

Contextualisation, problématique**Modélisation**

- *Cas homogène, résistivité apparente*
- *Analyse du problème hétérogène*

Expérimentation (Série I)

- *Dispositif expérimental*
- *Influence de différents paramètres*

Traitement informatique

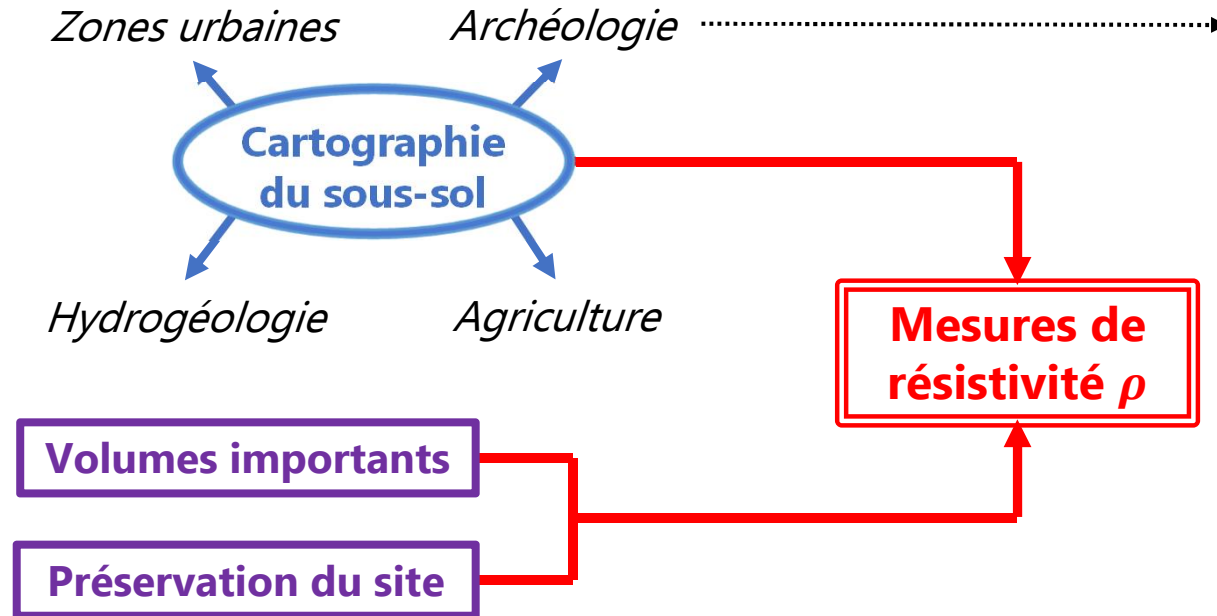
- *Tracé des pseudo-sections*
- *Inversion (Res2dinv)*

Expérimentation (Série II)

- *Aquifères*
- *Obstacles verticaux, horizontaux*

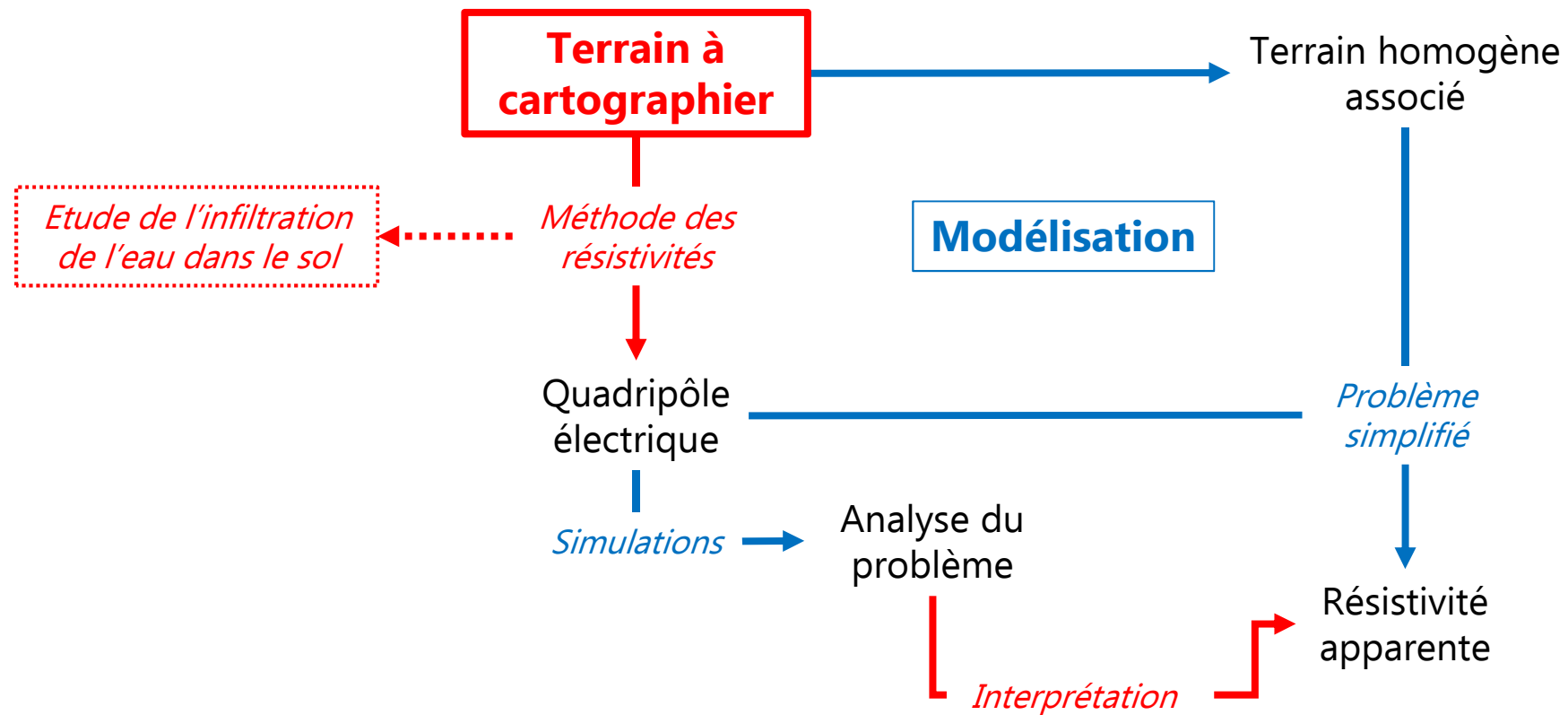
Bilan, conclusion

Détermination de la nature d'un sous-sol par mesure de la résistivité électrique



Maiden Castle

Dans quel cadre les mesures de résistivité du sous-sol constituent-elles un choix pertinent pour le cartographe ?



Contextualisation, problématique

Modélisation

→ Cas homogène, résistivité apparente

→ Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

→ Dispositif expérimental

→ Influence de différents paramètres

Traitement informatique

→ Tracé des pseudo-sections

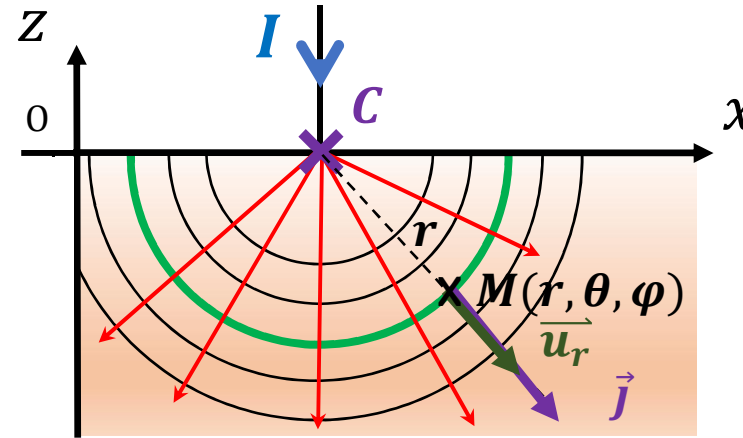
→ Inversion (Res2dinv)

Expérimentation (Série II)

→ Aquifères

→ Obstacles verticaux, horizontaux

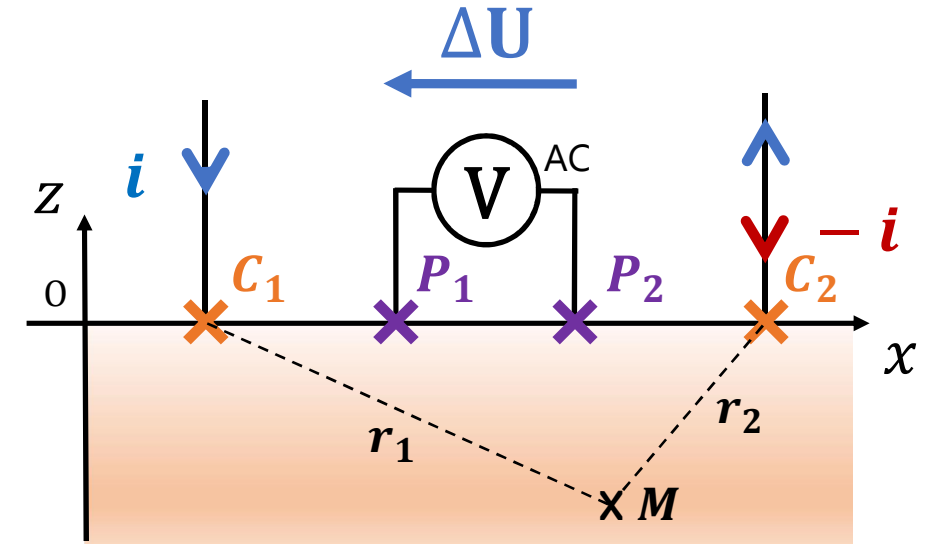
Bilan, conclusion



- Equipotentielles
- Lignes de champ \vec{E}
- Surface - flux

1. Calcul de flux (1 électrode)

$$\vec{j} = j(r) \cdot \vec{u}_r = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \vec{u}_r$$



- Demi-espace infini
- Milieu **H**omogène **L**inéaire **I**sotrope
- $\rho = \text{constante}$ et $i = \text{constante}$

2. Théorème de superposition (2 électrodes)

$$\vec{j}_{tot} = j(r_1) \cdot \vec{u}_{r_1} + j(r_2) \cdot \vec{u}_{r_2}$$

$$\vec{j}_{tot} = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{(x - OC_1)^2} + \frac{1}{(OC_2 - x)^2} \right) \cdot \vec{u}_x$$

Contextualisation, problématique

Modélisation

→ Cas homogène,
résistivité apparente

→ Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

→ Dispositif expérimental

→ Influence de différents
paramètres

Traitement informatique

→ Tracé des pseudo-sections

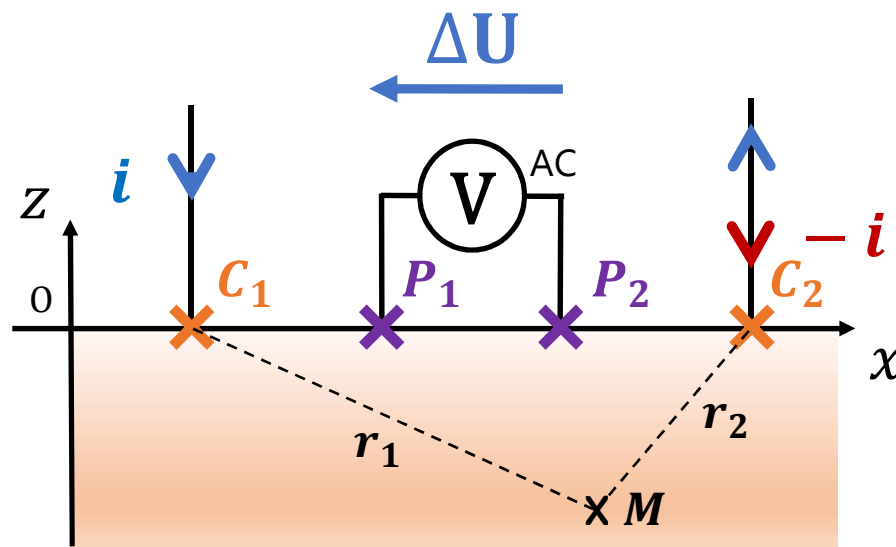
→ Inversion (Res2dinv)

