applications

La résistivité électrique

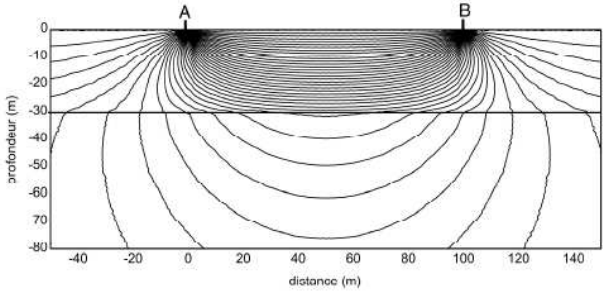
- Dans un **milieu homogène** la résistivité électrique est égale à la résistivité intrinsèque

- Dans un **milieu hétérogène** la résistivité électrique résulte de la contribution volumique de toutes les parties traversées par le courant : dans ce cas on parle de **résistivité apparente**

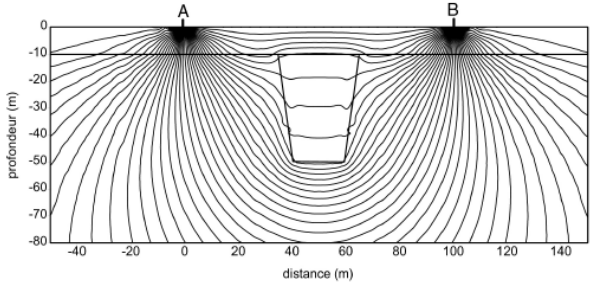
Milieu homogène



Conducteur sur résistant



Héterogénéité locale



Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

De quoi dépend la résistivité électrique du sol ?

De caractéristiques **pérennes :**

- Nature du sol (texture, teneur en argile)
- Eléments grossiers
- Profondeur du substrat

Type de sol

La résistivité électrique diminue globalement avec l'accroissement de la teneur en argile

De variables **conjoncturelles** :

- Teneur en eau *(climat, irrigation)*
- Porosité *(travail du sol, tassements)*
- Température *(climat)* → **correction de l'effet de la température**
- Concentration ionique de la solution du sol *(fertilisation)*

→ Difficultés d'interprétation

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

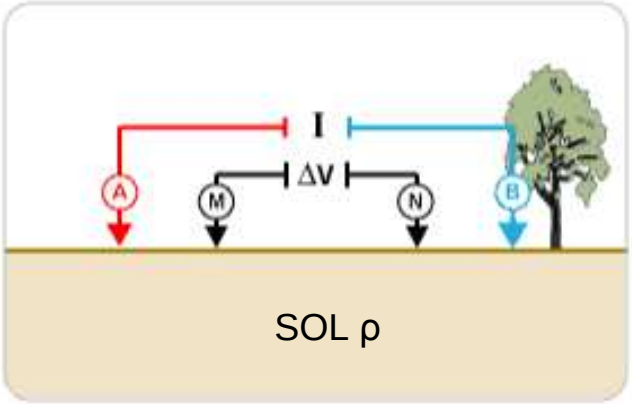
Applications

Quelles méthodes ?

La mesure se fait classiquement **avec 4 électrodes** :

• Deux électrodes d'injection (AB)

• Deux électrodes de mesure de la différence de potentiel (MN)



Différentes méthodes :

• Le sondage électrique 1D : variations verticales de ρ à l'aplomb d'un point de mesure

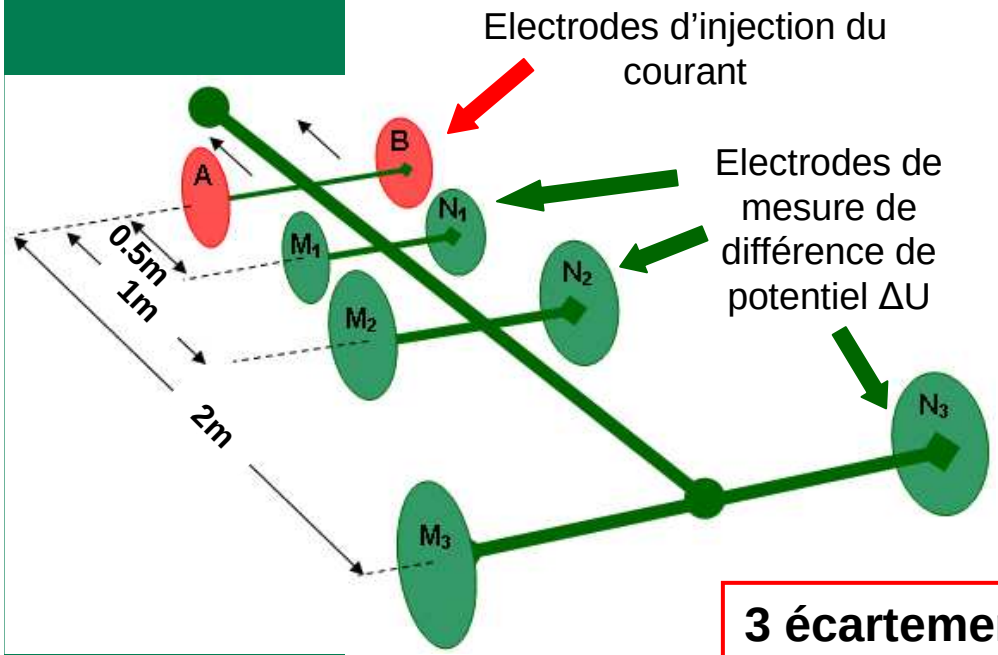
• Le trainé de résistivité : variations latérales de ρ

• L'imagerie de résistivité électrique : variations verticales et latérales de ρ

• **Les dispositifs tractés**

L'ARP (Automatic Resistivity Profiler)

