

Estimation de la distribution de potentiel électrique le long d'un tubage métallique de puits à partir d'un profil de potentiel spontané en surface

Alexis Maineult

Introduction: potentiels spontanés (PS)

Potentiels spontanés: potentiels électriques naturellement présents dans la subsurface

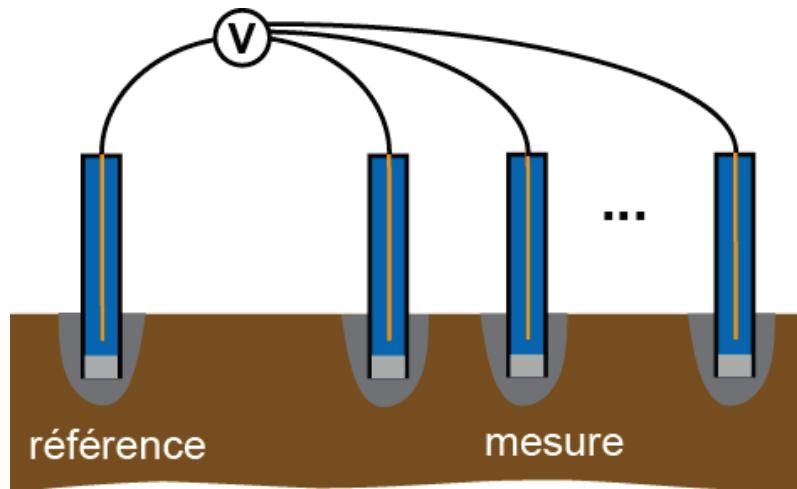
Origine:

- écoulements en milieux poreux (électrocinétique)
- gradients de concentration (potentiel de jonction)
- gradients redox
- gradients de température (electrothermique)
- effet piézoélectrique?
- courants telluriques / courants anthropiques

Cas des corps métalliques:

- phénomènes de géo-batterie (pile)
- corrosion

Introduction: mesure de PS



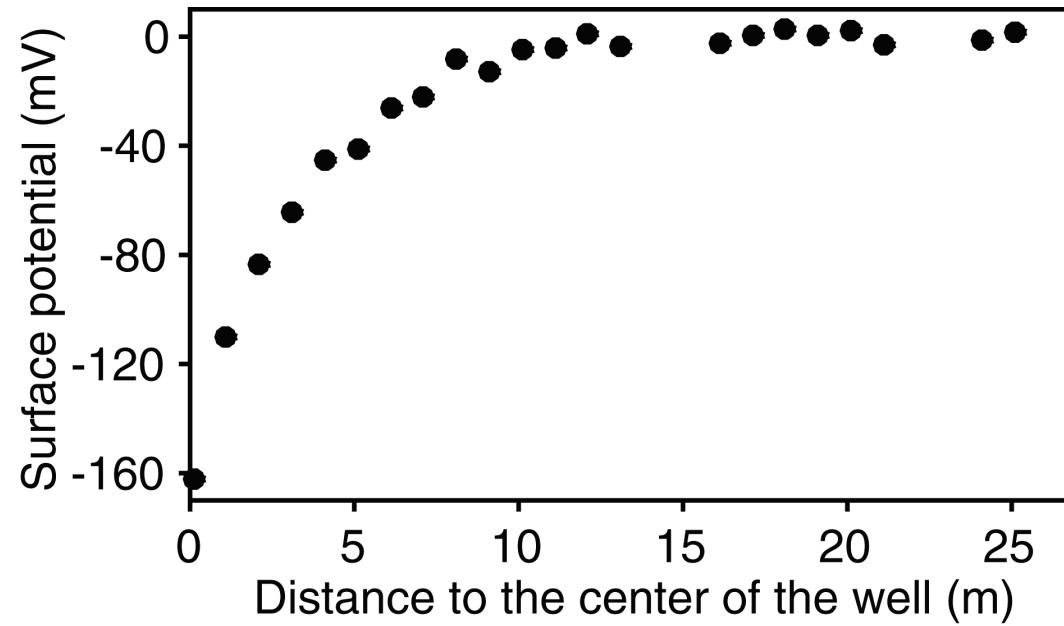
⇒ ΔV entre électrode de mesure (mobile) et électrode de référence (fixe)

⇒ cartographie / profils

- Méthode:
- passive
 - non-intrusive
 - facile à mettre en place
 - couverture dense du terrain d'étude
 - de faible coût