Expérimentation (Série II)

→ Aquifères

→ Obstacles verticaux, horizontaux

Bilan, conclusion



- Demi-espace infini
- Milieu **H**omogène **L**inéaire **I**sotrope
- $\rho = \text{constante}$ et $i = \text{constante}$

3. Loi d'Ohm locale

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{j}_{tot}$$

4. Relation \vec{E} - V

$$\Delta U = - \int_{P_2}^{P_1} \vec{E} \cdot d\vec{x} \cdot \vec{u}_x$$

Résistivité
apparente

$$\rho_{app} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta U}{i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} + \frac{1}{C_2 P_2}}$$

Contextualisation, problématique

Modélisation

→ Cas homogène,
résistivité apparente

→ Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

→ Dispositif expérimental

→ Influence de différents
paramètres

Traitement informatique

→ Tracé des pseudo-sections

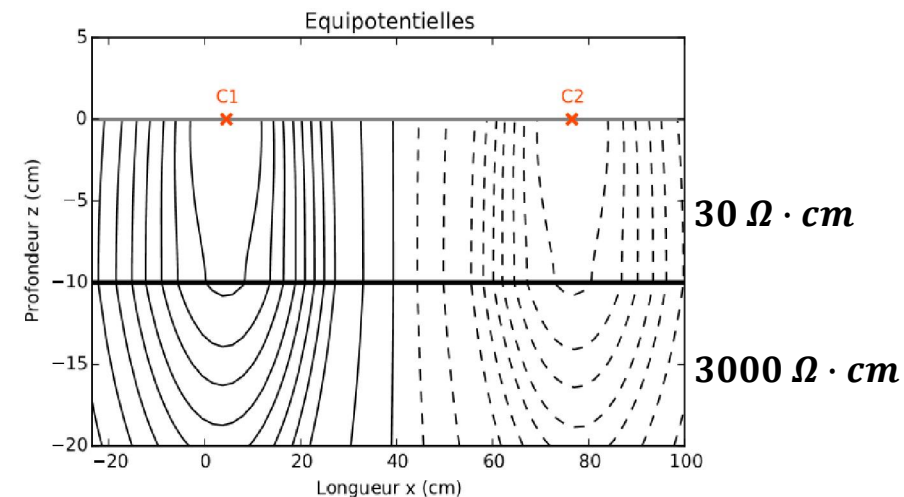
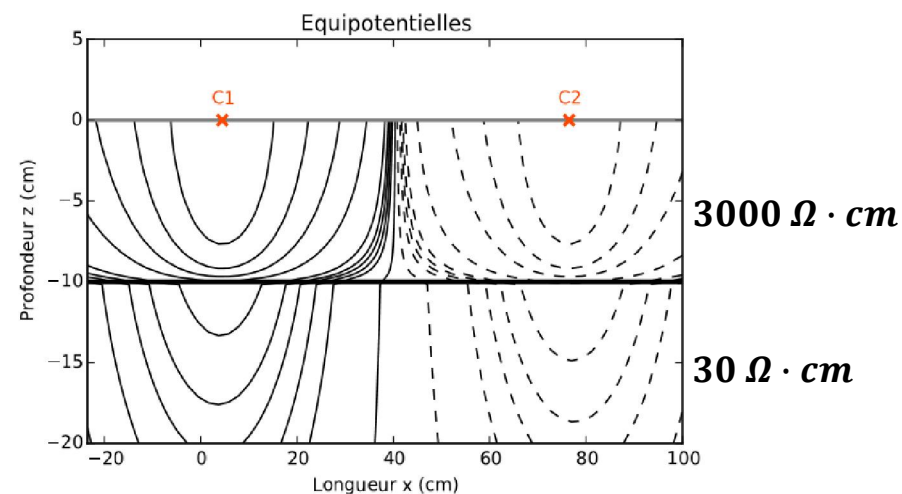
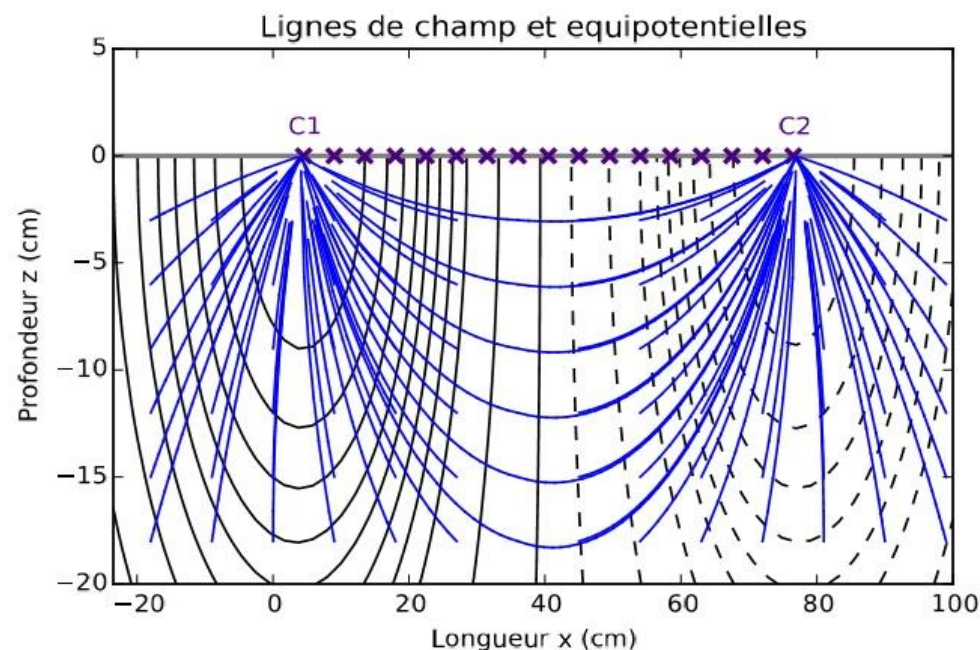
→ Inversion (Res2dinv)

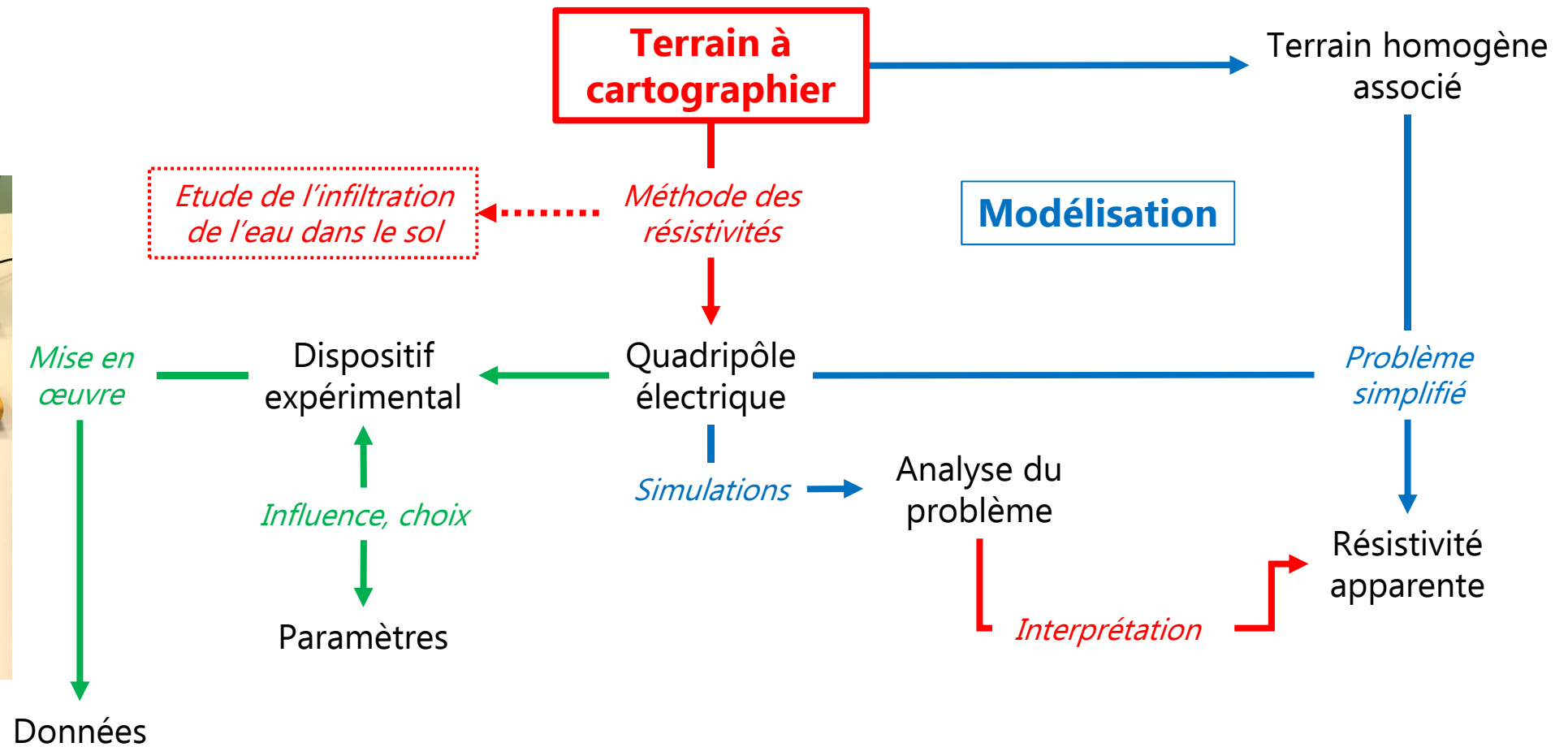
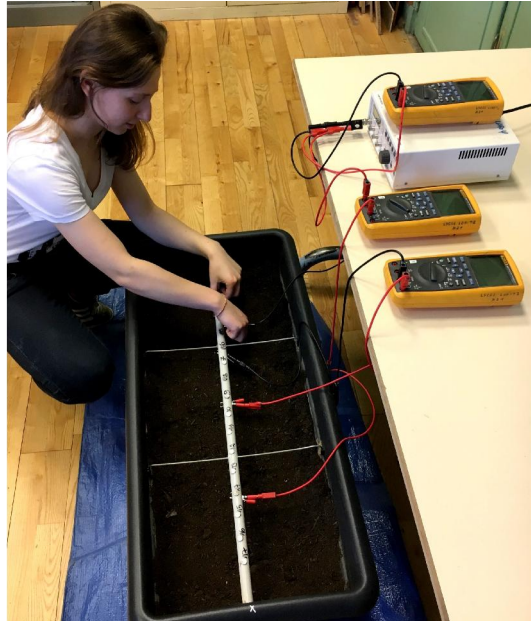
Expérimentation (Série II)

→ Aquifères

→ Obstacles verticaux, horizontaux

Bilan, conclusion





Expérimentation (Série I)

Contextualisation, problématique

Modélisation

- Cas homogène, résistivité apparente
- Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