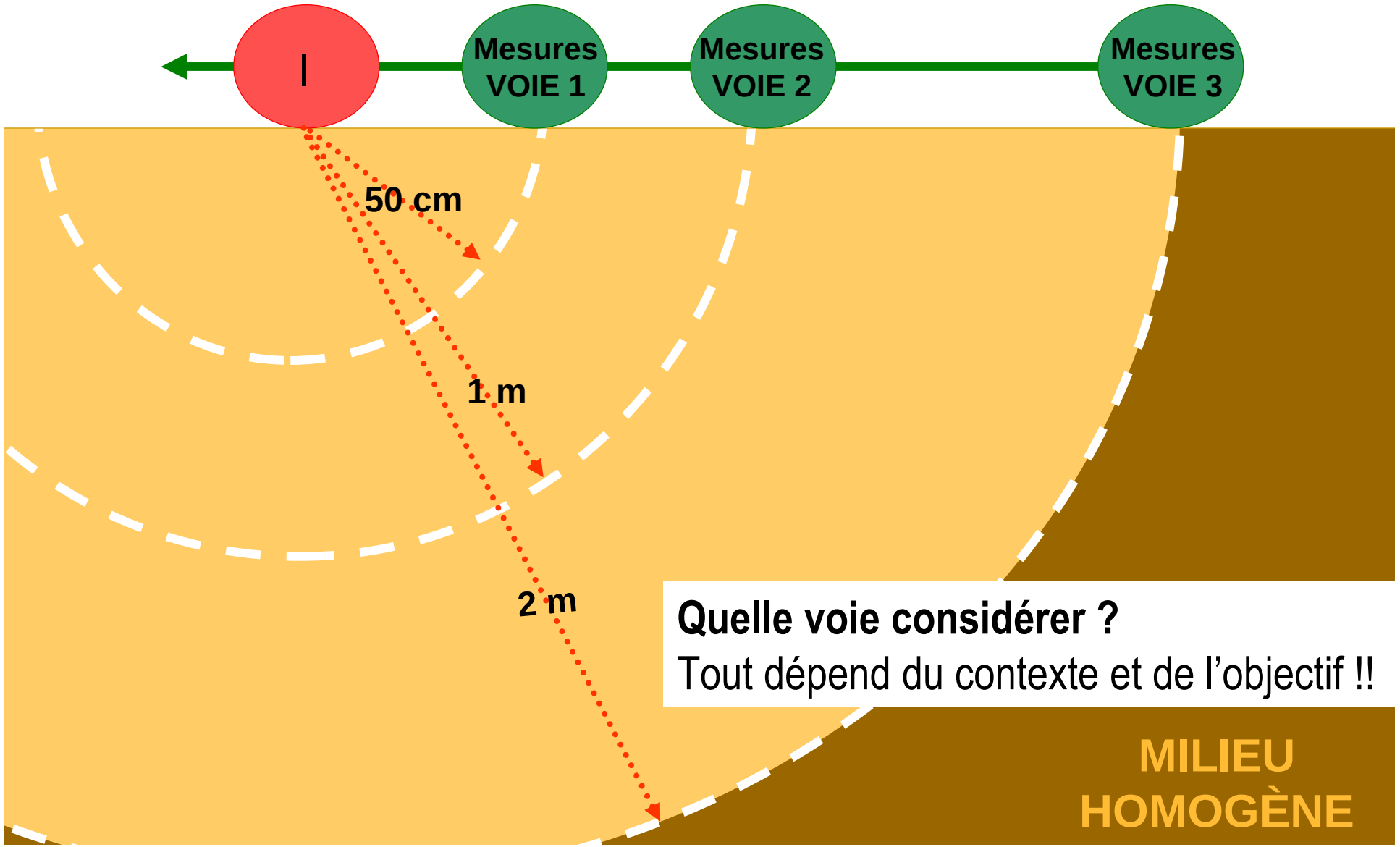
Configuration d'électrodes particulière (2 pour injection et 6 pour la mesure de ΔU) dit en « Vol de canard »



Outils développé pour l'étude des sols agricoles et de la pédologie

3 écartements = 3 profondeurs d'investigation = 3 résistivités apparentes

Que mesure-t-on ?



Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

En résumé

- Trois profondeurs d'investigations : V1, V2, V3
- Prospection électrique « continue » : enregistrement sur les trois voies tous les 10 cm
- Une haute résolution le long des profils et latérale qui dépend uniquement du trajet réalisé
- Un suivi en temps réel de la mesure
- Outils de positionnement embarqués : x,y,z à chaque seconde (dGPS) : précisions ~ 0.6 m en x,y et ~ 0.9 m en z
- Une prospection rapide : 10 à 15 km/h

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

2. Comment traiter les données acquises ?

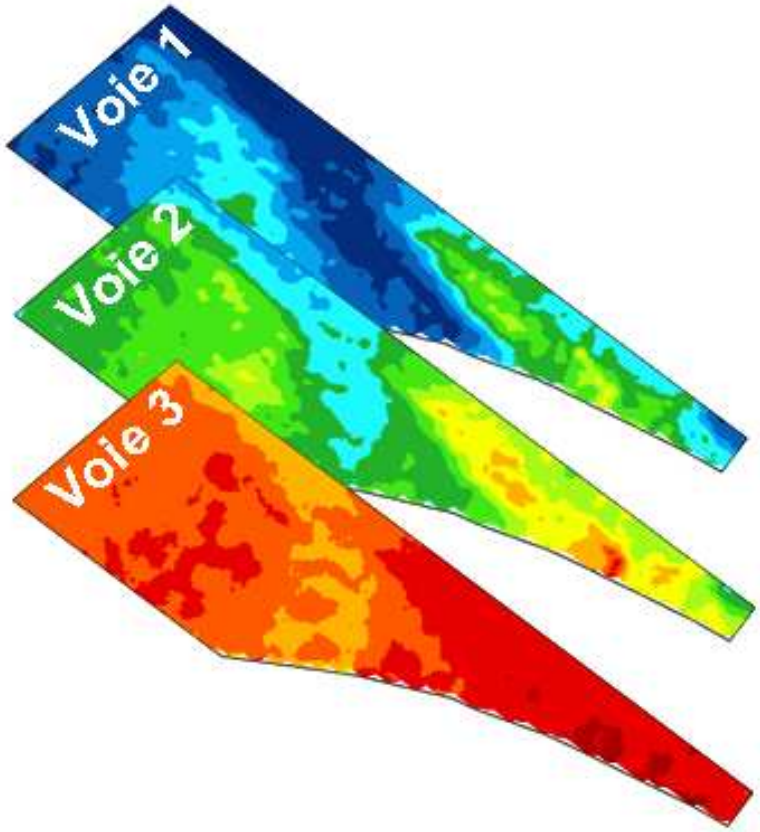
Les données brutes

Surfer - [LuxWGS84brute.dat]

