

## La Navigation du Savoir - Réseau des Arsenaux Historiques de la Méditerranée

---



UNION EUROPEENNE  
PROGRAMME EUROMED - HERITAGE II PROGRAMME MEDITERRANEE



UNESCO



UNIVERSITE DE MALTE  
MEDITERRANEAN INSTITUTE

---



Cours °5

Profilage électrique continu en site aquatique PECSA

**Description de la méthode géophysique utilisée**

La technique PECSA (Profilage Électrique Continu en Site Aquatique ; fiche ELE 04 du Code de bonne pratique de géophysique appliquée [Document commun BRGM/CGG/CPGF/LCPC, 1992]) appartient à la famille des méthodes géophysiques électriques en courant continu ou basse fréquence.

Le matériel utilisé et la méthode d'interprétation des mesures ont été mis au point au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Nantes. La technique est mise en œuvre au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Autun.

La méthode consiste à mesurer la résistivité apparente du sous-sol sub-aquatique à l'aide d'un quadripôle  $M_iABN$ , en injectant un courant continu  $I$  entre les électrodes d'injection  $A$  et  $B$ , et en mesurant la différence de potentiel induite entre les électrodes de mesure  $M_i$  et  $N$  (voir le dispositif sur la figure 1 ci-dessous).

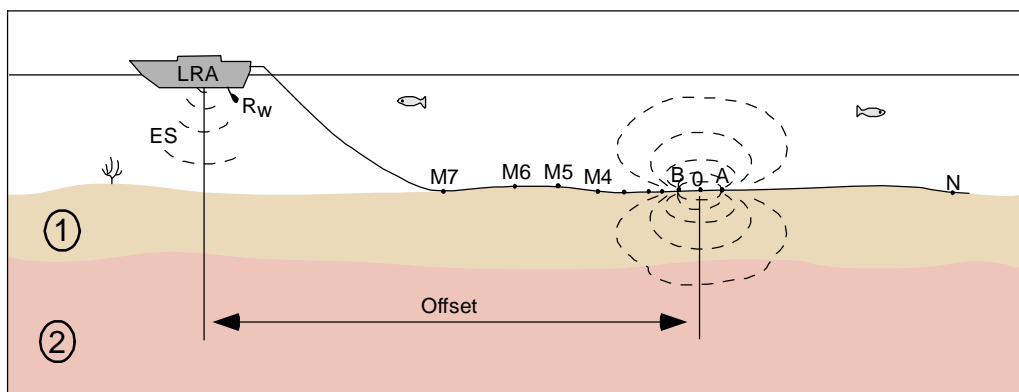


Figure 1 : Dispositif de mesure de la résistivité apparente du sous-sol sub-aquatique appliquée ici aux terrains 1 et 2 de résistivités respectives  $\rho_1$  et  $\rho_2$  (A, B : électrodes d'injection –  $M_i$ , N : électrodes de mesure –  $R_w$  : mesure de la résistivité de l'eau – ES : échousondeur, mesure de la bathymétrie – offset : distance entre le bateau et le centre du dispositif de mesure (0)).

La mesure simultanée de la résistivité et de la profondeur de l'eau est nécessaire pour l'interprétation des mesures en termes de résistivité du sous-sol.

---

### Appareil de mesure

---

L'ensemble comprend :

- ✓ Un générateur à courant constant continu avec système d'inversion de polarité à la fréquence  $F = 0.1$  Hz. Le courant peut être injecté à 0.3, 1 ou 3 A.  

N.B. : en milieu marin (eau salée), un amplificateur sur le boîtier générateur et une flûte annexe couplée à la flûte principale permettent d'injecter un courant continu de 5, 10 ou 15 Ampères.
- ✓ Une ligne de traîné (ou « flûte ») comprenant 10 électrodes coaxiales ; deux servent à l'injection, les huit autres à la mesure du potentiel.
- ✓ Une sonde de mesure de la résistivité de l'eau.
- ✓ Une électronique de mesure du courant injecté, de la résistivité de l'eau et de la différence de potentiel aux bornes des électrodes de réception.
- ✓ Un échosondeur pour la bathymétrie.
- ✓ Un ordinateur pour le contrôle, l'enregistrement, la visualisation des mesures et le calcul des résistivités apparentes.