→ Dispositif expérimental

- Influence de différents paramètres

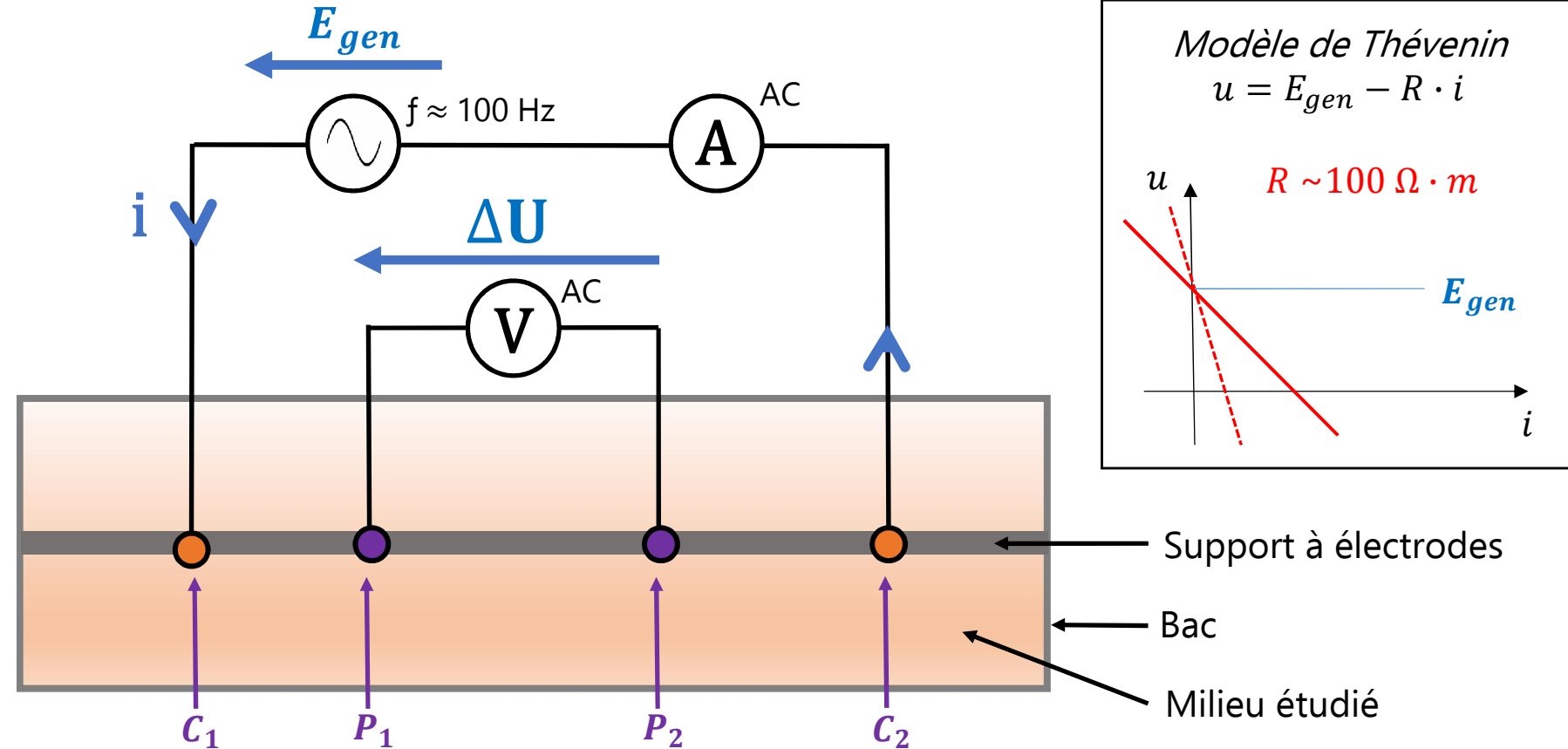
Traitement informatique

- Tracé des pseudo-sections
- Inversion (Res2dinv)

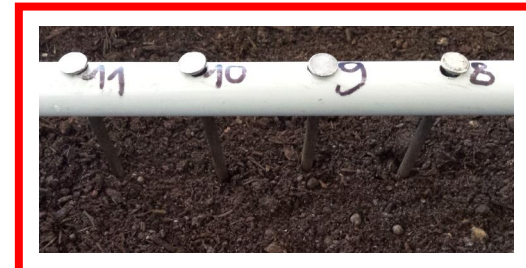
Expérimentation (Série II)

- Aquifères
- Obstacles verticaux, horizontaux

Bilan, conclusion



● ● Electrodes (clous)



Expérimentation (Série I)

Contextualisation, problématique

Modélisation

- Cas homogène, résistivité apparente
- Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

- Dispositif expérimental
- Influence de différents paramètres

Traitement informatique

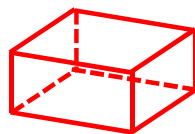
- Tracé des pseudo-sections
- Inversion (Res2dinv)

Expérimentation (Série II)

- Aquifères
- Obstacles verticaux, horizontaux

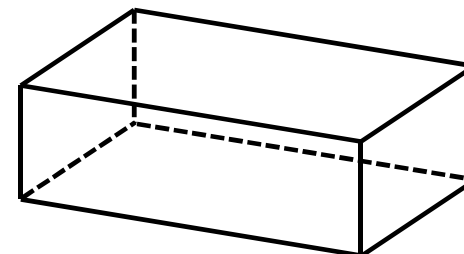
Bilan, conclusion

Taille du bac



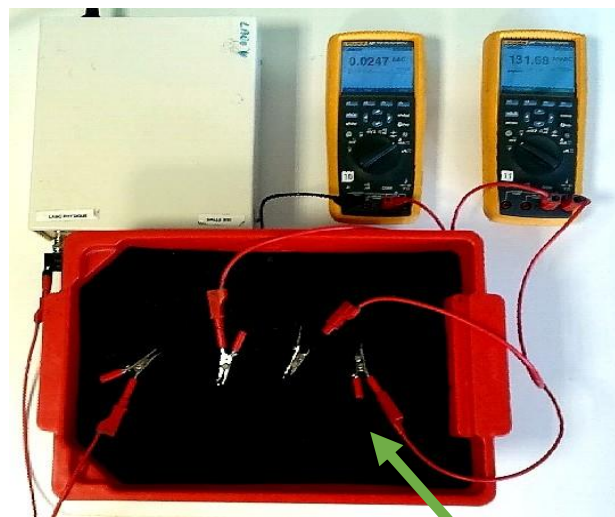
$$32 \cdot 16 \cdot 23 \text{ cm}^3 (\approx 0,12 \text{ m}^3)$$

$\approx \times 8$



17 électrodes
 $d = 4,5 \text{ cm}$

$$80 \cdot 30 \cdot 40 \text{ cm}^3 (\approx 0,96 \text{ m}^3)$$



$$\sigma_{tab} = 40 \text{ m S} \cdot \text{m}^{-1}$$



$$\sigma_{tab} = 70 \text{ m S} \cdot \text{m}^{-1}$$

Terreau

	Petit bac	Grand bac
Terreau seul	$\rho = 51 \pm 3 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (95%)	$\rho = 15 \pm 2 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (95%)
$\sigma = \frac{1}{\rho}$	$\Rightarrow \sigma_{exp} = 20 \pm 1 \text{ m S} \cdot \text{m}^{-1}$ (95%)	$\Rightarrow \sigma_{exp} = 6,7 \pm 0,8 \text{ m S} \cdot \text{m}^{-1}$ (95%)
Terreau + obstacle	$\rho = 128 \pm 7 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (95%)	$\rho = 41 \pm 3 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ (95%)

Expérimentation (Série I)

Contextualisation, problématique

Modélisation

→ Cas homogène,
résistivité apparente

→ Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

→ Dispositif expérimental

→ Influence de différents
paramètres

Traitement informatique

→ Tracé des pseudo-sections

→ Inversion (Res2dinv)

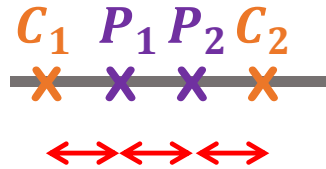
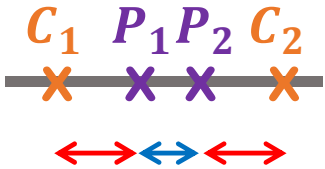
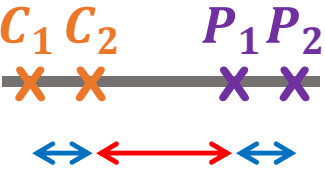
Expérimentation (Série II)

→ Aquifères

→ Obstacles verticaux, horizontaux

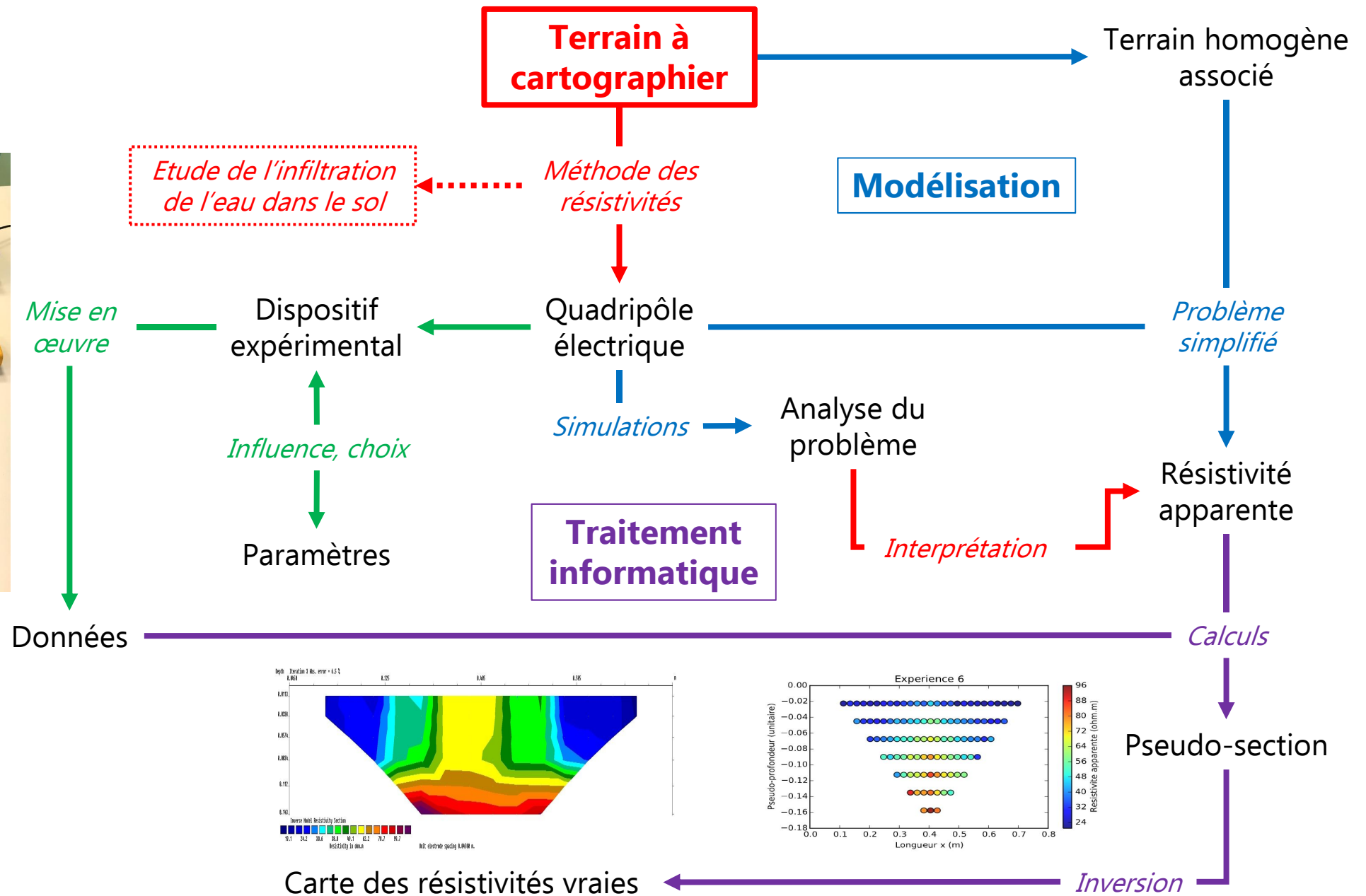
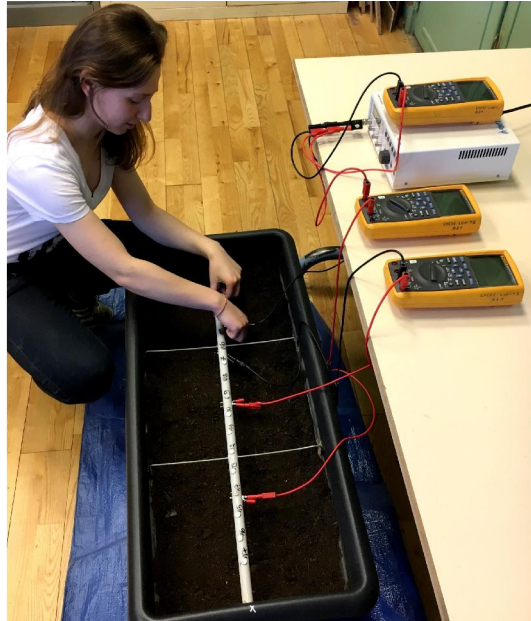
Bilan, conclusion

Configuration du quadripôle

			
Nom	Wenner	Schlumberger	Dipôle - Dipôle
Nombre de points	+	++	+++
Courant	1 à 5 mA	1 à 5 mA	1 μ A
Rapidité de mise en œuvre	+++	++	+