File Edit Format Data Window Help

A1 EASTING

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	EASTING	NORTHING	Z	voie 1	voie 2	voie 3	fichier			
2	6.1562352	49.929478	433.13	403.94	635.74	847.43	4			
3	6.1562407	49.929479	433.13	417.66	613.12	827.14	4			
4	6.1562422	49.929479	433.15	425.78	555.75	765.04	4			
5	6.1562438	49.929479	433.15	415.49	569.57	751.01	4			
6	6.1562452	49.929479	433.15	403.22	549.05	759.03	4			
7	6.1562467	49.929479	433.15	386.79	550.3	759.28	4			
8	6.1562482	49.929479	433.15	383.9	588	757.77	4			
9	6.1562496	49.929479	433.15	403.22	566.64	762.03	4			
10	6.1562511	49.929479	433.15	415.13	577.11	799.09	4			
11	6.1562525	49.929479	433.15	413.32	580.46	785.57	4			
12	6.1562541	49.929479	433.15	413.68	572.08	784.32	4			
13	6.1562556	49.929479	433.15	412.24	571.24	790.83	4			
14	6.1562570	49.929479	433.15	384.45	550.3	769.79	4			
15	6.1562587	49.929479	433.2	389.32	551.98	782.32	4			
16	6.1562603	49.929479	433.2	449.24	592.18	805.1	4			
17	6.1562619	49.929479	433.2	459.89	587.16	796.59	4			
18	6.1562635	49.929479	433.2	485.52	598.89	793.84	4			
19	6.1562651	49.929479	433.2	470.18	598.47	783.07	4			
20	6.1562667	49.929479	433.2	464.58	600.14	776.81	4			
21	6.1562684	49.929479	433.2	435.16	571.24	736.74	4			
22	6.1562699	49.929479	433.2	447.8	560.36	705.19	4			
23	6.1562716	49.929479	433.2	462.24	586.32	684.65	4			
24	6.1562733	49.929479	433.2	494.36	600.56	701.93	4			
25	6.1562748	49.929479	433.2	508.26	593.44	700.43	4			
26	6.1562765	49.929480	433.2	511.87	593.44	716.46	4			
27	6.1562781	49.929480	433.2	529.92	623.59	747.01	4			
28	6.1562797	49.929480	433.2	528.12	614.38	735.99	4			
29	6.1562813	49.929480	433.2	493.64	592.6	701.93	4			
30	6.1562829	49.929480	433.2	464.58	557.42	686.4	4			
31	6.1562845	49.929480	433.2	448.7	558.26	687.16	4			
32	6.1562862	49.929480	433.2	424.51	549.05	694.42	4			
33	6.1562875	49.929480	433.28	-1	-1	-1	4			
34	6.1562889	49.929480	433.28	434.8	555.75	723.72	4			
35	6.1562902	49.929480	433.28	434.62	555.75	723.72	4			
36	6.1562916	49.929480	433.28	444.37	538.16	732.48	4			
37	6.1562929	49.929480	433.28	457.72	521.83	746.26	4			
38	6.1562943	49.929480	433.28	426.32	485.81	729.48	4			
39	6.1562957	49.929480	433.28	399.61	478.69	713.95	4			
40	6.1562970	49.929480	433.28	405.56	494.19	722.72	4			
41	6.1562983	49.929480	433.28	427.04	517.64	746.26	4			
42	6.1562997	49.929480	433.28	433.54	539.42	767.04	4			
43	6.1563011	49.929481	433.28	423.61	539	763.03	4			
44	6.1563025	49.929481	433.28	430.29	544.86	768.54	4			
45	6.1563037	49.929481	433.28	429.93	541.09	739.24	4			
46	6.1563051	49.929481	433.28	427.22	539	738.99	4			
47	6.1563065	49.929481	433.28	421.08	532.72	719.96	4			
48	6.1563079	49.929481	433.28	402.86	526.01	721.71	4			



es

. .

Filtrage des données brutes

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

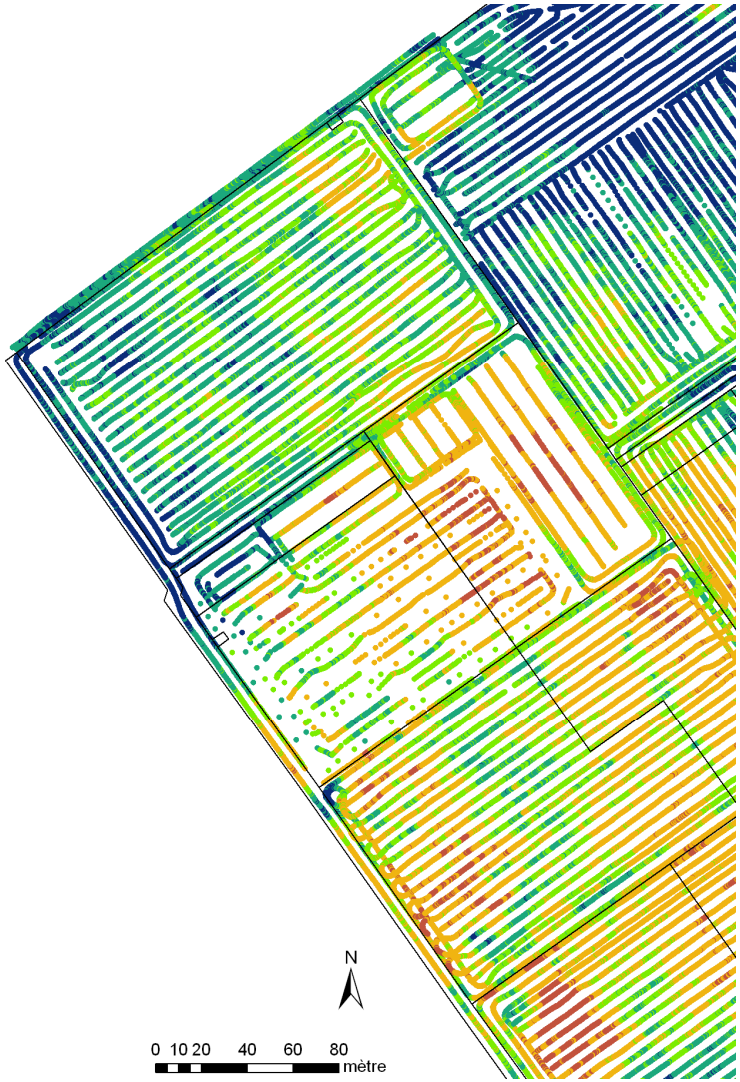
Applications

.dat

- Suppression des valeurs extrêmes (0 et > 10000)
- Suppression des virages (déformation de la géométrie des électrodes)

net.dat

-Filtrage des points autour d'un obstacle
- Filtrage des points quand vitesse nulle