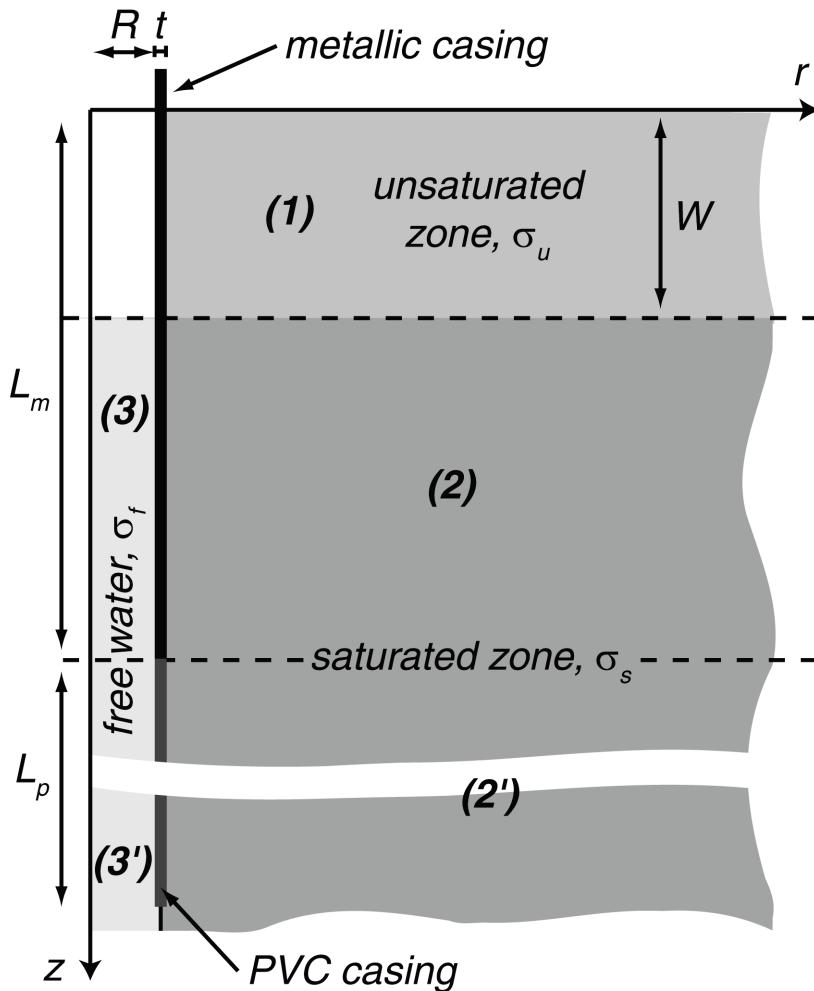
Mais signaux faibles / bruités et interprétation souvent difficile

Introduction: mesure en surface près d'un tubage métallique



⇒ Est-il possible de retrouver la distribution de potentiel le long du tubage métallique à partir de ce profil de PS?

Modèle de terrain:



Problème direct:

Equation de Poisson:

$$\Delta V(r, z) = \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial z^2} = 0$$

dans tout l'intérieur du domaine.

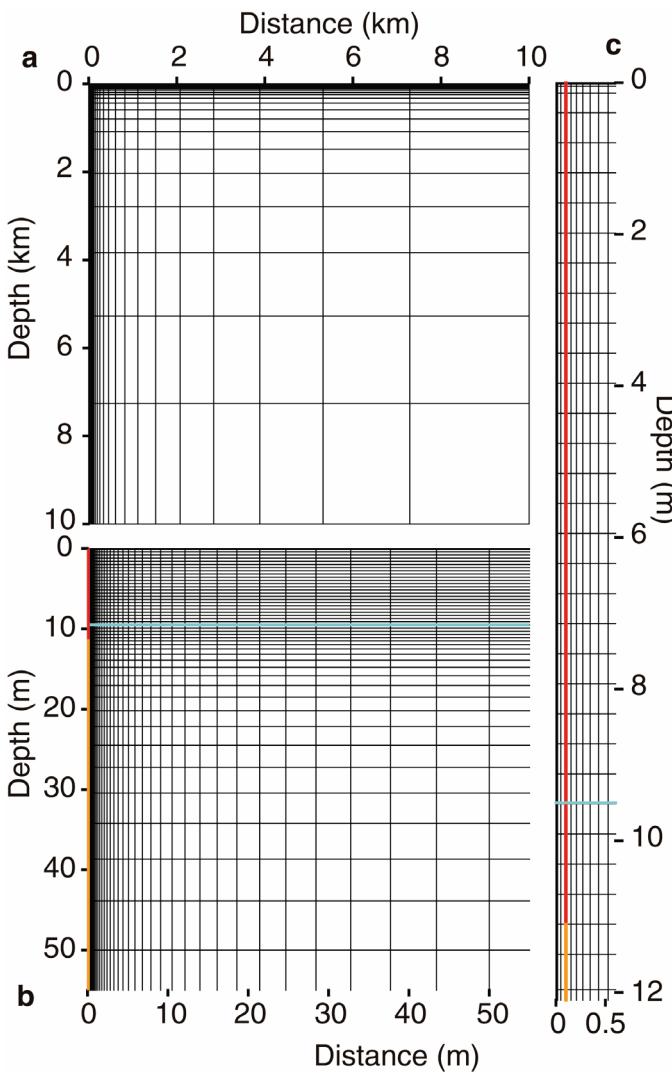
Condition aux limites:

- pas de flux sortant vers l'air,
- potentiel nul à l'infini,
- symétrie radiale,
- potentiel fixé sur tubage métallique,
- flux normal nul sur le tubage PVC.

Au niveau du toit de la nappe:

$$\Delta V(r, z) = \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial V(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 V(r, z)}{\partial z^2} + \frac{\partial \ln \sigma(r, z)}{\partial z} \frac{\partial V(r, z)}{\partial z} = 0$$

Discrétisation par différences finies



Equation de Poisson

$$\frac{1}{dz_{j-1}} \left(\frac{1}{dz_{j-1}} + \frac{1}{dz_j} \right) V_{i,j-1} + \frac{1}{dr_{i-1}} \left[\left(\frac{1}{dr_{i-1}} + \frac{1}{dr_i} \right) - \frac{1}{r_i} \right] V_{i-1,j} \\ + \left[-\left(\frac{1}{dr_{i-1}} + \frac{1}{dr_i} \right)^2 + \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{dr_{i-1}} - \frac{1}{dr_i} \right) - \left(\frac{1}{dz_{j-1}} + \frac{1}{dz_j} \right)^2 \right] V_{i,j} \\ + \frac{1}{dr_i} \left[\left(\frac{1}{dr_{i-1}} + \frac{1}{dr_i} \right) + \frac{1}{r_i} \right] V_{i+1,j} + \frac{1}{dz_j} \left(\frac{1}{dz_{j-1}} + \frac{1}{dz_j} \right) V_{i,j+1} = 0$$