Type de milieu

	Etendue de résistivité
Terre argileuse	180 $\Omega \cdot \text{m}$
Terreau	65 $\Omega \cdot \text{m}$



Traitement informatique

Contextualisation, problématique

Modélisation

→ *Cas homogène, résistivité apparente*

→ *Analyse du problème hétérogène*

Expérimentation (Série I)

→ *Dispositif expérimental*

→ *Influence de différents paramètres*

Traitement informatique

→ *Tracé des pseudo-sections*

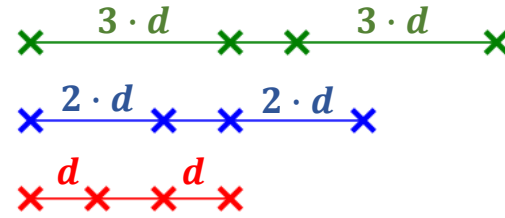
→ *Inversion (Res2dinv)*

Expérimentation (Série II)

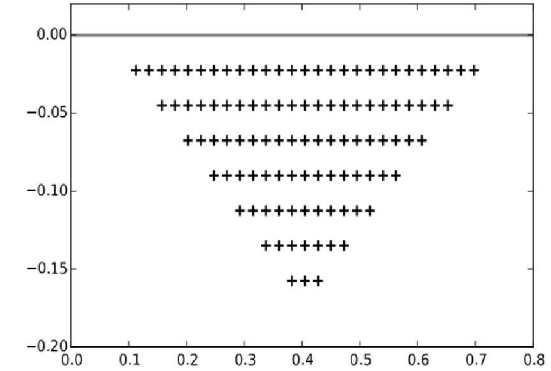
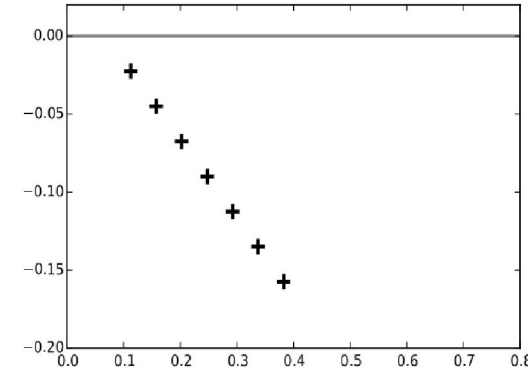
→ *Aquifères*

→ *Obstacles verticaux, horizontaux*

Bilan, conclusion



$n = 1$ +
 $n = 2$ +
 $n = 3$ +



$$x = d \cdot \frac{p_1 + p_2}{2}$$

$$z = -d \cdot \frac{(c_2 - c_1) - (p_2 - p_1)}{4}$$

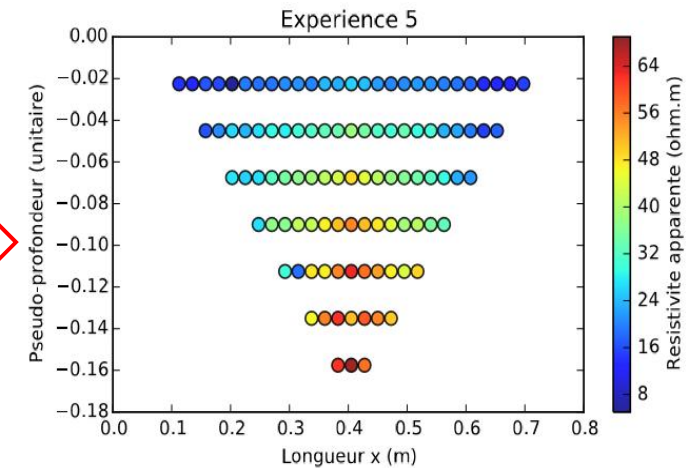
Fichier « .txt » des données

C1	P1	P2	C2	i	V
1	2	16	17	5,58	1620
1	3	15	17	4,92	1000
1	4	14	17	4,3	830
1	5	13	17	4,2	535
1	6	12	17	4,14	420
1	7	11	17	3,77	224
1	8	10	17	4,04	116
2	3	16	17	4	1075
2	4	15	17	4,07	811
2	5	14	17	4,15	618
2	6	13	17	5,29	603
2	7	12	17	5,39	432
2	8	11	17	5,2	231
2	9	10	17	5,11	74
...					

105 points

Traitement de fichiers textes
Affichages graphiques

Programme
(~ 3s)



Traitement informatique

Contextualisation, problématique

Modélisation

- *Cas homogène, résistivité apparente*
- *Analyse du problème hétérogène*

Expérimentation (Série I)

- *Dispositif expérimental*
- *Influence de différents paramètres*

Traitement informatique

- *Tracé des pseudo-sections*

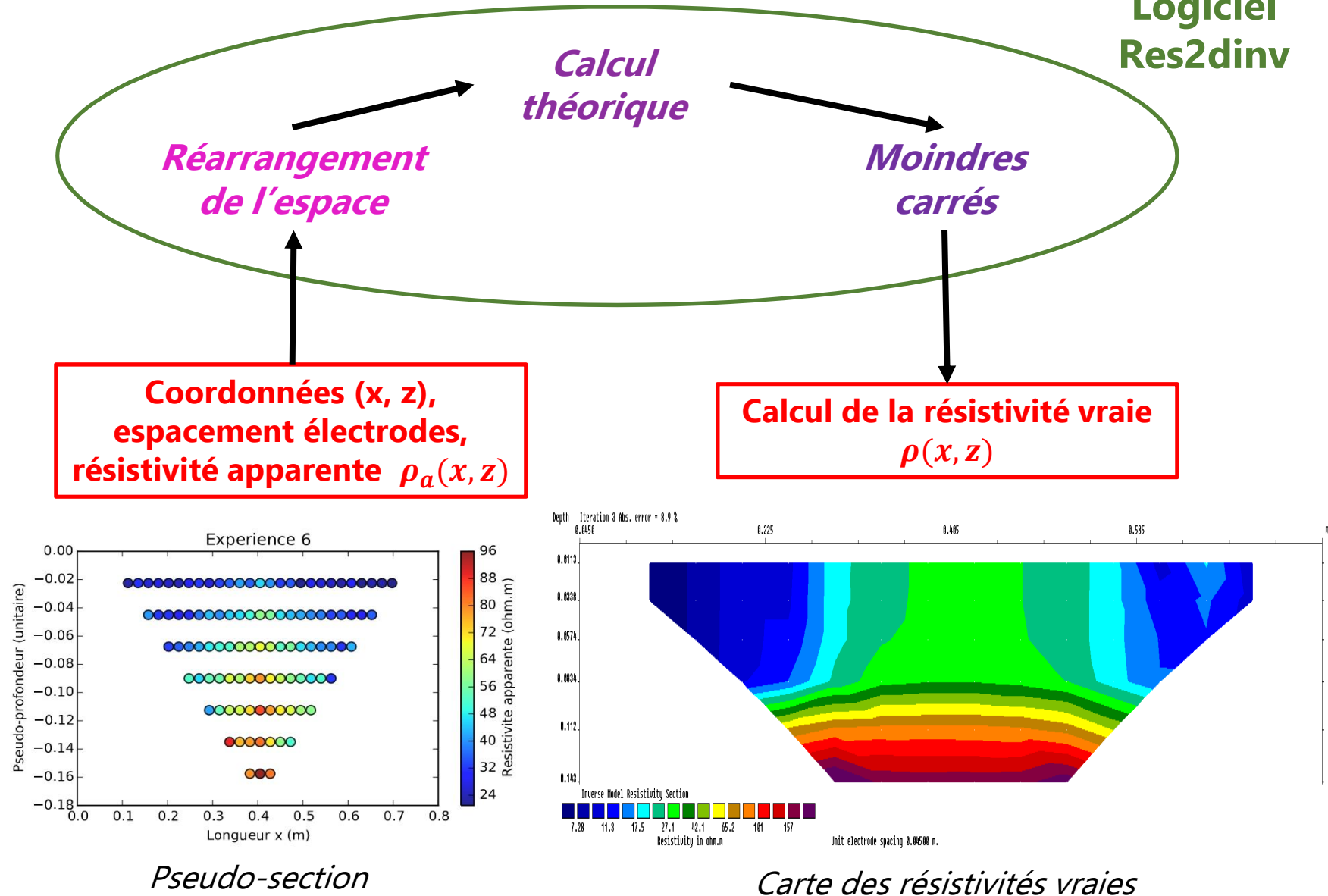
→ Inversion (Res2dinv)

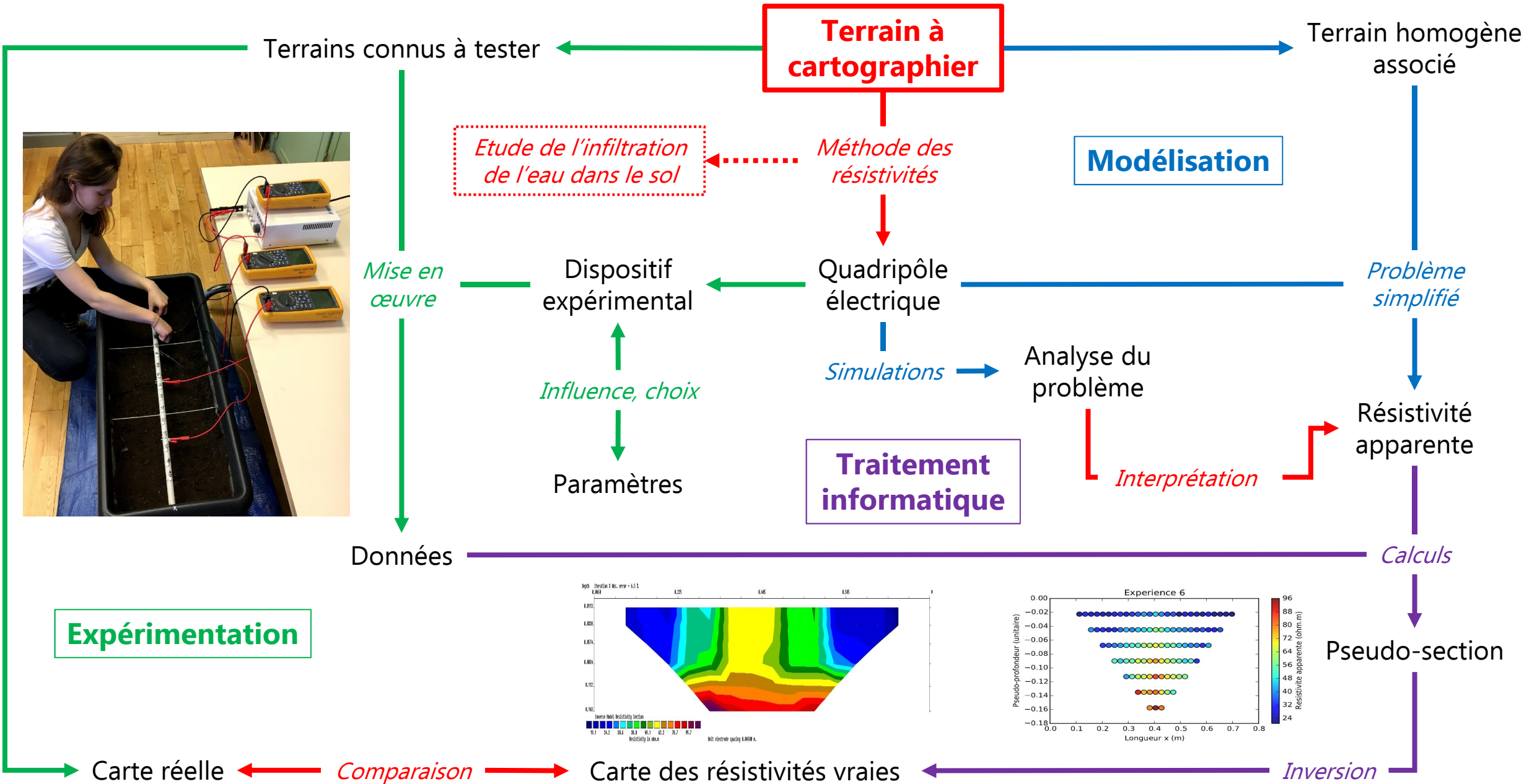
Expérimentation (Série II)