Introduction

La mesure

Le traitement

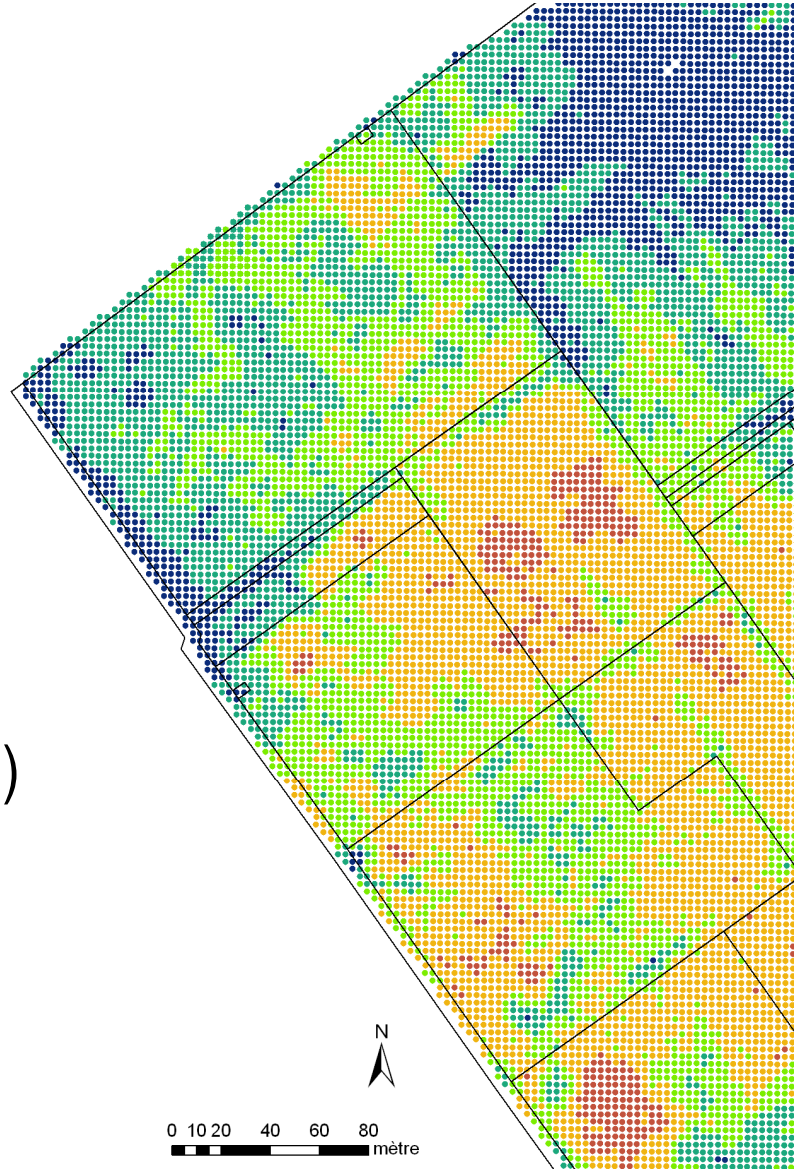
L' interprétation

Applications

Interpolation des données

grid.dat

- Interpolation par fonction spline bi-cubique
- Taille de la maille dépend de l'écartement entre les passages (égale à la moitié)



Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

3. Comment interpréter les cartes de résistivité ?

Introduction

La mesure

Le traitement

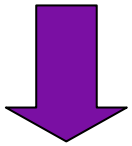
L' interprétation

Applications

Seule, la résistivité ne veut rien dire…

• Deux sous-sols très différents peuvent engendrer une même mesure de résistivité apparente (principe d'équivalence).

• Deux sous-sols très proches peuvent engendrer des mesures de résistivité apparente très différentes.
Exemple : une couche fine très conductrice en surface



Importance de compléter les cartes de résistivités avec des données complémentaires

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

Les données complémentaires

Des données générales : géologie, climat, topologie, contexte pédologique

Des données locales :

- Sondages pédologiques (texture, profondeur du substrat)
- Sondages électriques locaux permettant de retrouver précisément les profondeurs des différentes couches (inversion des données)
- Autres : teneur en eau, température, travail du sol, occupation du sol, données d'archive, parcellaire etc.….

Plus les données complémentaires sont nombreuses plus on arrivera à donner du sens aux mesures de résistivité

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

4 . Exemples d'applications

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

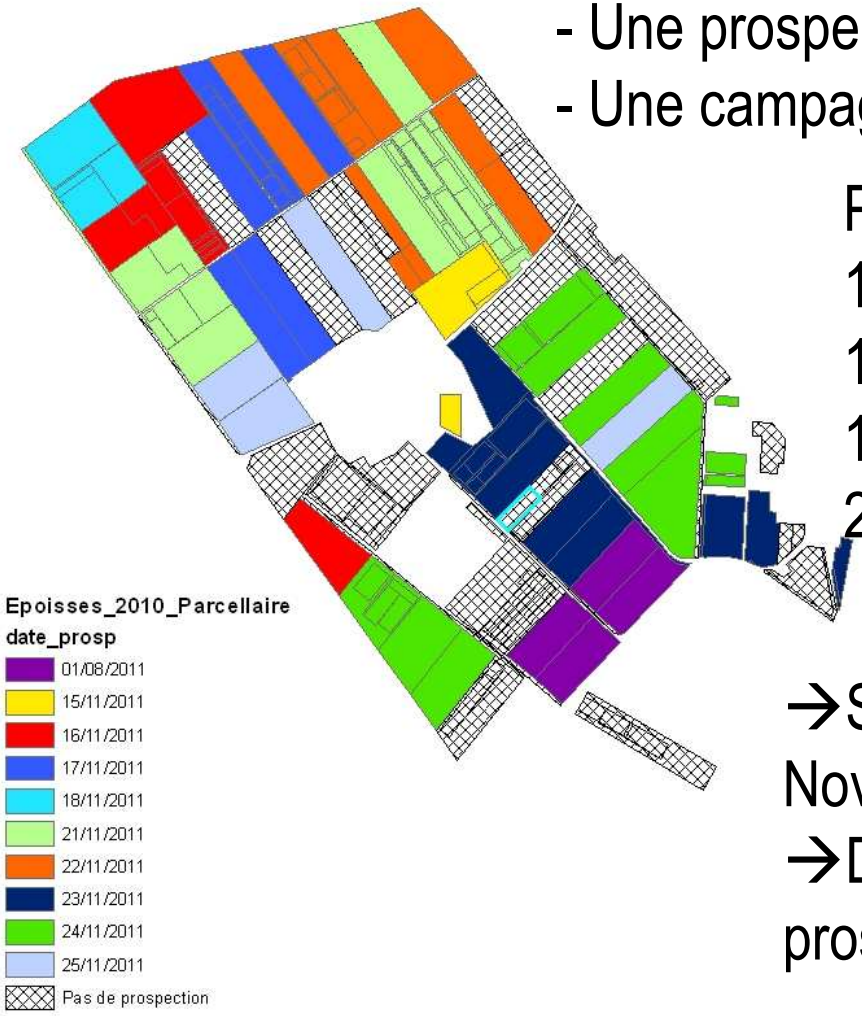
Aide à la caractérisation des sols de l'UE d'Epoisses