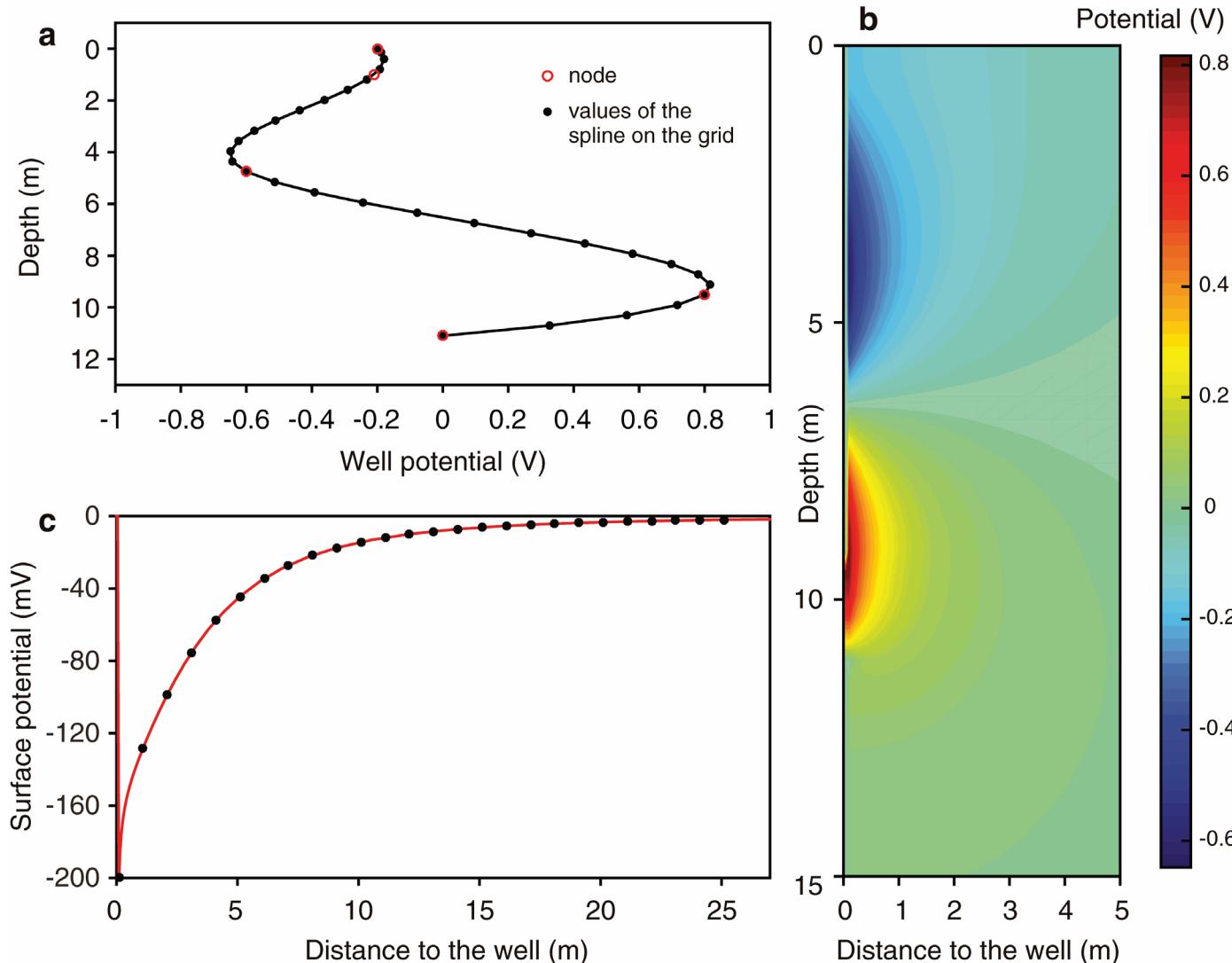
+ conditions aux limites...

Au final:

$$V = M^{-1}S$$

avec S terme source sur le puits (spline définie par un nombre donné de nœuds)

Problème direct: cas synthétique



Problème « inverse »

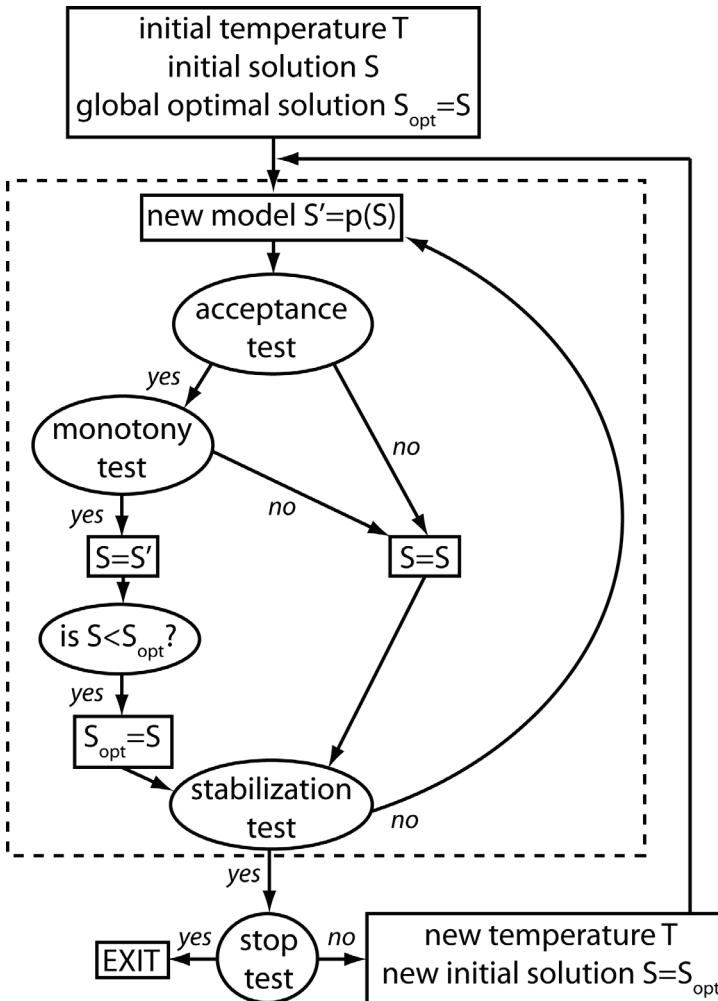
$$\mathbf{V} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{S}$$