### Configuration de la flûte

---

Le dispositif de mesure est un câble multiconducteur de 100 mètres de long portant 10 électrodes dans une configuration fixe (tableau 1). L'utilisation de plusieurs électrodes de mesure  $M_i$  définit des dispositifs  $M_iABN$  dissymétriques de taille croissante, qui permettent d'explorer le sous-sol sur des volumes croissants, la profondeur d'investigation augmentant avec l'écartement des électrodes N et  $M_i$ .

Les électrodes définissent sept couples de mesure notés  $AM_1$  à  $AM_7$  ayant chacun un écartement des électrodes différent et croissant respectivement de 1,00 m à 45,00 m (voir tableau ci-dessous). Le dernier couple d'électrodes,  $M_7ABN$  définit une géométrie se rapprochant d'un système de type Schlumberger.

La profondeur d'exploration du sous-sol, avec cette méthode, est d'une vingtaine de mètres environ. Ceci dépend de la configuration du matériel utilisé et de la capacité des terrains rencontrés à laisser passer ou non le courant électrique.

Électrode	Distance au centre du dispositif (m)	Écartement $NM_i$ (m)	Écartement $AM_i$ (m)
N (réception)	-49,95		
B (injection)	-4,95		
A (injection)	4,95		
$M_1$	6,05	56,00	1,00
$M_2$	6,85	56,80	1,90
$M_3$	8,55	58,50	3,55
$M_4$	11,75	61,70	6,70
$M_5$	17,65	67,60	12,65
$M_6$	28,85	78,80	23,85
$M_7$	49,95	99,90	45,00

Tableau 1 : Disposition des électrodes sur la flûte de mesure.

Cette flûte est traînée à l'interface eau/sol (i.e. au fond de l'eau) par un bateau remorqueur où sont embarqués les opérateurs, les boîtiers d'injection et de mesure, le dispositif d'alimentation, l'ordinateur de contrôle et d'enregistrement des mesures.

La flûte de mesure ( $L=100$  m) est reliée au bateau par un "brin mort" (i.e. ne comportant pas d'électrodes) d'une cinquantaine de mètres environ, soit une longueur totale de câble voisine de 150 mètres.

Au niveau du bateau, sont aussi enregistrées:

- la résistivité de l'eau mesurée à l'aide d'un dispositif quadripôle de 24 cm.
- la bathymétrie, mesurée avec un échosondeur.
- Éventuellement la localisation par GPS.

---

### Conditions et Interdits d'application

---

Cette technique est principalement utilisée pour étudier les sédiments meubles formant le fond des cours d'eau. En fonction de leurs caractéristiques électriques (leur capacité à laisser passer le courant), les couches de sédiments analysées par cette méthode peuvent avoir une épaisseur maximale de 20 m.

Des contraintes limitent les domaines d'application de la méthode :

- ✓ la bathymétrie doit être assez régulière. Les accidents de la topographie doivent avoir une longueur d'onde supérieure à la longueur de ligne du dispositif quadripolaire de mesure.
- ✓ la hauteur d'eau doit rester faible, en tous les cas toujours inférieure à 10 mètres.

- ✓ la couche d'eau recouvrant le sédiment doit présenter une résistivité homogène pendant la durée de la mesure.
- ✓ la méthode s'appuie au départ sur une hypothèse de terrains relativement tabulaires, sans pendage général excessif de la structure.

---

### Principe physique de la méthode

---

Ce chapitre s'inspire principalement des articles de Lagabrielle (1984) et Lagabrielle & Teilhaud (1981).

On injecte un courant continu alternativement positif et négatif, de type créneau, à la fréquence de 0.1 Hz (figure 2).