- *Aquifères*
- *Obstacles verticaux, horizontaux*

Bilan, conclusion

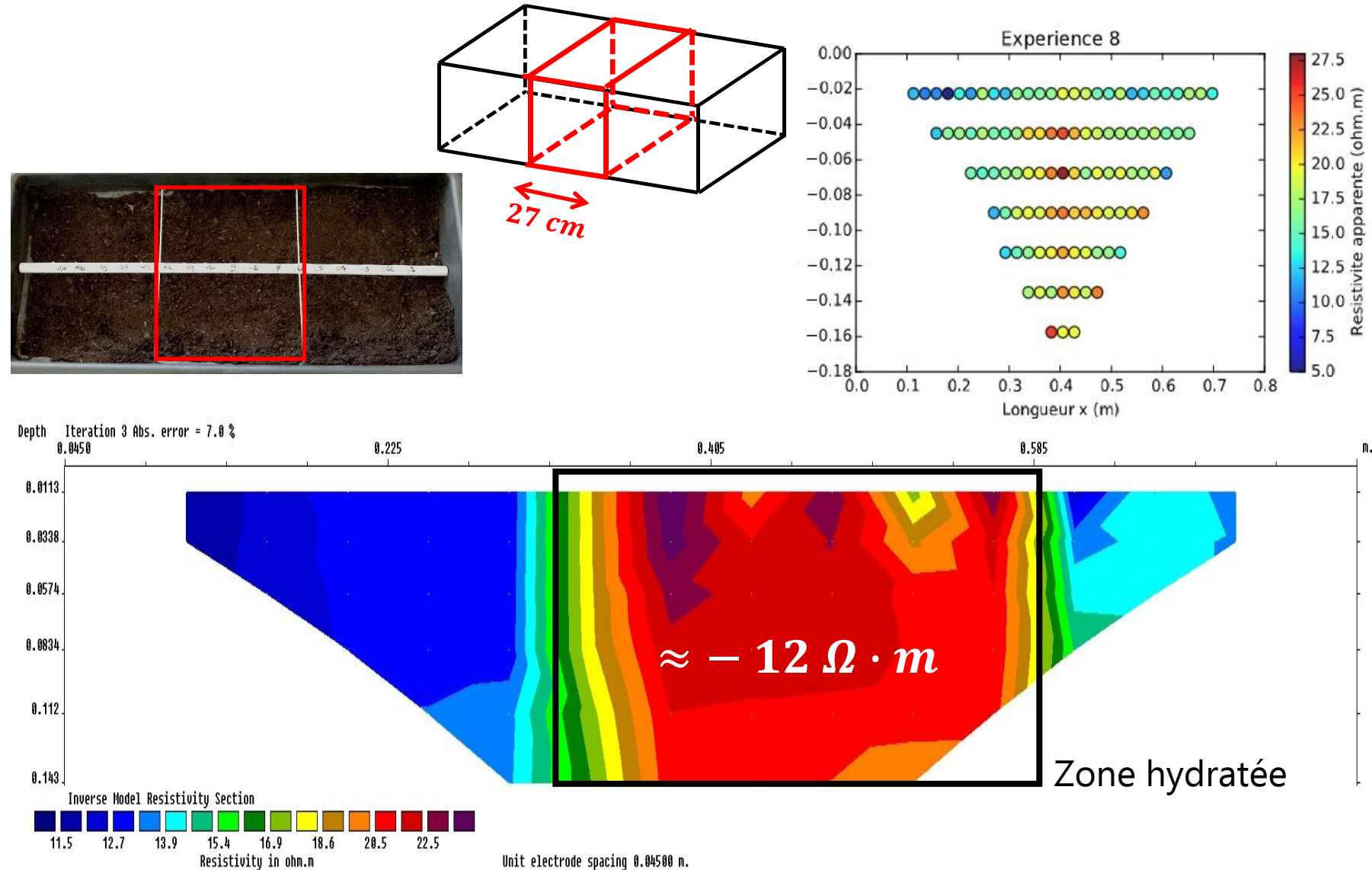
Logiciel
Res2dinv





Expérimentation (Série II)

Essai préalable : zone intensément hydratée entre les électrodes 6 et 12



Contextualisation, problématique

Modélisation

- Cas homogène, résistivité apparente
- Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

- Dispositif expérimental
- Influence de différents paramètres

Traitement informatique

- Tracé des pseudo-sections
- Inversion (Res2dinv)

Expérimentation (Série II)

- Aquifères
- Obstacles verticaux, horizontaux

Bilan, conclusion

Contextualisation, problématique

Modélisation

- *Cas homogène, résistivité apparente*
- *Analyse du problème hétérogène*

Expérimentation (Série I)

- *Dispositif expérimental*
- *Influence de différents paramètres*

Traitement informatique

- *Tracé des pseudo-sections*
- *Inversion (Res2dinv)*

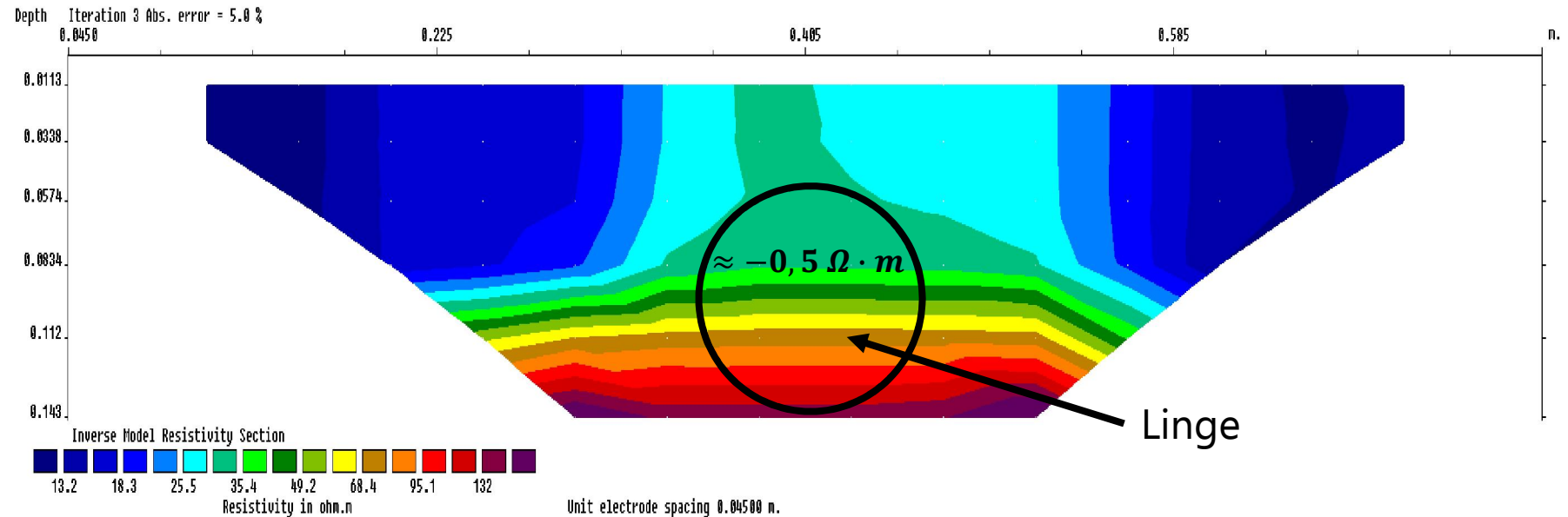
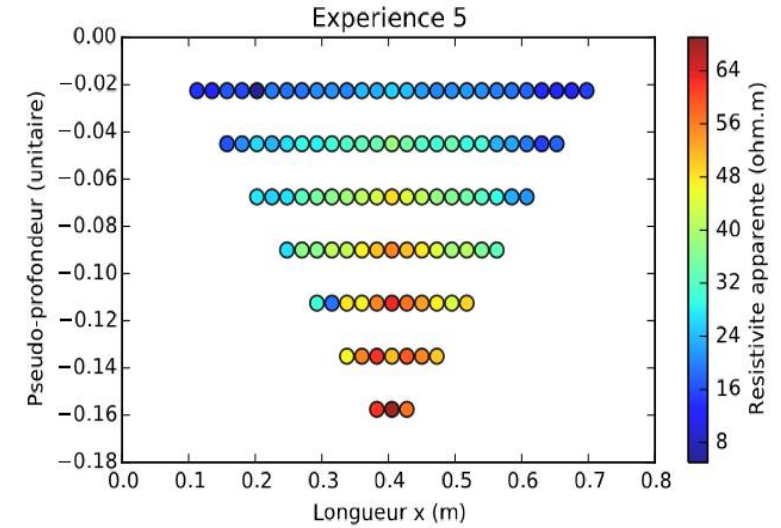
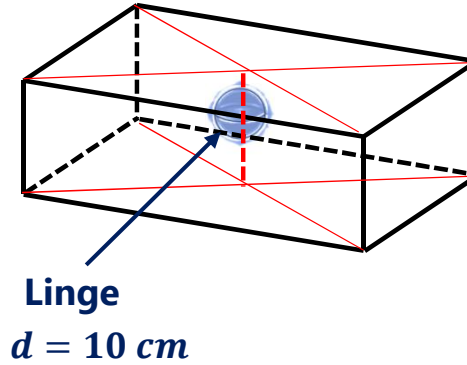
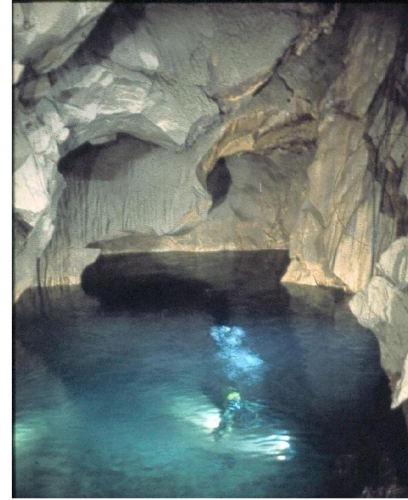
Expérimentation (Série II)

- **Aquifères**
- *Obstacles verticaux, horizontaux*

Bilan, conclusion

Expérimentation (Série II)

Modélisation d'un aquifère : linge hydraté sphérique



Expérimentation (Série II)

Contextualisation, problématique

Modélisation

- Cas homogène, résistivité apparente
- Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