⇒ trouver \mathbf{S} qui prédit le potentiel \mathbf{V} donnant en surface un profil le plus proche possible du profil observé.

« Trouver \mathbf{S} » = trouver l'ensemble de nœuds de la spline $[z_k, V_k]$, $k=1\dots N$ (N inconnu)

N est fixé a priori, comme les profondeurs des nœuds. Il reste donc à déterminer les N valeurs V_k .

Exploration de l'espace des sources par recuit simulé



Test d'acceptation:

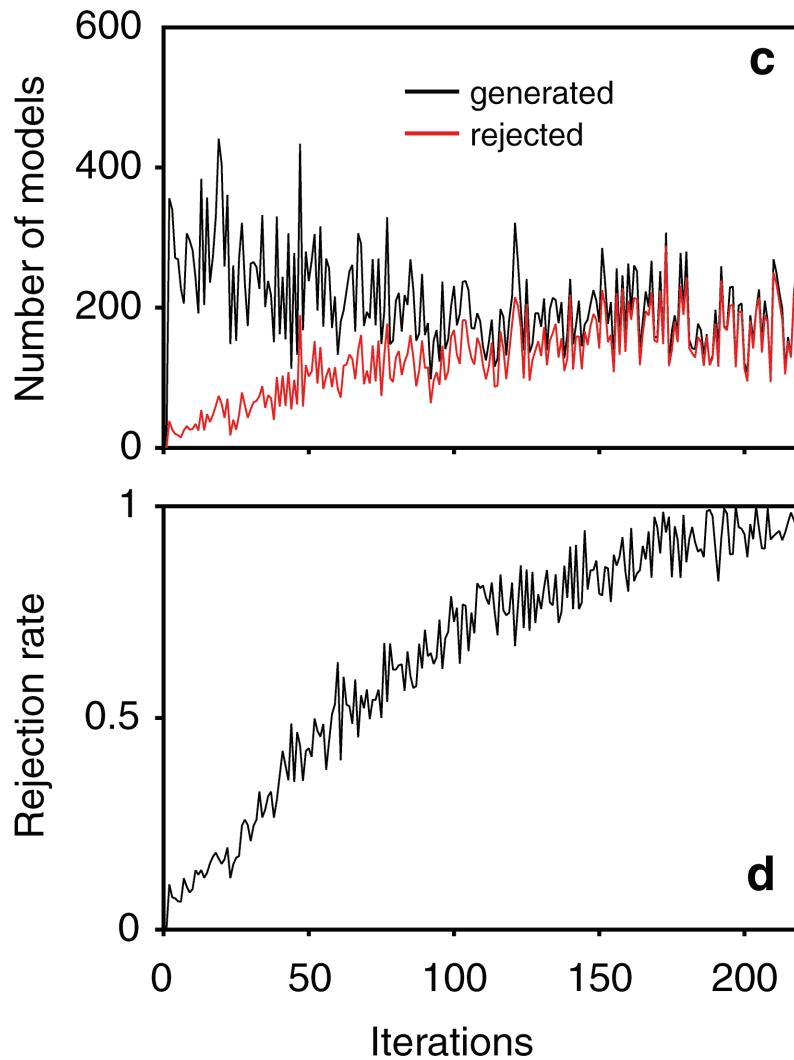
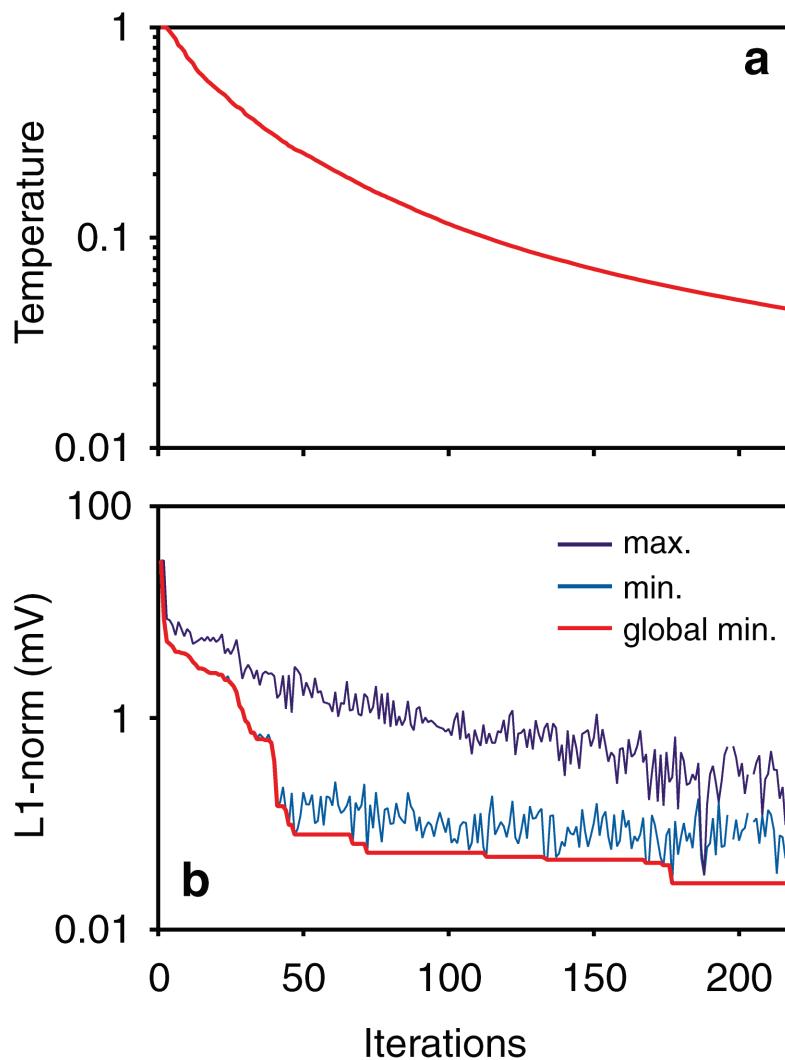
$$A = \min \left(\exp \left(-\frac{F(S') - F(S)}{T} \right), 1 \right)$$