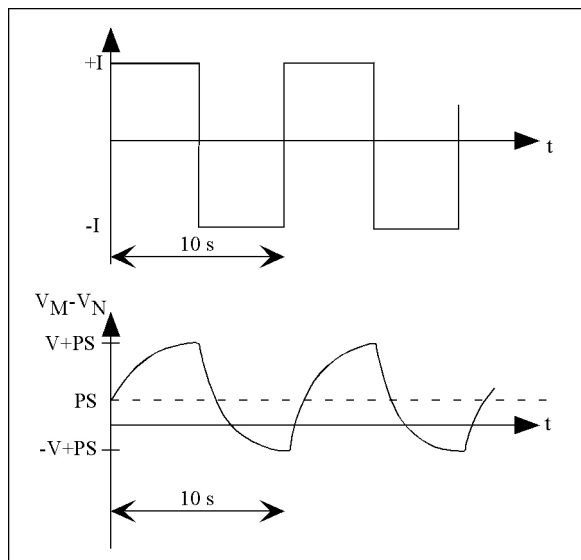


Figure 2 : Allure du courant continu et des potentiels utilisés pour les mesures de PECSA (d'après Lagabrielle, 1984).

Le fait d'utiliser du courant continu permet de s'affranchir du phénomène de polarisation des électrodes. Ainsi :

- ☞ La demi-somme des mesures obtenues sur une période de 10 s permet d'obtenir la valeur de la polarisation spontanée dont on veut s'affranchir :

$$\frac{(V + PS) + (-V + PS)}{2} = PS$$

- ☞ la demi-différence des mesures obtenues sur la même période fournit la différence de potentiel recherchée ( $V_N - V_{Mi}$ ) :

$$\frac{(V + PS) - (-V + PS)}{2} = V$$

---

## Interprétations qualitatives et quantitatives

---

Le traîné électrique aquatique se base sur les mêmes principes qu'un sondage de surface.

Aux faibles écartements des électrodes de réception, le dispositif est dissymétrique, puis il tend vers un dispositif de type Schlumberger pour l'écartement AM; le plus important.

Le principe de l'interprétation est de différencier les terrains en fonction de leurs propriétés électriques. Plus des terrains adjacents présentent de contrastes en terme de facilité à laisser passer (ou retenir) le courant, plus il est facile de les discriminer (tableau 2).

Matériaux	Résistivité moyenne $\rho$ ( $\Omega.m$ )
Eau de mer	0,2
Eau de nappes alluviales	10-30
Eau de sources	50-100
Sables et graviers secs	1 000-10 000
Sables et graviers imbibés d'eau douce	50-500
Sables et graviers imbibés d'eau salée	0,5-5
Argiles	2-20
Marnes	20-100
Calcaires	300-10 000
Grès argileux	50-300
Grès, quartzites	300-10 000
Cinérites, tufs volcaniques	20-100
Laves	300-10 000
Gneiss, granites altérés	100-1 000
Gneiss, granites sains	1 000-10 000

Tableau 2 : Résistivité des eaux et des roches (Astier, 1971).

### Interprétation qualitative : profils de résistivité apparente

---

Les données brutes issues de la PECSA sont des mesures de résistivité apparente acquises le long d'un profil, avec enregistrement des mesures toutes les 10 s.

Les résultats sont présentés sous forme de graphe et prennent la dénomination de « profil de résistivité apparente » (fig. 3). Ils montrent les résistivités apparentes ( $Rho_{app}$ ) enregistrées sur les sept voies de mesure NM<sub>1</sub> à NM<sub>7</sub>, la résistivité de l'eau et la bathymétrie. Un lissage peut être effectué par le biais d'une fenêtre mobile sur trois points au minimum.

Ces profils permettent aussi de vérifier les hypothèses nécessaires à l'application des algorithmes de calcul d'interprétation quantitative.