- Dispositif expérimental
- Influence de différents paramètres

Traitement informatique

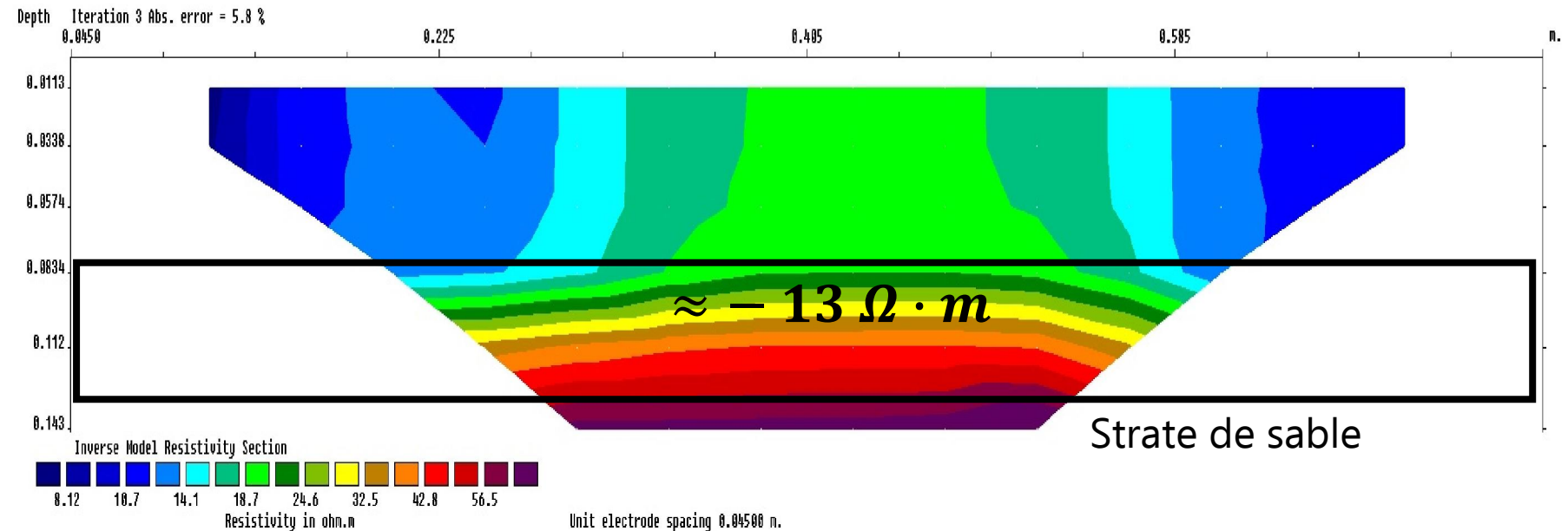
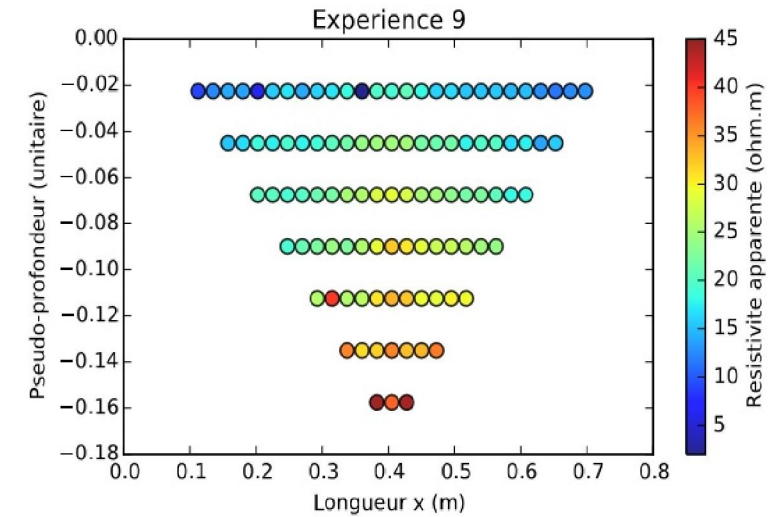
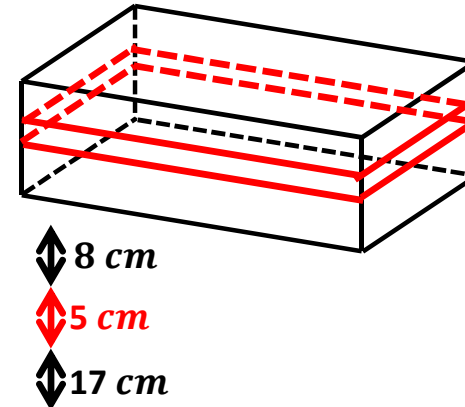
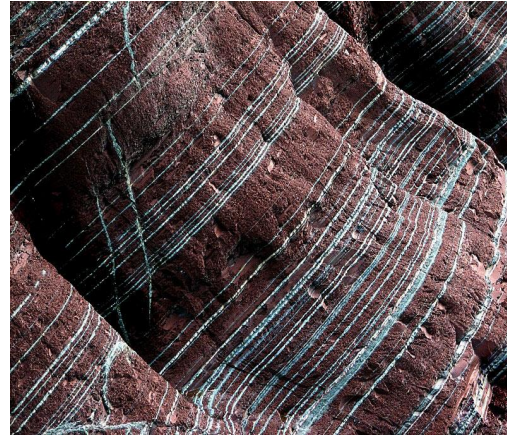
- Tracé des pseudo-sections
- Inversion (Res2dinv)

Expérimentation (Série II)

- Aquifères
- **Obstacles verticaux, horizontaux**

Bilan, conclusion

Strate de sable



Contextualisation, problématique

Modélisation

- Cas homogène, résistivité apparente
- Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

- Dispositif expérimental
- Influence de différents paramètres

Traitement informatique

- Tracé des pseudo-sections
- Inversion (Res2dinv)

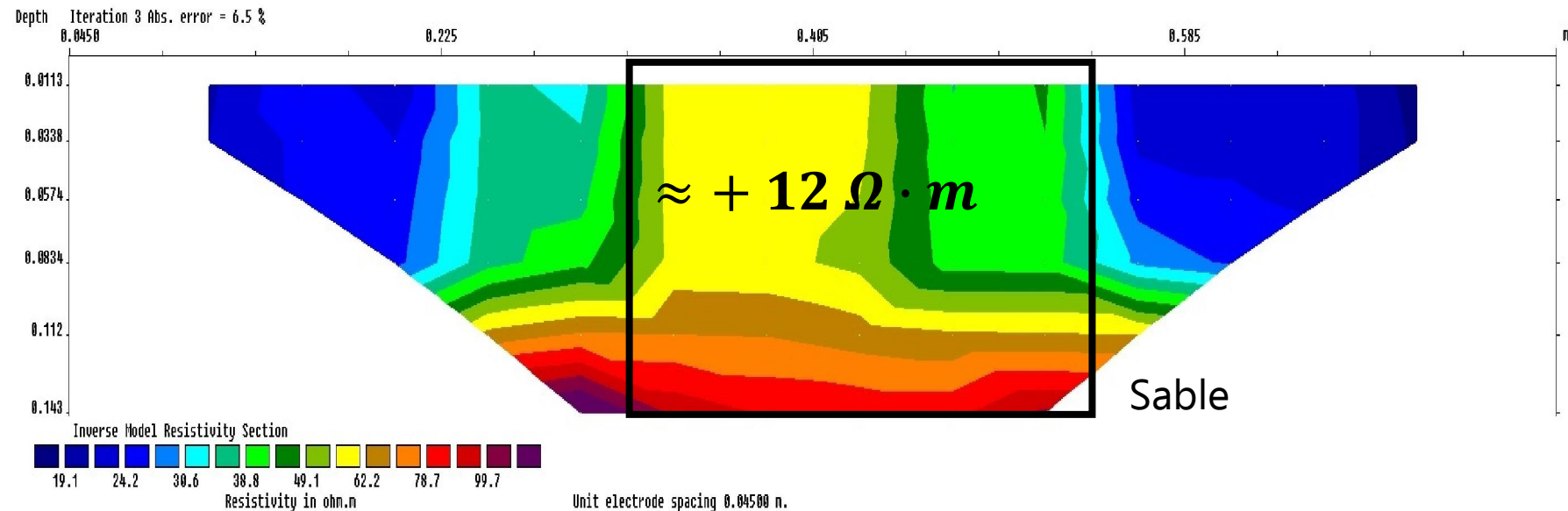
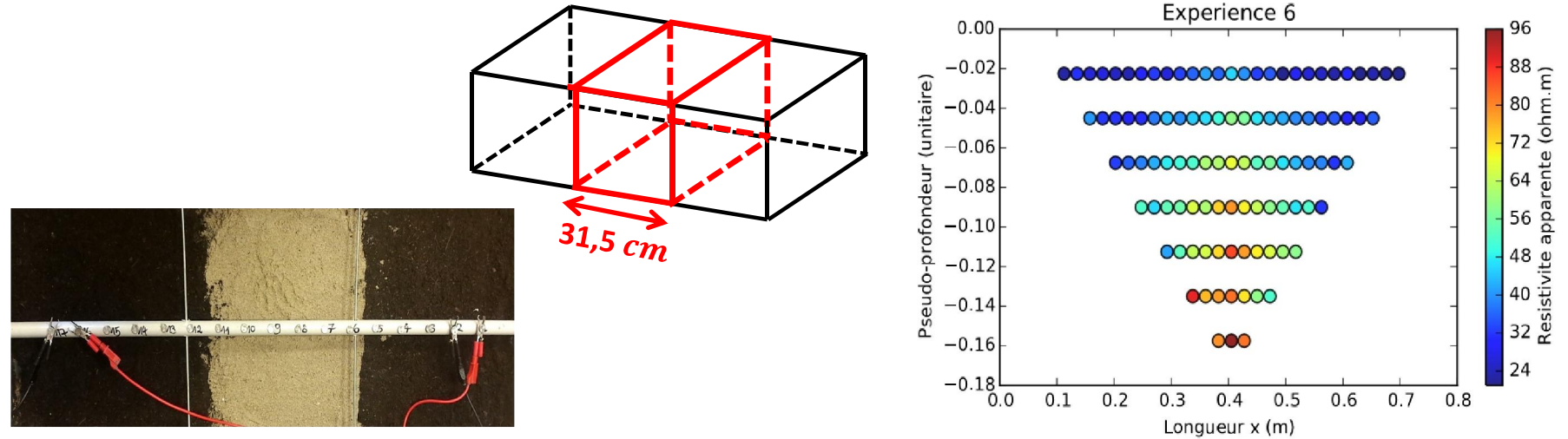
Expérimentation (Série II)

- Aquifères
- **Obstacles verticaux, horizontaux**

Bilan, conclusion

Expérimentation (Série II)

Milieu « vertical » (sable) entre les électrodes 5 et 12



Bilan, conclusion

Contextualisation, problématique

Modélisation

- Cas homogène, résistivité apparente
- Analyse du problème hétérogène

Expérimentation (Série I)

- Dispositif expérimental
- Influence de différents paramètres

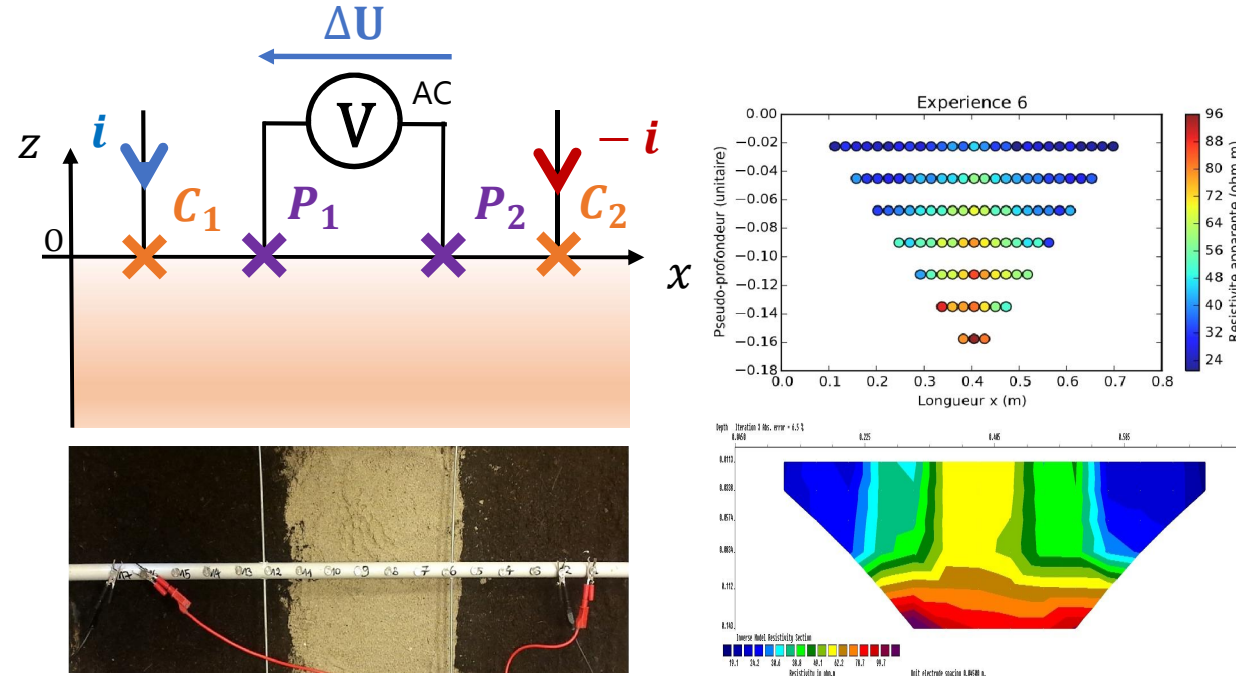
Traitement informatique

- Tracé des pseudo-sections
- Inversion (Res2dinv)

Expérimentation (Série II)

- Aquifères
- Obstacles verticaux, horizontaux

Bilan, conclusion



- Modèle cohérent
- Traitement informatique nécessaire et efficace
- Non homogénéité du terrain sans obstacle