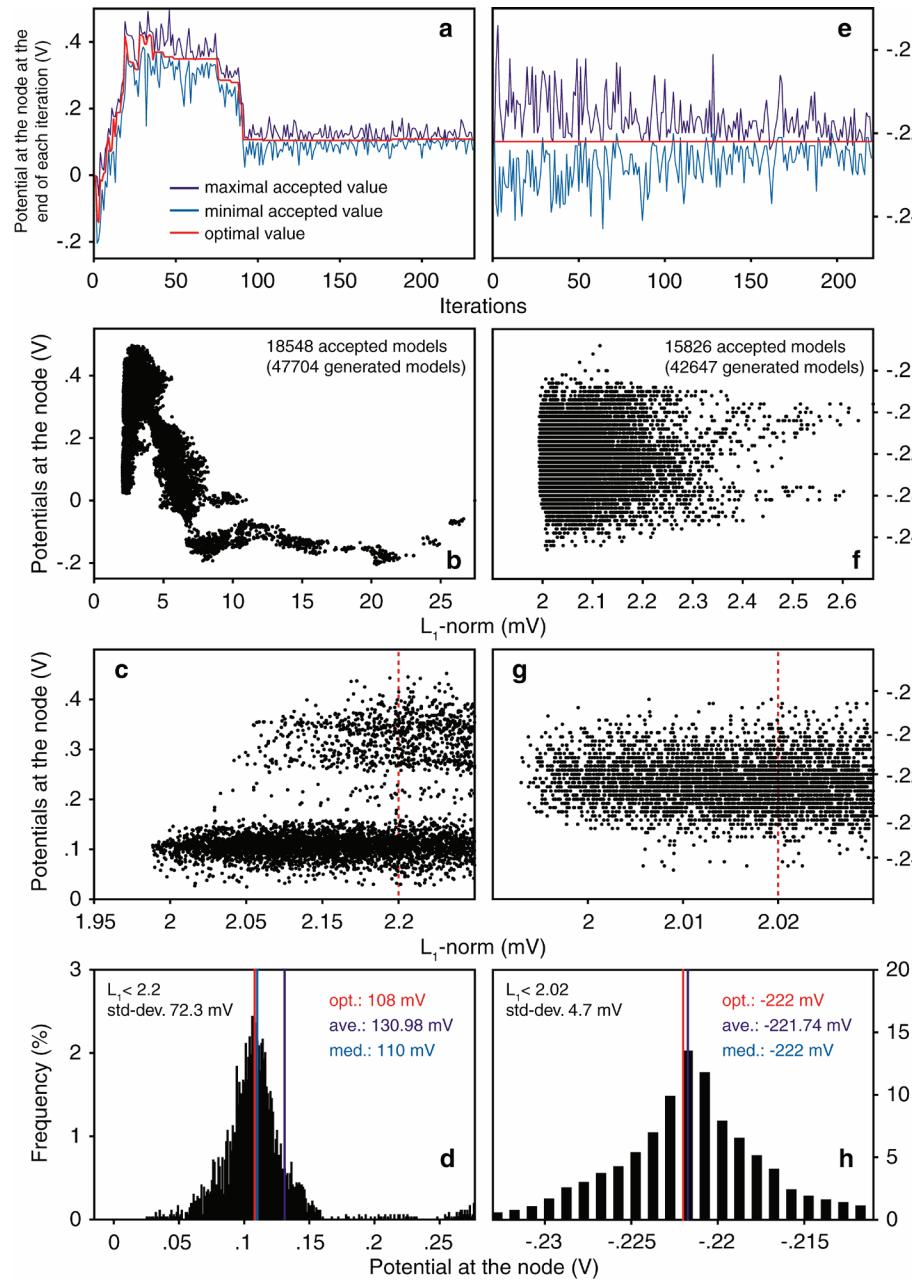
F fonction coût

- Un nombre h est tiré entre 0 et 1
- Si $h \leq A$, acceptation (automatique si le nouveau modèle est meilleur)
- Si $h > A$, rejet

Le recuit simulé permet donc d'accepter des modèles moins bons pour sortir des minima locaux.