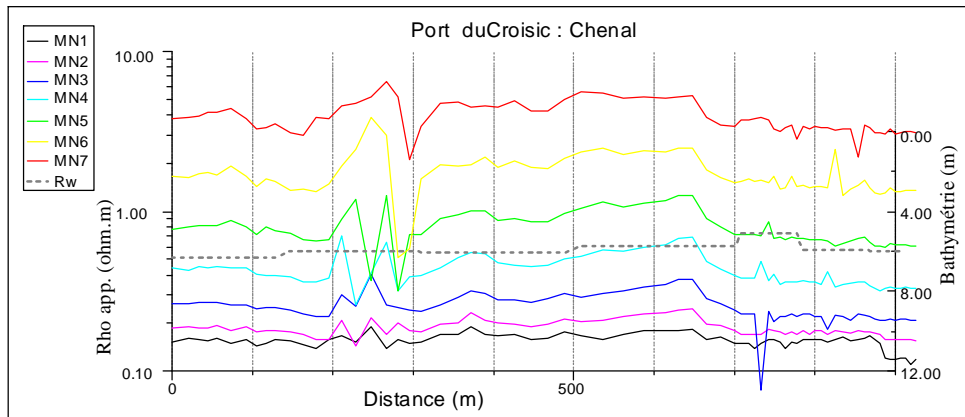


Figure 3 : Exemple de profil des résistivités apparentes.

### Interprétation quantitative : coupes de résistivité interprétée

Les données brutes sont traitées, lorsque cela est possible, par le logiciel de modélisation ZOHDYAK (pour ZOHDY AQuatique) qui permet leur interprétation en modèle multicouche par la méthode de Zohdy [1989], implémentée selon un algorithme de calcul développé par R. Lagabriele (LCPC Nantes). Les résultats sont présentés sous forme de répartition des résistivités interprétées en fonction de l'écartement des électrodes ( $\rho_{int} = f(AM_i)$ ) et sont comparés avec les sondages électriques expérimentaux ( $\rho_{app} = f(AM_i)$ ), (fig.4).

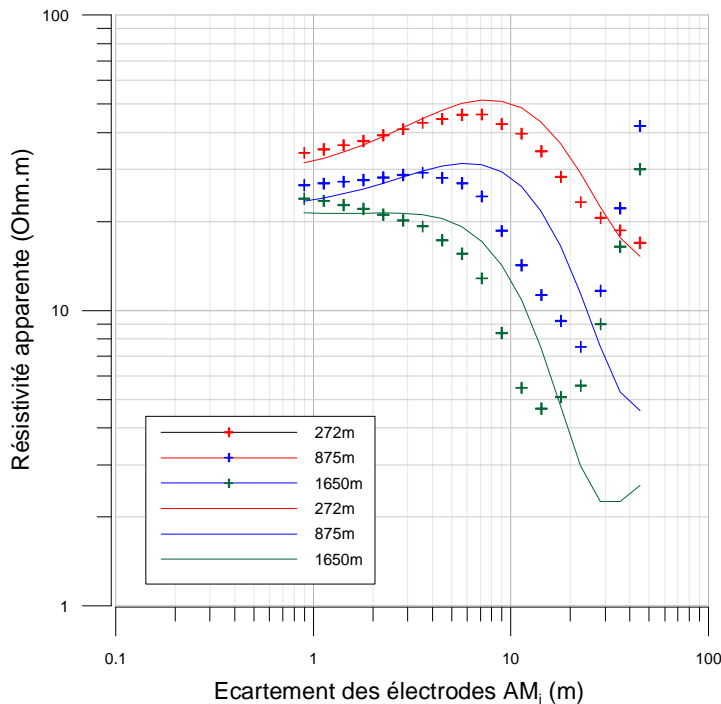


Figure 4 : Comparaison des sondages électriques types (croix) et des modèles obtenus (courbe continue).

La comparaison des sondages types avec les modèles obtenus (fig. 4) permet de vérifier la validité du modèle calculé et de passer à l'étape suivante en cas de bonne adéquation.