- Profondeur réelle cartographiée $\approx 15 \text{ cm}$, carte fiable sur $\approx 10 \text{ cm}$
- Peu d'interprétation possible des pseudos-sections sans inversion
- Obstacles bien détectés
- Bonne adéquation aux structures verticales

Optimisation de la complexité des fonctions

Utiliser d'autres configurations, augmenter le nombre de points

Conforter les résultats par d'autres méthodes → étude de l'infiltration de l'eau dans le sol

Modélisation

Modélisation

- Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé
- Analogies Electrocinetique / Optique
- Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires
- Programmation des simulations présentées

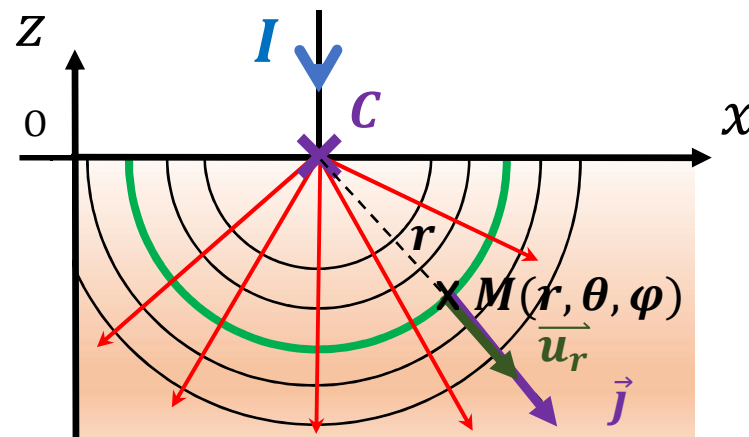
Expérimentation I

- Relevés expérimentaux (taille bac)

Traitement informatique

- Programmation pour le tracé des résistivités apparentes

Sources



- Equipotentielles
- Lignes de champ \vec{E}
- Surface - flux

- Système de coordonnées sphériques $M(r, \theta, \varphi)$
- Invariances : par rotations d'angles θ et φ
- Symétries : plans $(M, \vec{u}_r, \vec{u}_\theta)$ et $(M, \vec{u}_r, \vec{u}_\varphi)$

1. Calcul de flux (1 électrode)

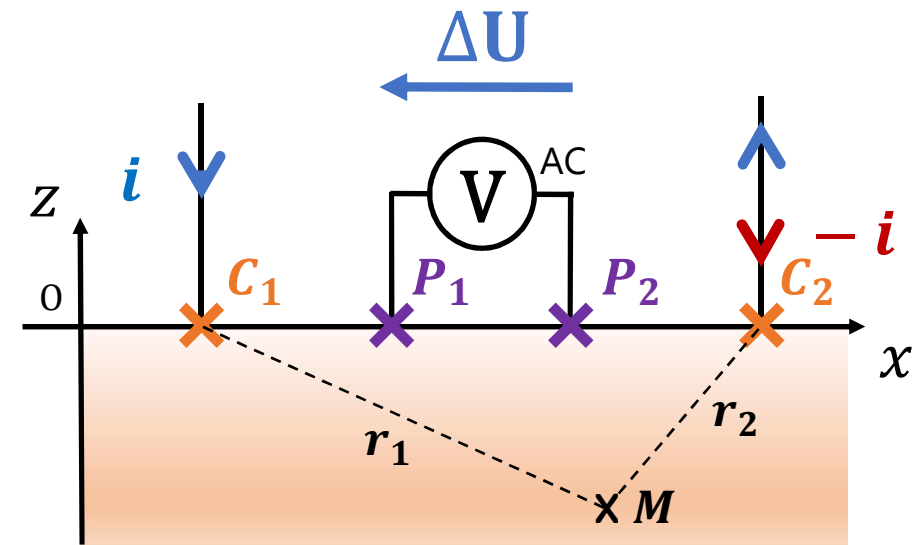
$$I = \Phi_S = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} \quad \text{où} \quad S = \frac{1}{2} \cdot (4 \cdot \pi \cdot r^2)$$

$$\Rightarrow \vec{j} = j(r) \cdot \vec{u}_r = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \cdot \vec{u}_r$$

2. Théorème de superposition (2 électrodes)

$$\vec{j}_{tot} = j(r_1) \cdot \vec{u}_{r_1} + j(r_2) \cdot \vec{u}_{r_2}$$

On peut se placer sur la ligne de champ « directe » (appartenant à (O_x)) car toutes les lignes de champ sont équivalentes (problème homogène).



- Demi-espace infini
- Milieu **H**omogène **L**inéaire **I**sotrope
- $\rho = \text{constante}$ et $i = \text{constante}$

$$\text{Alors : } \vec{u}_{r_1} = \vec{u}_x \quad ; \quad \vec{u}_{r_2} = -\vec{u}_x$$

$$r_1 = (x - OC_1)^2 \quad ; \quad r_2 = (OC_2 - x)^2$$

$$\Rightarrow \vec{j}_{tot} = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{(x - OC_1)^2} + \frac{1}{(OC_2 - x)^2} \right) \cdot \vec{u}_x$$

3. Loi d'Ohm locale et 4. Relation \vec{E} - V

$$\vec{E} = \rho \cdot \vec{j}_{tot} \quad \text{et} \quad \Delta U = - \int_{P_2}^{P_1} \vec{E} \cdot d\vec{x} \cdot \vec{u}_x$$

$$\Rightarrow \Delta U = -\rho \cdot i \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\left[\frac{-1}{(x - OC_1)} \right]_{P_2}^{P_1} + \left[\frac{+1}{(OC_2 - x)} \right]_{P_2}^{P_1} \right)$$

$$\Rightarrow \rho_{app} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta U}{i} \cdot \frac{1}{\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} + \frac{1}{C_2 P_2}}$$

Modélisation

Modélisation

- Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé
- Analogies Electrocinétique / Optique
- Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires
- Programmation des simulations présentées

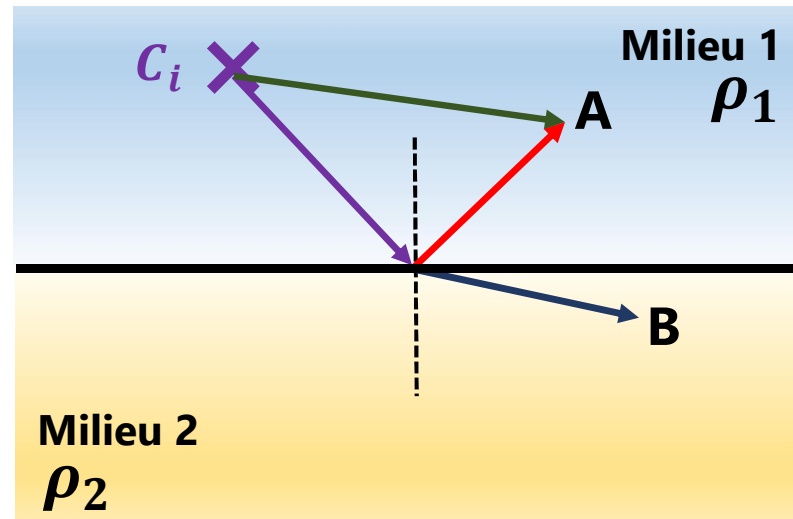
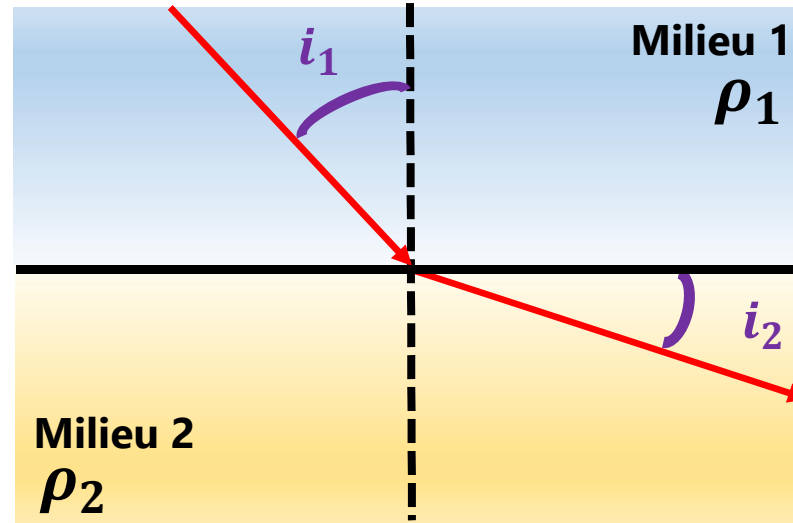
Expérimentation I

- Relevés expérimentaux (taille bac)

Traitement informatique

- Programmation pour le tracé des résistivités apparentes

Sources



Dioptre \Leftrightarrow Interface

Rayon \Leftrightarrow Ligne de champ

Lois de Snell-Descartes

$$n_i = \frac{c}{v} \Leftrightarrow \rho_i = \frac{\vec{E}}{\vec{j}_{tot}}$$

$$n_1 \cdot \sin i_1 = n_2 \cdot \sin i_2 \Leftrightarrow \rho_1 \cdot \sin i_1 = \rho_2 \cdot \sin i_2$$

$$R = \frac{n_2 - n_1}{n_1 + n_2} \Leftrightarrow R = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2} = \frac{V_r}{V_i}$$

$$T = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \Leftrightarrow T = \frac{2\rho_1}{\rho_1 + \rho_2} = \frac{V_t}{V_i}$$

$$\begin{aligned} V_A &= V_i + V_r = V_i \cdot (1+R) \\ V_B &= V_t = T \cdot V_i \end{aligned}$$

$$V_i(\mathbf{x}, z) = \frac{i}{2 \cdot \pi} \cdot \rho(\mathbf{x}, z) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{z^2 + (\mathbf{x} - \mathbf{d}_1)^2}} - \frac{1}{\sqrt{z^2 + (\mathbf{d}_2 - \mathbf{x})^2}} \right)$$

Modélisation

Terrain inhomogène $\Rightarrow \rho = \rho(x, z)$

Modélisation

- Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé
- Analogies Electrocinétique / Optique
- **Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires**
- Programmation des simulations présentées

Expérimentation I

- Relevés expérimentaux (taille bac)

Traitement informatique

- Programmation pour le tracé des résistivités apparentes

Sources

Modèle 1 : méthode analytique

$$\vec{E} = - \overrightarrow{\text{grad}} V$$

$$\vec{E} = \rho \cdot \overrightarrow{j_{tot}} \text{ (Loi d'Ohm)}$$

$$\text{div } \overrightarrow{j_{tot}} = 0 \text{ (Régime stationnaire)}$$

$$\text{div} \left(\frac{1}{\rho} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} V \right) = 0$$

Continuité de V et $\overrightarrow{j_{tot}}$ aux interfaces

Modèle 2 : source de courant fictive

$$\vec{E} = \vec{E}_h + \vec{E}_{\text{créé}} \text{ et } \vec{B} = \vec{B}_h + \vec{B}_{\text{créé}} \text{ (Théorèmes de superposition)}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B}_k = \mu_0 \cdot \overrightarrow{j}_k \text{ (Maxwell-Ampère, régime stationnaire)}$$

$$\vec{E}_k = \rho_k \cdot \overrightarrow{j}_k \text{ (Loi d'Ohm)}$$

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{B}_{\text{créé}} = \mu_0 \cdot \left(\frac{1}{\rho_h} \cdot \vec{E}_{\text{créé}} + \overbrace{\frac{\rho_h - \rho_{\text{créé}}}{\rho_h \cdot \rho_{\text{créé}}} \cdot \vec{E}_h}^{\overrightarrow{j}_{\text{fictif}}} \right)$$

Modélisation

Modélisation

- *Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé*
- *Analogies Electrocinétique / Optique*
- *Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires*
- **Programmation des simulations présentées**