Projet **CAREX** : caractérisation de propriétés du sol de 11 UE des départements EA et GAP pour améliorer le suivi des ressources en eau et en azote au sein des parcelles.

Unité Expérimentale d'Epoisses

- Unité expérimentale 120 hectares
- Contexte géologique : Plaine alluviale de l'Ouche
- Carte pédologique de Dijon 1/1000000 : Sols argilo-limoneux sur cailloutis calcaire plus ou moins épais
- Un réseau de drainage ancien (1935)
- Archives : sondages électriques et géologie de surface
- Données météo, photos
- Quelques sondages pédologiques : 3 horizons et apparition du niveau de cailloutis entre 60 cm et 100 cm → **Voie 2**
- Pas de données sur la teneur en eau et la température au moment de la mesure

Périodes de prospection ARP



- Une prospection en **août**
- Une campagne de prospection **du 15 au 25 novembre**

Pluies pendant la campagne de novembre :
17/11 : 0.5 mm
18/11 : 0.5 mm
19/11 : 1 mm
23/11 : 0.5 mm

→Séparer l'analyse de la campagne de Novembre et celle d'août
→Dans la mesure du possible rassembler les prospections

Carte de résistivité de la voie 2

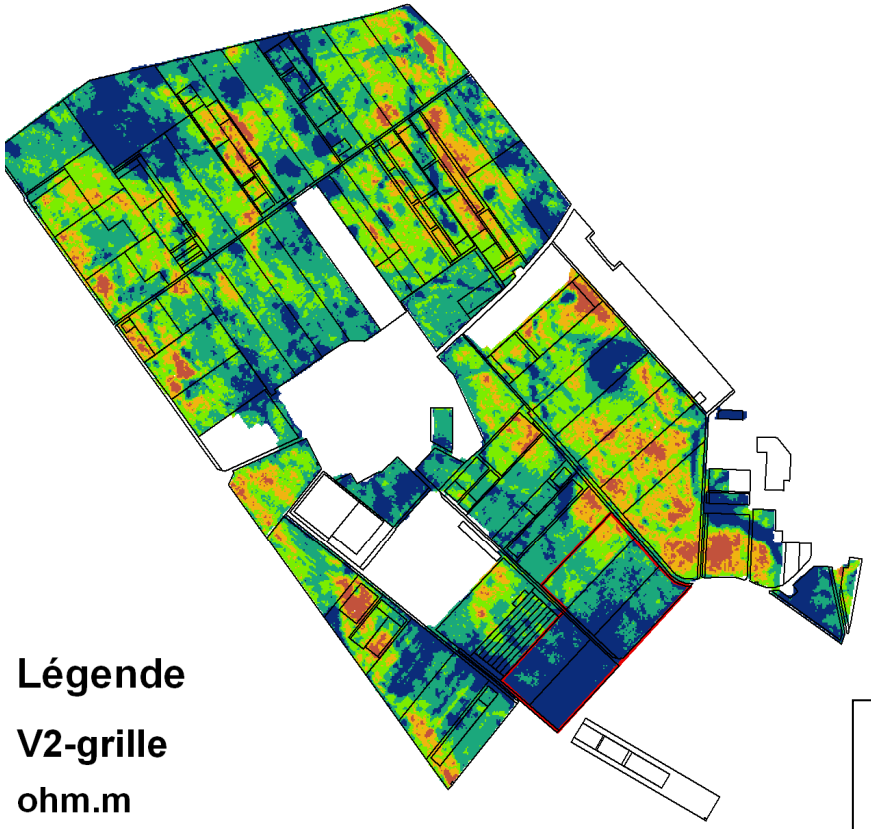
Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications



- Différence entre prospection en août en novembre : effet humidité
- Pas d'effet parcelle
- Figures qui font penser à d'anciens chenaux