Il est aussi possible de présenter les statistiques de restitution de fiabilité entre les divergences maximales demandées pour le calcul du modèle et les divergences obtenues (fig. 5).

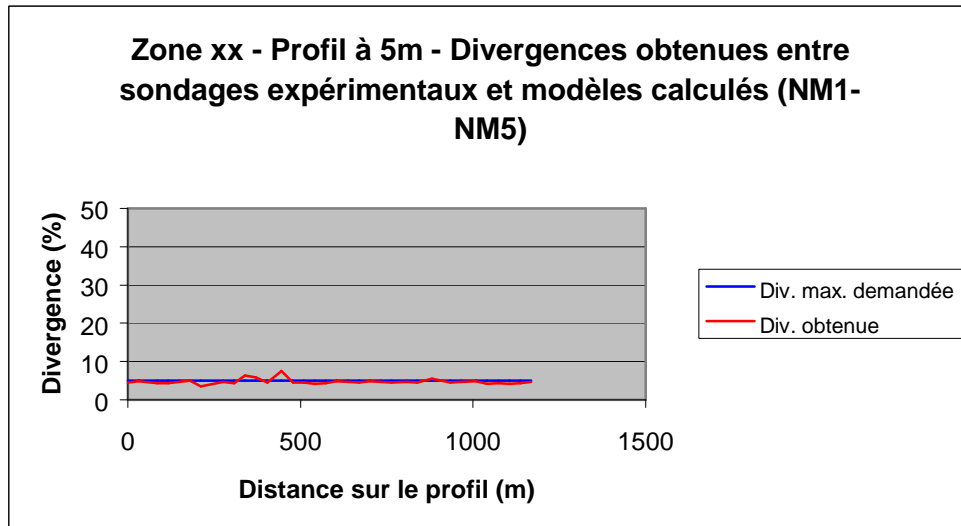


Figure 5 : Statistiques de restitution de fiabilité entre divergence demandée pour l'élaboration du modèle et divergence obtenue.

Le résultat des calculs d'inversion est présenté sous forme de graphique de répartition verticale des résistivités interprétées ( $\rho=f(z)$ ), (fig. 6)

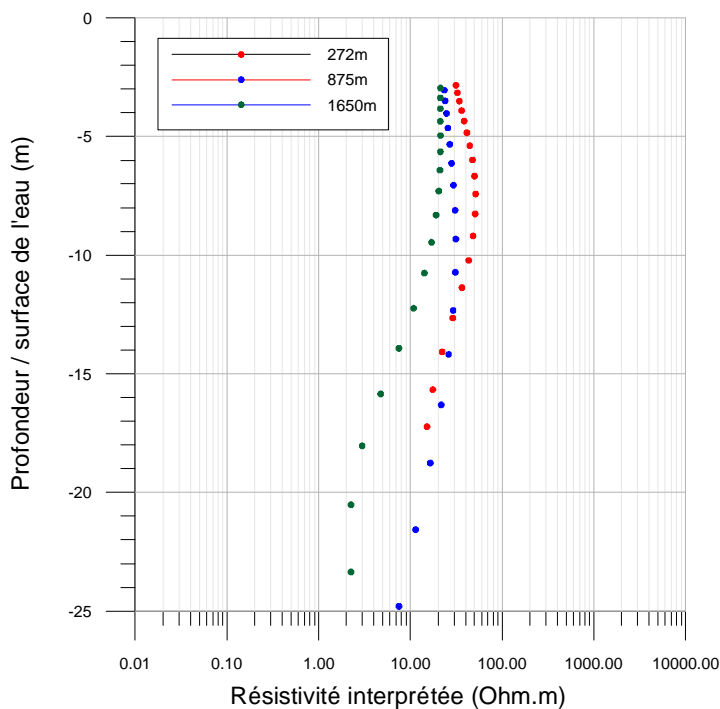


Figure 6 : Modèle obtenu - résistivité interprétée en fonction de la profondeur.