Expérimentation I

- *Relevés expérimentaux (taille bac)*

Traitement informatique

- *Programmation pour le tracé des résistivités apparentes*

Sources

```

96 def potentiel_frontiere_horizontale(x, z, elec_1, elec_2, d_elec, coeff, coeff_obstacle, rho, rho_obstacle, z_frontiere) :
97
98     R=(float(rho_obstacle)-float(rho))/(float(rho_obstacle)+float(rho)) #coefficient de reflexion
99     T=2*float(rho)/(float(rho_obstacle)+float(rho)) #coefficient de transmission
100
101     d1=d_elec*elec_1
102     d2=d_elec*elec_2
103
104     if type(z)==np.ndarray : #Distinction necessaire a cause de la comparaison "if z>z_frontiere"
105
106         array_V=np.zeros((len(x), len(x)))
107
108         for kx in range(len(x)) :
109             for kz in range(len(z)) :
110
111                 r1=np.sqrt(z[kz][0]**2+(x[0][kx]-d1)**2)
112                 r2=np.sqrt(z[kz][0]**2+(d2-x[0][kx])**2)
113
114                 if z[kz][0]>=z_frontiere :
115
116                     la=(x[0][kx]-d1)**2
117                     lb=(d2-x[0][kx])**2
118                     lc=(2*z_frontiere-z[kz][0])**2
119
120                     V_i=coeff*(1/r1-1/r2) #Potentiel incident
121                     V_r=coeff*R*(1/np.sqrt(la+lc)-1/np.sqrt(lb+lc)) #Potentiel reflechi
122
123                     V=V_i+V_r
124                     array_V[kz][kx]=V
125
126                 else :
127
128                     V_t=coeff_obstacle*T*(1/r1-1/r2)
129                     array_V[kz][kx]=V_t
130
131     return(array_V)
132

```

Modélisation

Modélisation

- *Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé*
- *Analogies Electrocinétique / Optique*
- *Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires*
- **Programmation des simulations présentées**

Expérimentation I

- *Relevés expérimentaux (taille bac)*

Traitement informatique

- *Programmation pour le tracé des résistivités apparentes*

```

296 def lignes_de_champ(xmin, xmax, zmin, elec_1, elec_2, d_elec, coeff) : #Methode d'Euler
297
298     liste_z=[(k+1)*(-3) for k in range(7)]
299
300     liste_x=[d_elec*k for k in range(int(elec_1-15), int((elec_2+elec_1)//2+1), 2)]+[d_elec*(k-1) for k in range(int((elec_2+elec_1)//2), int(elec_2+15), 2)]
301
302     L=len(liste_x)*len(liste_z)/2-1
303
304     points_initiaux=[]
305     for x in liste_x :
306         for z in liste_z :
307             points_initiaux.append((x, z))
308
309     for k in range(len(points_initiaux)) :
310
311         x, z=points_initiaux[k]
312
313         while z<0 and z>zmin and x>xmin and x<xmax :
314
315             if k<=L :
316                 pas=-60 #pas negatif
317             else :
318                 pas=60
319
320             Ex, Ez=composantes_E(x, z, elec_1, elec_2, d_elec, coeff)
321
322             while abs(Ex*pas)<0.01 and abs(Ez*pas)<0.01 : #adaptation du pas pour reduire la complexite de l'algorithme
323                 pas=pas*10
324
325             if z+Ez*pas<0 and z+Ez*pas>zmin and x+Ex*pas>xmin and x+Ex*pas<xmax :
326                 plt.plot([x, x+pas*Ex], [z, z+pas*Ez], "blue")
327
328             x=x+pas*Ex
329             z=z+pas*Ez
330

```

Sources

Expérimentation I

Modélisation

- Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé
- Analogies Electrocinétique / Optique
- Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires
- Programmation des simulations présentées

Expérimentation I

- Relevés expérimentaux (taille bac)

Traitement informatique

- Programmation pour le tracé des résistivités apparentes

Sources

Petit bac – Terreau seul

PP [cm]	CP [cm]	K [cm]	ΔU [mV]	i [mA]	ρ [$\Omega \cdot m$]	$2 \cdot u(\rho)$ [$\Omega \cdot m$]
6,00	7,00	7,58	310	2,17	69	3
6,00	5,00	4,58	330	1,96	49	3
6,00	3,00	2,25	490	2,04	34	2

Petit bac – Terreau + obstacle

PP [cm]	CP [cm]	K [cm]	ΔU [mV]	i [mA]	ρ [$\Omega \cdot m$]	$2 \cdot u(\rho)$ [$\Omega \cdot m$]
6,00	7,00	7,58	700	1,79	187	9
6,00	5,00	4,58	770	1,81	123	6
6,00	3,00	2,25	960	1,80	75	4

Grand bac – Terreau seul

PP [cm]	CP [cm]	K [cm]	ΔU [mV]	i [mA]	ρ [$\Omega \cdot m$]	$2 \cdot u(\rho)$ [$\Omega \cdot m$]
9,00	18,00	6,75	147	3,74	17	1
9,00	13,5	7,50	110	3,81	14	1
9,00	9,00	9,00	91	4,09	13	1

Grand bac – Terreau + obstacle

PP [cm]	CP [cm]	K [cm]	ΔU [mV]	i [mA]	ρ [$\Omega \cdot m$]	$2 \cdot u(\rho)$ [$\Omega \cdot m$]
9,00	18,00	6,75	364	3,53	44	2
9,00	13,5	7,50	334	3,40	42	2
9,00	9,00	9,00	283	4,21	38	2

	Petit bac	Grand bac
Terreau seul	$\rho = 51 \pm 3 \Omega \cdot m$ (95%)	$\rho = 15 \pm 2 \Omega \cdot m$ (95%)
	$\Rightarrow \sigma_{exp} = 20 \pm 1 m S \cdot m^{-1}$ (95%)	$\Rightarrow \sigma_{exp} = 67 \pm 8 m S \cdot m^{-1}$ (95%)
Terreau + obstacle	$\rho = 128 \pm 7 \Omega \cdot m$ (95%)	$\rho = 41 \pm 3 \Omega \cdot m$ (95%)

Incertitudes (type B) : $u(PP) = u(CP) = 0,03 cm$

$u(\Delta U) = 1 \text{ à } 3 mV$ et $u(i) = 0,04 \text{ à } 0,05 mA$ (Multimètre Fluke 287)

Traitement informatique

Modélisation

- Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé
- Analogies Electrocinétique / Optique
- Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires
- Programmation des simulations présentées

Expérimentation I

- Relevés expérimentaux (taille bac)

Traitement informatique

- Programmation pour le tracé des résistivités apparentes

Sources

```

57 #####
58 # Recuperation des donnees de coordonnees, de courant et potentiel associes ##
59 #####
60
61 def releve_mesures_experience(numero_experience) :
62
63     fichier_donnees=open("experience_"+str(numero_experience)+".txt", "r")
64     nombre_mesures=len(fichier_donnees.readlines())-18
65     fichier_donnees.close()
66
67     fichier_donnees=open("experience_"+str(numero_experience)+".txt", "r")
68     for k in range(18) :
69         fichier_donnees.readline()
70
71     releve_mesures=[]
72     for k in range(nombre_mesures) :
73         ligne=fichier_donnees.readline()
74         ligne=ligne.rstrip("\n")
75         sep_colonnes=[float(ligne.split("\t")[i]) for i in range(1,5)]
76         courant_str_fichier=str(ligne.split("\t")[5])
77         potentiel_str_fichier=str(ligne.split("\t")[6])
78         courant_str=""
79         potentiel_str=""
80         for i in range(len(courant_str_fichier)) :
81             if courant_str_fichier[i]=="," :
82                 courant_str=courant_str+"."
83             else :
84                 courant_str=courant_str+courant_str_fichier[i]
85         for i in range(len(potentiel_str_fichier)) :
86             if potentiel_str_fichier[i]=="," :
87                 potentiel_str=potentiel_str+"."
88             else :
89                 potentiel_str=potentiel_str+potentiel_str_fichier[i]
90         sep_colonnes=sep_colonnes+[float(courant_str), float(potentiel_str)]
91         positions_electrodes=(sep_colonnes[0], sep_colonnes[1], sep_colonnes[2], sep_colonnes[3])
92         mesures=[positions_electrodes, sep_colonnes[4], sep_colonnes[5]]
93         releve_mesures.append(mesures)
94
95     fichier_donnees.close()
96     return(releve_mesures) #[ (C1, P1, P2, C2), courant en mA, tension en mV]
97
98

```

Traitement informatique

Modélisation

- *Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé*
- *Analogies Electrocinétique / Optique*
- *Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires*
- *Programmation des simulations présentées*

Expérimentation I

- *Relevés expérimentaux (taille bac)*

Traitement informatique

- **Programmation pour le tracé des résistivités apparentes**

```

229 #####
230 # Affichage de la carte des pseudos-sections #####
231 #####
232
233 def partie_entiere(x) :
234     if x<0 :
235         return(int(x)-1)
236     else :
237         return(int(x)+1)
238
239 def affichage_pseudo_section(numero_experience, abscisses, ordonnees, valeurs_resistivites, temoin=False) :
240
241     plt.subplot(111)
242
243     if temoin==False :
244         plt.suptitle("Resistivite apparente selon la region", fontsize=16)
245         titre_pdf="Carte_resistivite_experience_"+str(numero_experience)+".pdf"
246         plt.title("Experience "+str(numero_experience))
247
248     else :
249         plt.suptitle("Differences de resistivites apparentes selon la region (ohm.m)", fontsize=16)
250         titre_pdf="Carte_differences_resistivites_apparentes_experience_"+str(numero_experience)+"avec_experience_temoin_"+str(temoin)+".pdf"
251         plt.title("Experience "+str(numero_experience)+ " (experience temoin "+str(temoin)+")")
252
253     mini=partie_entiere(min(valeurs_resistivites))
254     maxi=partie_entiere(max(valeurs_resistivites))
255
256     plt.scatter(abscisses, ordonnees, s=50, c=valeurs_resistivites, alpha=0.85, vmin=mini, vmax=maxi)
257     legende = plt.colorbar(orientation="vertical")
258     legende.set_label("Resistivite apparente (ohm.m)", rotation=90)
259     plt.xlabel("Longueur x (m)")
260     plt.ylabel("Pseudo-profondeur (unitaire)")
261
262     plt.subplots_adjust(top=0.8)
263     plt.savefig(titre_pdf)
264     plt.show()
265

```

Sources

Sources

Modélisation

- *Expression de la résistivité apparente : calcul détaillé*
- *Analogies Electrocinétique / Optique*
- *Modélisation du problème hétérogène : deux méthodes calculatoires*
- *Programmation des simulations présentées*

Expérimentation I

- *Relevés expérimentaux (taille bac)*

Traitement informatique

- *Programmation pour le tracé des résistivités apparentes*

[1] Cédric PANISSOD : Prospection électrique et électrostatique à faible profondeur à l'aide de systèmes multipôles permettant la description directe des structures en 3-D, thèse de doctorat de l'Université de Paris 6, spécialité mécanique des sols – géophysique, sous la direction de Alain TABBAGH, soutenue le 30 octobre 1997

[2] Olivier GUERRERO : Comparaison et couplage des méthodes géophysique pour l'amélioration des reconnaissances des sols dans les projets géotechniques en milieu périurbain, thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux, spécialité mécanique, sous la direction de Denys BREYSSE, soutenue le 1er juillet 2014

[3] I. COUSIN, A. BESSON, M. SEGER, G. GIOT, G. RICHARD, D. KING : L'apport des méthodes géophysiques au service de la caractérisation de la fertilité des sols, INRA, 2012

[4] J.C. BOTTRAUD, M. BORNAUD, E. SERVAT : Mesure de résistivité et étude du comportement agronomique d'un sol, Association Française Pour l'Etude Du Sol (AFES), 2010 : http://www.afes.fr/afes/sds/SDS_22_4_p295_BOTTRAUD.PDF (visité en janvier 2017)

[5] J-F. GIRARD, J-M. MIEHE, N. COPPO, B.AUNEY : Méthodologie d'imagerie électrique haute résolution des aquifères côtiers en milieu volcanique à La Réunion, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Office de l'Eau de La Réunion, 2008 : <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56612-FR.pdf> (visité en janvier 2017)

[6] Tomographie de la résistivité électrique (ERT), Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) : <http://step.ipgp.fr/images/f/f9/FicheERT.pdf> (visité en octobre 2016)

[7] Cours de géophysique sur la prospection électrique de surface, par l'Université de Lausanne et l'Institut Français du Pétrole : http://www-ig.unil.ch/cours/c_prof.htm (visité en mars 2017)

Photographies utilisées

1 : <http://www.english-heritage.org.uk/> (Maiden Castle)

15 : <http://planet-terre.ens-lyon.fr> (aquifère)

16 : <http://www.geologues-prospecteurs.fr/> (strates)