Apparemment très lié à la profondeur d'apparition du calcaire

Seuillage et proposition d'un plan d'échantillonnage

Introduction

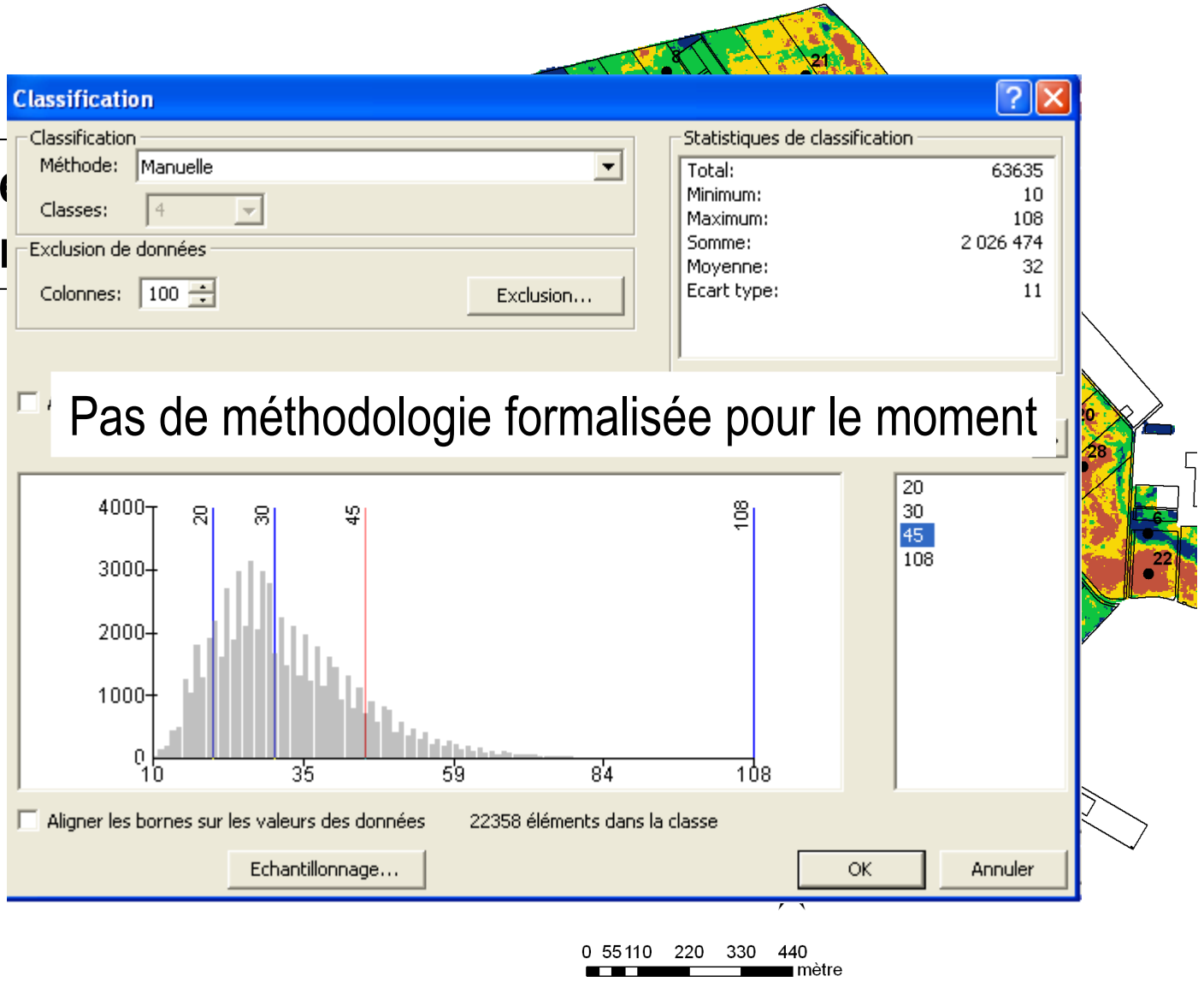
La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

Carte
selon



Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

Conclusions à partir de l'exemple d'Epoisses

La carte de résistivité permet :

→ de donner une information précise sur les hétérogénéités et probablement sur les contours des unités pédologique

→ de réduire considérablement le nombre de prélèvements à effectuer pour étudier les sols

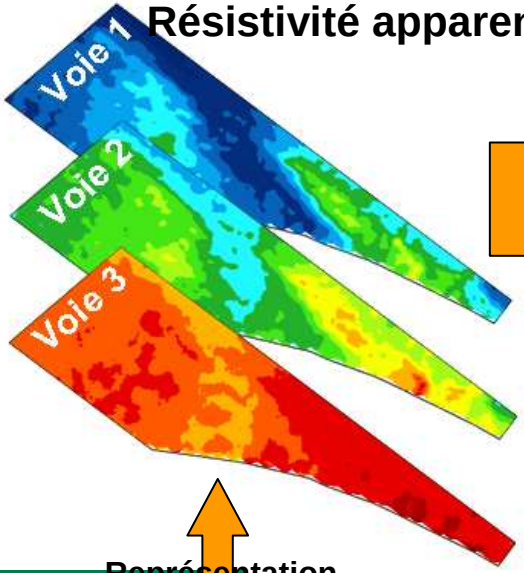
La carte de résistivité ne permet pas de faire directement une carte des sols : les données (texture, profondeur du sol) permettront de confirmer l'homogénéité des plages d'isorésistivité

Des analyses plus poussées peuvent être conduites pour interpréter les données : analyses statistiques et géostatistiques entre les données sol et la résistivité électrique.

→ Stage **CAREX** : création d'un protocole généralisable.

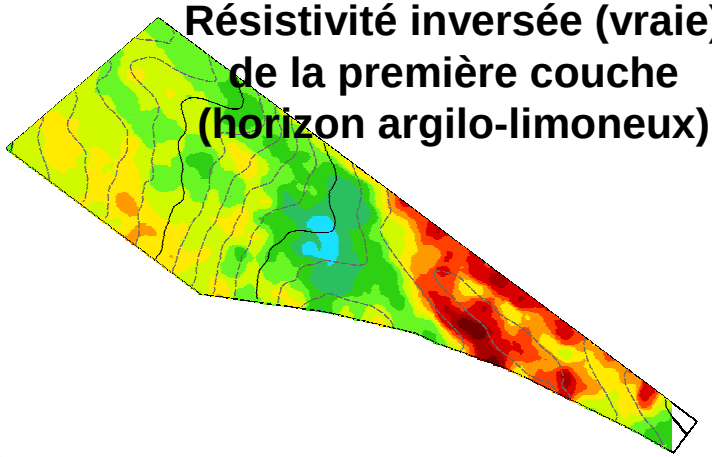
Vers les propriétés hydriques (1/2)

Résistivité apparente



Modélisation inverse
(point par point)

Résistivité inversée (vraie) de la première couche (horizon argilo-limoneux)