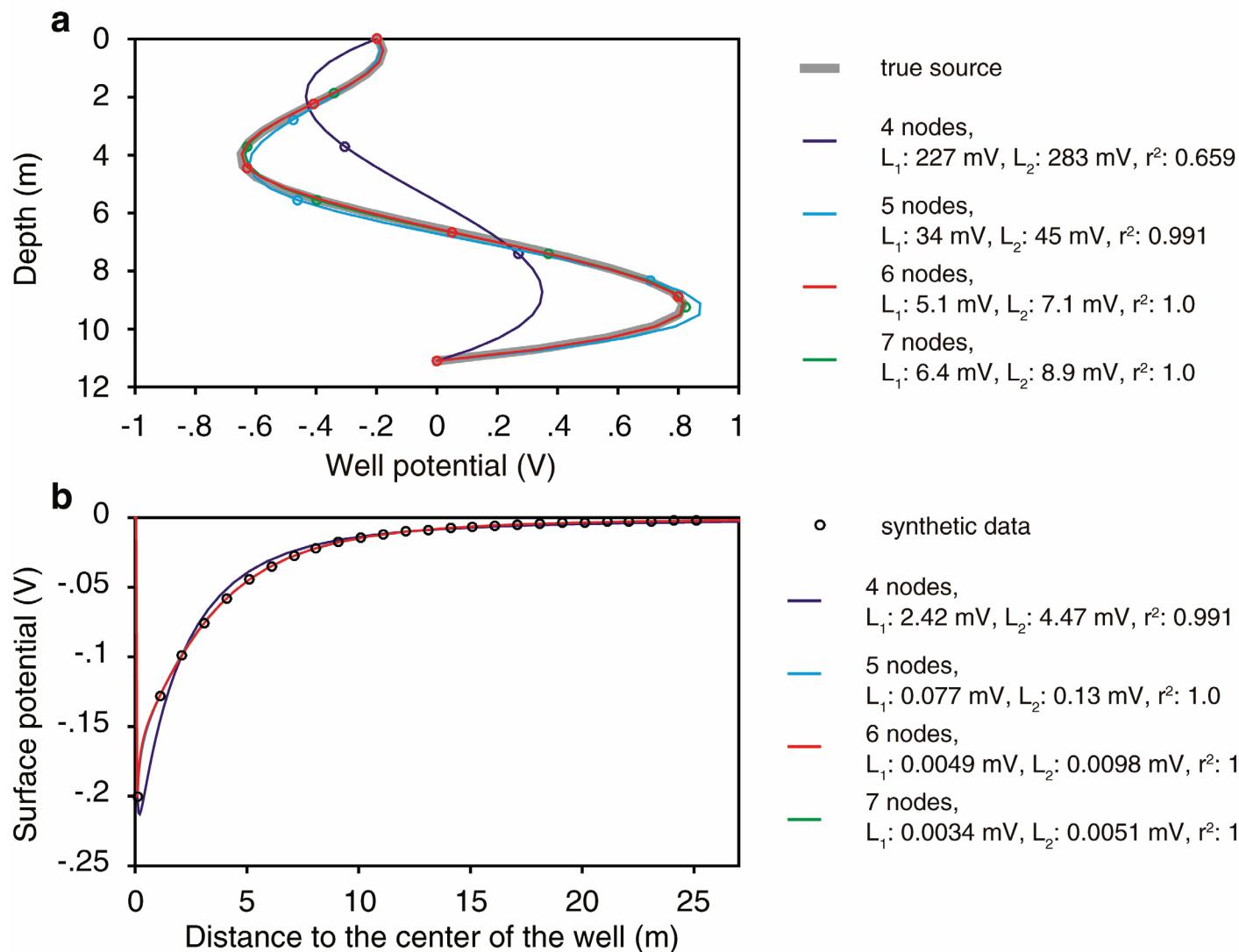
Recuit simulé: décroissance de la fonction coût