L'assemblage des profils verticaux obtenus permet éventuellement de dresser une coupe du sous-sol décrivant la répartition des résistivités interprétées. Les modèles obtenus étant des inversions en une dimension, le passage à deux dimensions (= panneau électrique) se fait par un calcul de grille avec un logiciel de type Surfer (fig. 6).

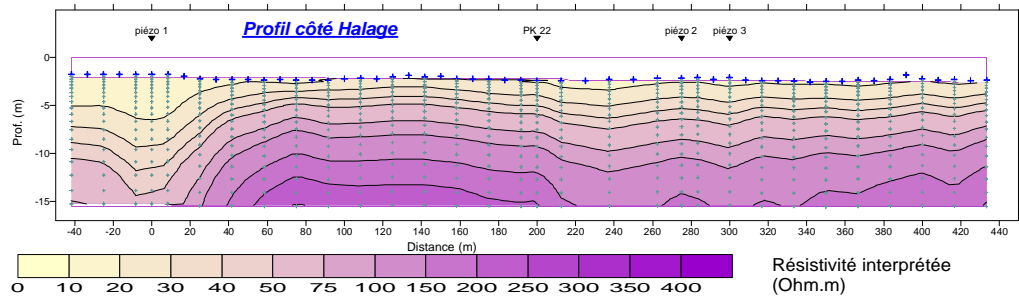


Figure 6 : Assemblage des inversions en panneau 2D. Les croix bleues représentent l'interface eau-sédiments et les croix vertes les sondages électriques utilisés pour le calcul de la grille.

Il s'agit cependant d'une coupe verticale des résistivités interprétées qui correspond à une variation continue de la résistivité du sous-sol. Il s'agit d'une solution parmi d'autres possibles et, de plus, il s'agit de résistivités interprétées et non de résistivités vraies (terme impropre souvent rencontré dans la littérature). Cette interprétation quantitative n'offre pas les mêmes possibilités selon la qualité de l'eau : plus une eau est salée et plus sa résistivité est faible par rapport à celle du sous-sol. Les mesures ne peuvent alors être interprétées qu'en terme de conductance longitudinale du sédiment meuble.

L'interprétation quantitative est impossible quand :

- ✓ La résistivité de l'eau est hétérogène,
- ✓ La structure du sous-sol est non tabulaire,
- ✓ Le pendage est excessif,
- ✓ Les accidents topographiques sont de dimension inférieure ou égale à la longueur de ligne.

## Références bibliographiques

- ASTIER, J.-L. (1971). – Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. – Masson, Paris.
- Document commun BRGM/CGG/CPGF/LCPC (1992). – Géophysique Appliquée : code de bonne pratique. – Union Française des Géologues, Paris. 200p.
- LAGABRIELLE, R. & TEILHAUD, S. (1981). – Prospection de gisements alluvionnaires en site aquatique par profils continus de résistivité au fond de l'eau. – Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 114, p. 17-24.
- LAGABRIELLE, R. (1983). – The effect of water on direct current resistivity measurement from the sea, river or lake floor. – Geoexploration, 21, 165-170.
- LAGABRIELLE, R. (1984). – La prospection électrique par courant continu en mer. – Bull. Liaison Labo. P. et Ch., 132, p. 5-11.
- LASFARGUES, P. (1957). – Prospection électrique par courants continus. – Masson, Paris, 290 pp.
- ZOHDY, A. A. R. (1989). – A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. – Geophysics, 54, n° 2, p. 245-253.

### Contact :

Grégory BIÈVRE  
CETE de Lyon – LRPC d'Autun  
Service Géotechnique & Environnement  
Section Reconnaissances et Mesures in situ  
Bd de l'industrie BP 141, 71404 AUTUN Cedex, France  
Tél : (+33)3-85-86-67-90 / Fax : (+33)3-85-86-67-79  
[gregory.bievre@equipement.gouv.fr](mailto:gregory.bievre@equipement.gouv.fr)