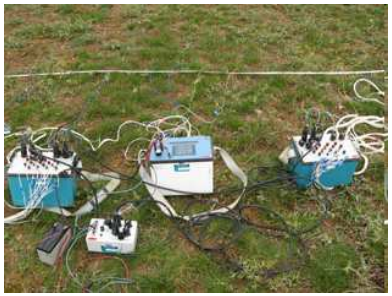


Paramètres pour contraindre l'inversion

Représentation spatialisée : interpolation des points de mesure

Prospection MuCEP

Sondages électriques localisés ⇒ résistivité des différentes couches

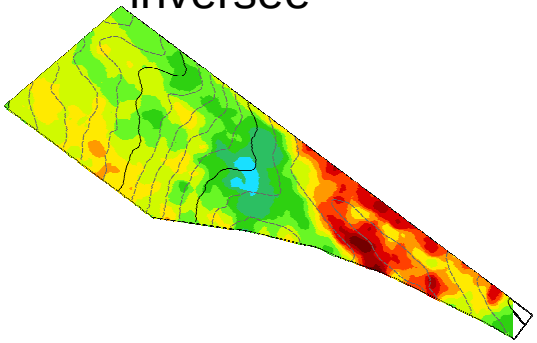


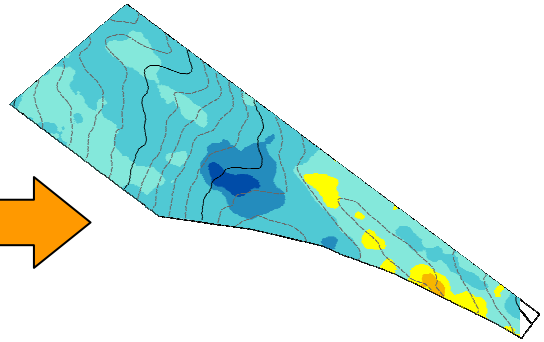
Sondages pédologiques ⇒ informations sur l'épaisseur des couches

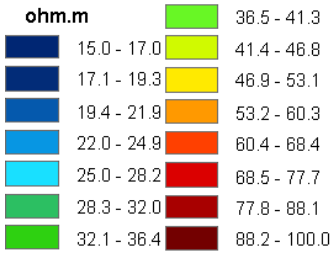
Vers les propriétés hydriques(2/2)

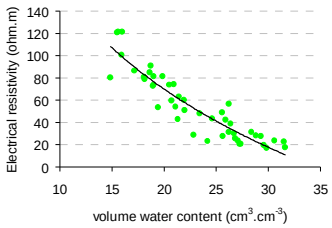
Carte de résistivité inversée

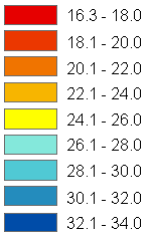
Carte de teneur en eau de l'horizon argilo-limoneux











Loi $\theta = f(\rho)$

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

Applications

Conclusion

Des points positifs :

- ✓ Système rapide à mettre en œuvre
- ✓ Mesures non destructives :
- ✓ Haute résolution
- ✓ Méthode robuste, mesure peu parasitée par les conditions du milieu
- ✓ Une information précise sur l'hétérogénéité spatiale du milieu

Des difficultés :

- ✓ Contact sol/électrodes
- ✓ Nombreux facteurs d'influence ⇒ interprétation complexe.
- ✓ Transformer une carte de résistivité en propriété du sol nécessite un travail de calibration conséquent.

Indispensable !!
Analyser les mesures de résistivité électriques avec des données complémentaires et notamment l'expertise d'un pédologue.

Merci de votre attention !

Introduction

La mesure

Le traitement

L' interprétation

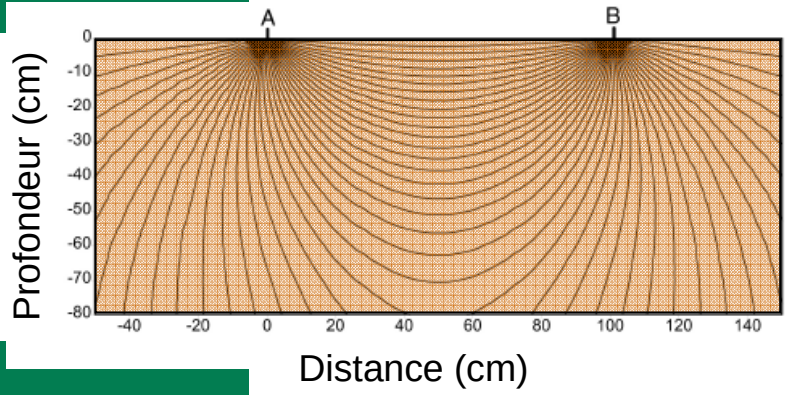
Applications

Quelques références bibliographiques

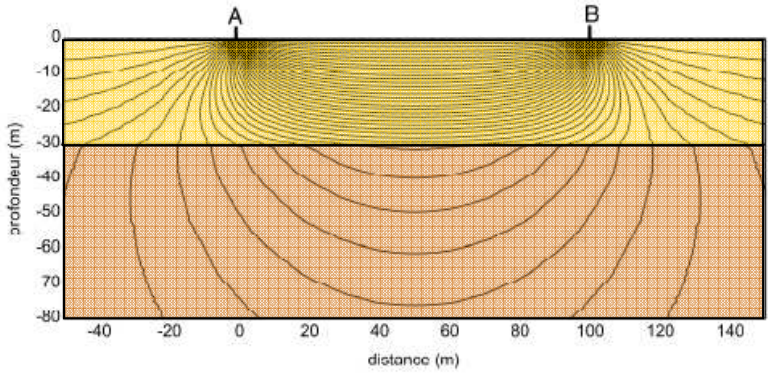
- ✓ Moeys et al., 2006. Cartographie des sols à grande échelle : Intégration explicite d'une mesure de résistivité apparente spatialisée à l'expertise pédologique. Etude et gestion des sols, 13, 4, 2006.
- ✓ Panissod et al., 1997. A novel mobile multipole system (MUCEP) for shallow (0-3m) geoelectrical investigation: the 'Vol-de-canard' array. Geophysical Prospecting, 45, 983-1002.
- ✓ Cours on line de Dominique Chapellier et Jean-Luc Mari de l'Université de Lausanne. http://www-ig.unil.ch/cours/acc5f.htm