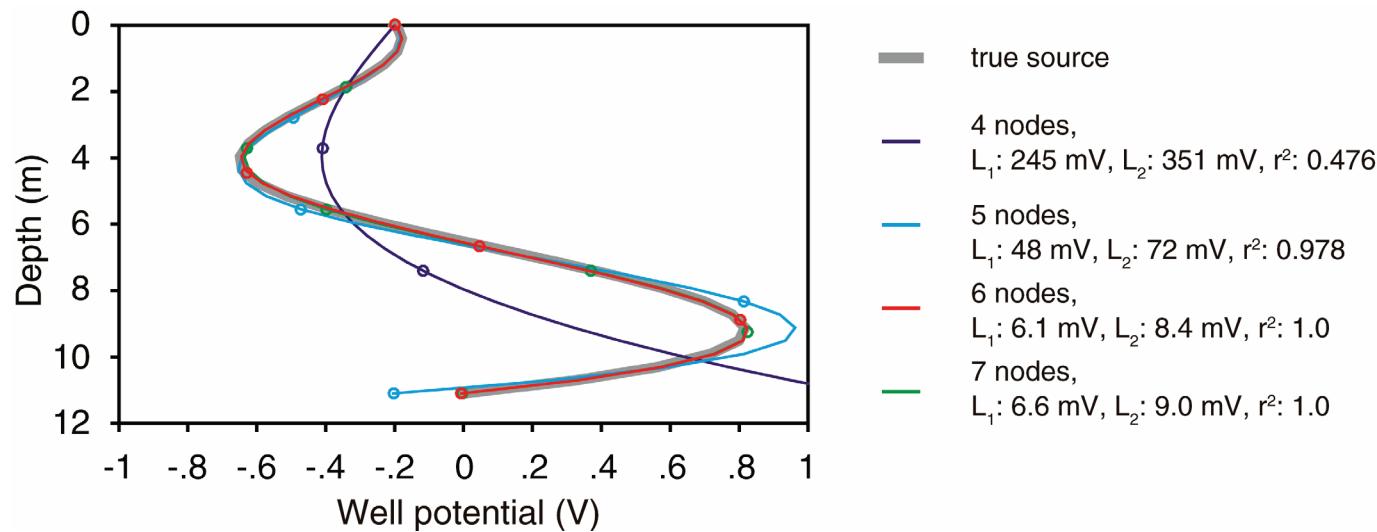


Recuit simulé: évolution du potentiel à un nœud

Application au cas synthétique (1), dernier nœud fixé à 0

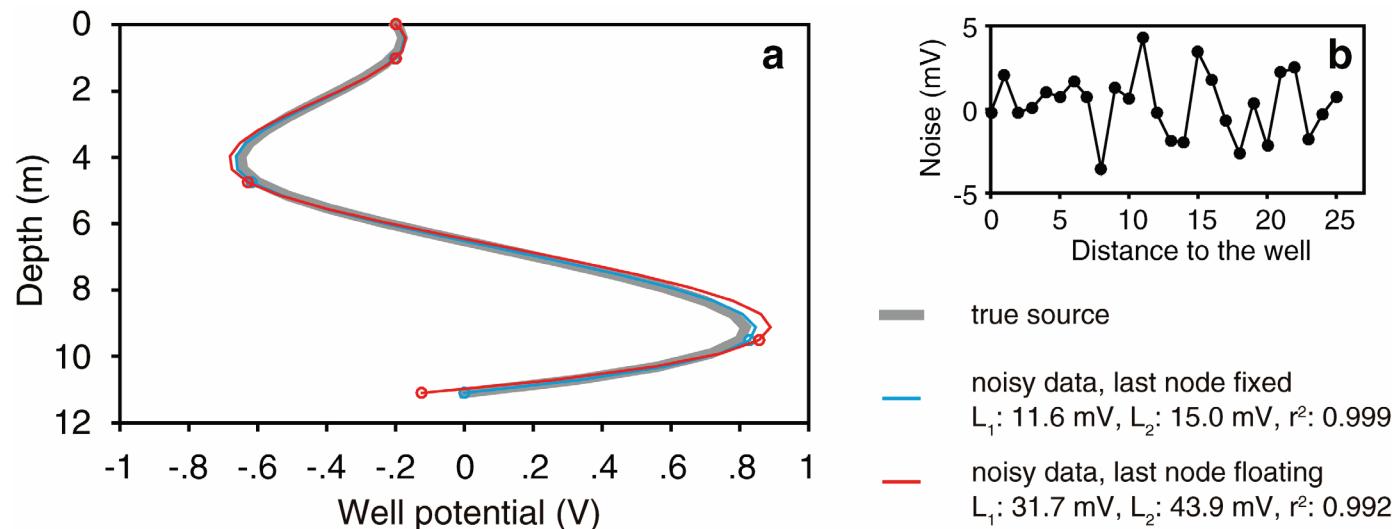


Application au cas synthétique (2), dernier nœud flottant



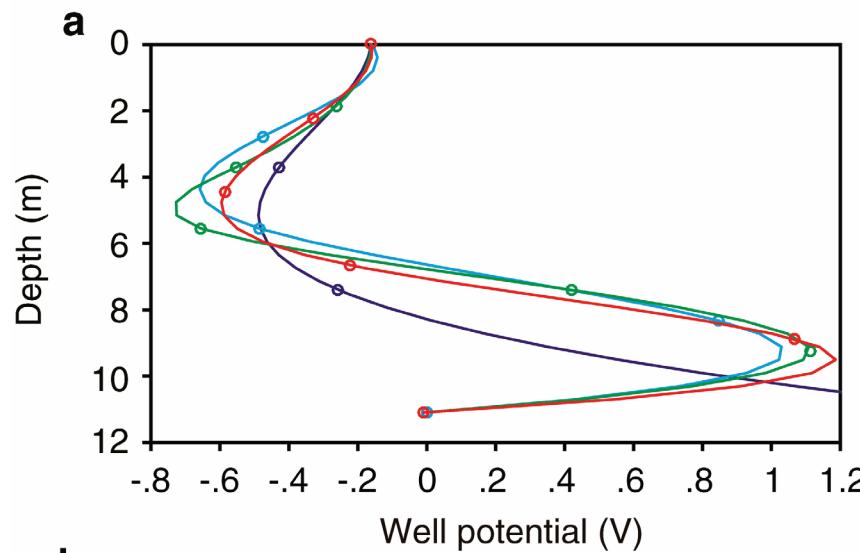
La spline à 6 nœuds permet de très bien retrouver la source initiale.

Application au cas synthétique (3): ajout de bruit

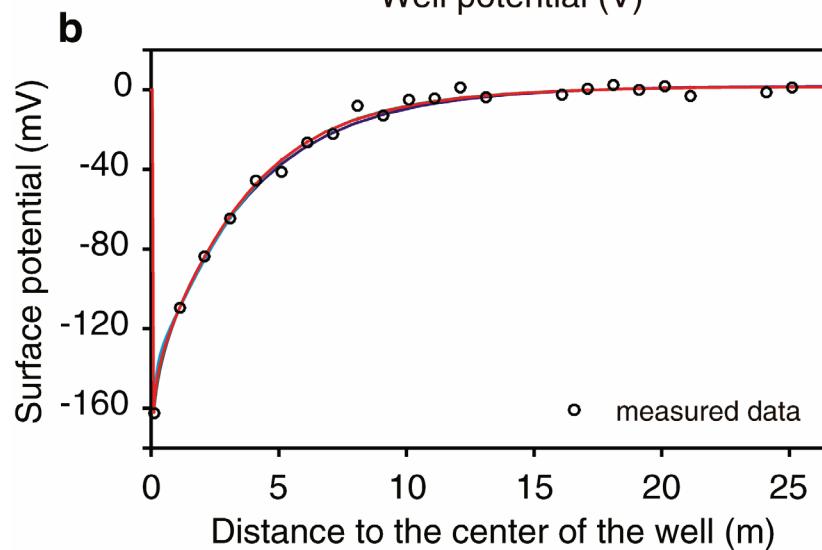


L'ajout de bruit dans les données change à la marge la source estimée, mais sa forme est globalement préservée.

Application au cas réel (1), dernier nœud flottant



⇒ Distribution dipolaire du potentiel sur le puits



- 4 nodes,
 $L_1: 2.08 \text{ mV}$, $L_2: 2.95 \text{ mV}$, $r^2: 0.995$
- 5 nodes,
 $L_1: 2.01 \text{ mV}$, $L_2: 2.68 \text{ mV}$, $r^2: 0.996$
- 6 nodes,
 $L_1: 1.99 \text{ mV}$, $L_2: 2.72 \text{ mV}$, $r^2: 0.996$
- 7 nodes,
 $L_1: 1.98 \text{ mV}$, $L_2: 2.70 \text{ mV}$, $r^2: 0.996$

Application au cas réel (2)

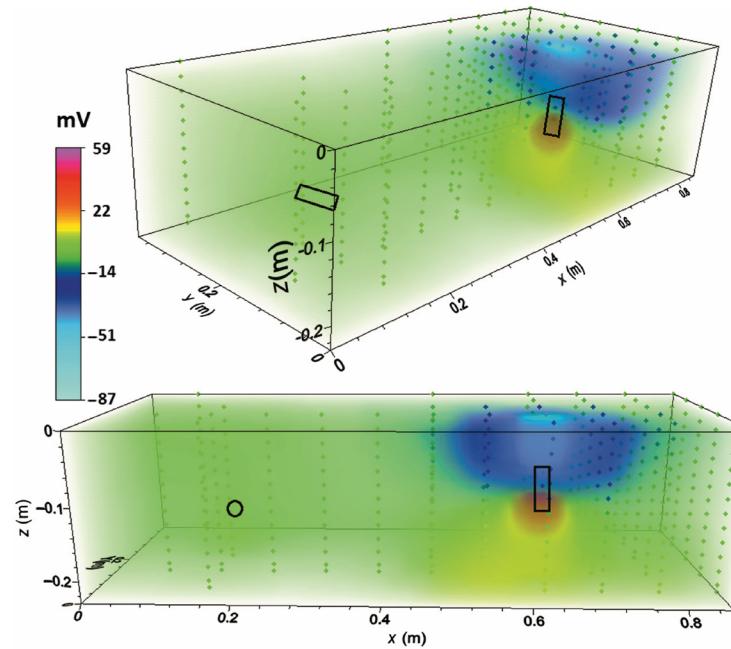
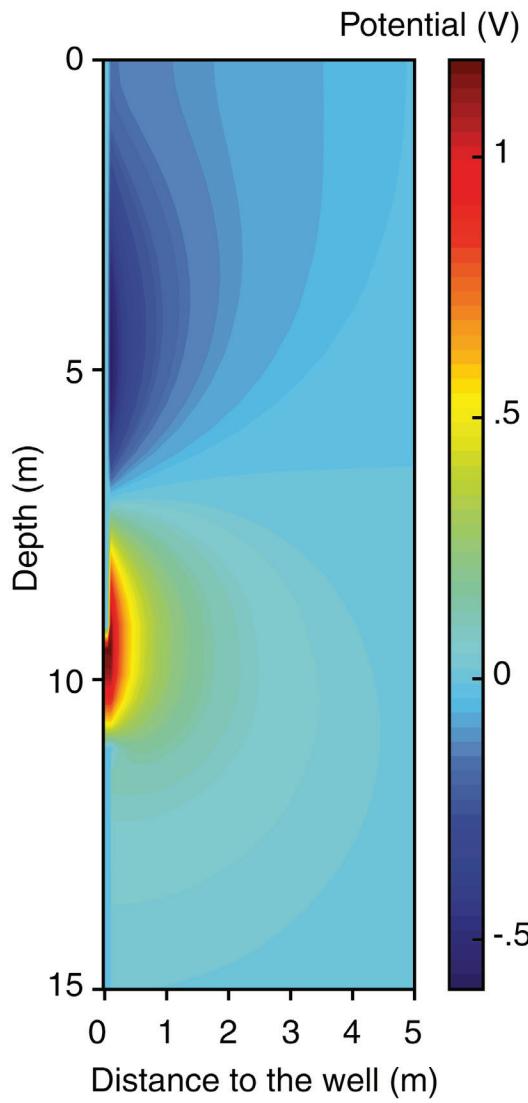


Figure 5. A 3D color contour plot with transparency thresholding of 3D SP data collected on day 105 in experiment 1. The data locations and approximate locations of the metallic pipes are shown on the plots.

Rittgers et al. 2013 Geophysics 78

La distribution spatiale du potentiel est cohérente avec des observations de laboratoire (mesures PS en cuve sur des barres métalliques se corrodant; Castermant et al., 2008; Rittgers et al. 2013)

Conclusions

Une distribution de potentiel électrique cohérente peut être estimée à partir d'un simple profil PS en surface.

Le code peut servir d'interpolator à *base physique* pour interpoler des données de surface.

Des mesures de PS régulières en surface combinées à cette approche interprétative pourraient constituer un outil pour le suivi temporel de la corrosion de tubage, à moindre coût.

Remerciements

AREVA (BG Mines, division Géosciences) et Elodie Williard et Mickaël Béhaegel (AREVA) pour l'acquisition du profil.