Variation de la résistivité électrique en fonction du milieu

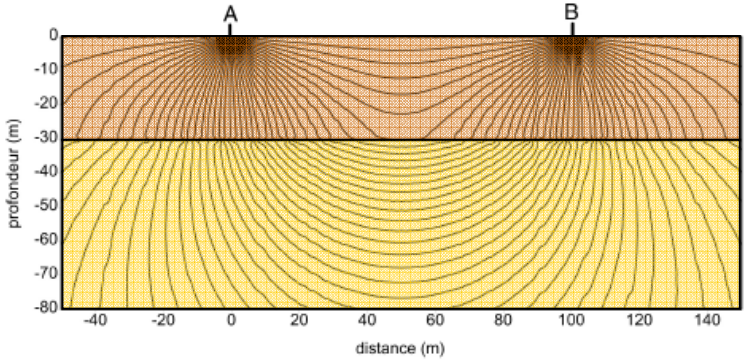
Milieu homogène



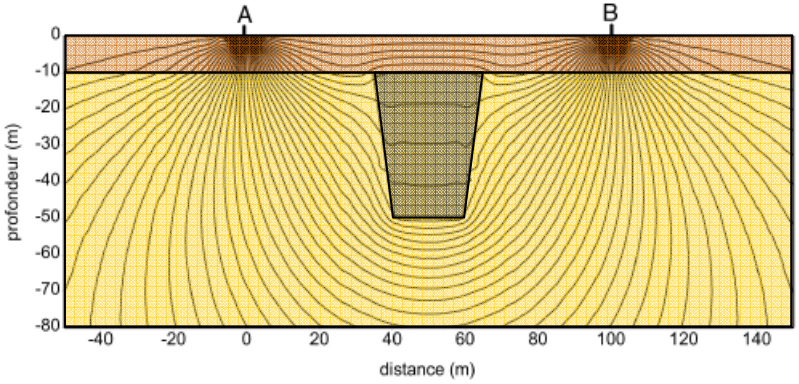
Horizon supérieur moins résistant



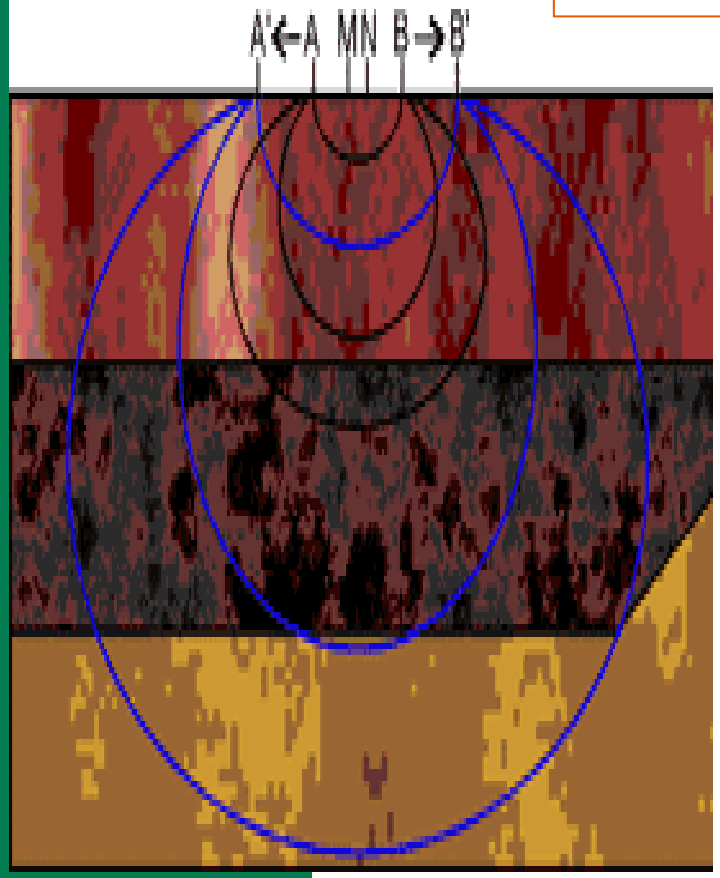
Horizon supérieur plus résistant



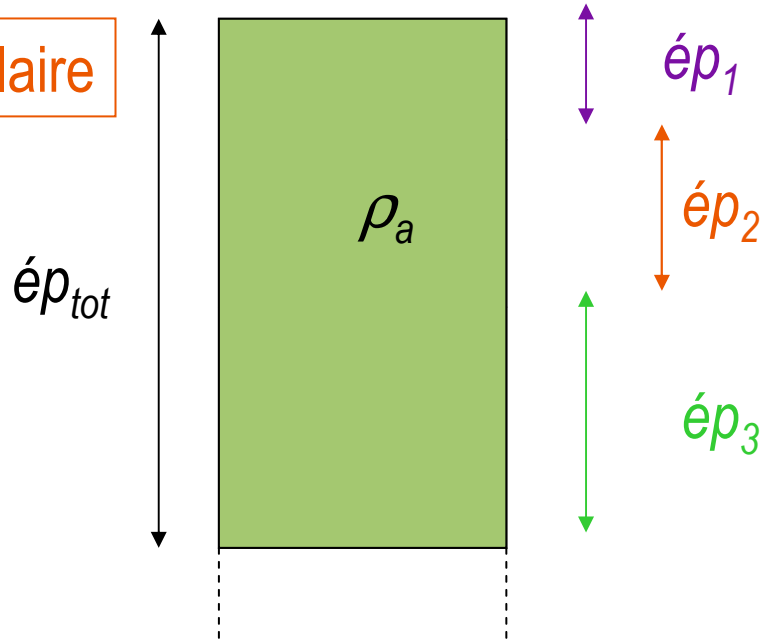
Hétérogénéité enfouie locale



Résistivité apparente et résistivité vraie



Cas d'un modèle tabulaire



$$\rho_a.ép_{tot} = \rho_1.ép_1 + \rho_2.ép_2 + \rho_3.ép_3 + \ldots$$

un point MUCEP

=

un sondage à 3 profondeurs

Principe de l'inversion 1D

$$\rho_a . \acute{e}p_{tot} = \rho_1 . \acute{e}p_1 + \rho_2 . \acute{e}p_2 + \rho_3 . \acute{e}p_3 + \ldots$$

Une équation à n inconnues

Nécessité de faire des hypothèses

- Hypothèses sur épaisseurs et/ou résistivité à partir des résultats de sondages ponctuels multiprofondeurs
- profondeur de prospection générale par l'ARP

Importance des contrastes de résistivité entre couches

Code QWIN (Sisyphe)

Correction de l'effet de la température

Les variations de température influencent la viscosité des fluides contenus dans la solution du sol et donc la mobilité des ions présents

Campbell et al., 1948 (30 sols, 15 à 25 °C):
Pour une variation de température de 1°C → 2% de variation de la résistivité électrique.

$$\rho_{Tref} = \rho_T / (1+\alpha(T-T_{ref}))$$

ρ_{Tref} : résistivité à la température de référence
ρ_T : résistivité à la température de mesure
α : paramètre empirique = 0.025
T : température au moment de la mesure
T_{ref} : température de référnce