



**HAL**  
open science

## La polarisation provoquée des particules métalliques: Retour d'expériences de terrain et en laboratoire

Pauline Kessouri, Clémence Ryckebusch, Mohammed Arezki Rahmani

### ► To cite this version:

Pauline Kessouri, Clémence Ryckebusch, Mohammed Arezki Rahmani. La polarisation provoquée des particules métalliques: Retour d'expériences de terrain et en laboratoire. 13ème colloque GEOFCAN - Géophysique des sols et des formations superficielles, Nov 2023, Strasbourg (67000), France. hal-04204676

**HAL Id: hal-04204676**

**<https://brgm.hal.science/hal-04204676>**

Submitted on 12 Sep 2023

**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.

## LA POLARISATION PROVOQUEE DES PARTICULES METALLIQUES : RETOURS D'EXPERIENCES DE TERRAIN ET EN LABORATOIRE

KESSOURI P.<sup>1</sup>, RYCKEBUSCH C.<sup>1,2</sup>, RAHAMANI M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> BRGM, 45100 Orléans, France, [p.kessouri@brgm.fr](mailto:p.kessouri@brgm.fr)

<sup>2</sup> Université d'Orléans, CNRS, BRGM, ISTO, UMR 7327, F-45071, Orléans, France

### RESUME

*La polarisation provoquée (PP) a été utilisée pour caractériser d'anciens sites et gisements métallurgiques dans le cadre du projet NWE-REGENERATIS. Cette présentation s'appuie sur les résultats obtenus pour le site de Pompey (FR) pour développer la méthodologie retenue : Approche classique à laquelle s'ajoute (3) Echantillonnage ciblé ; (4) Analyses géochimiques en laboratoire (XRF) ; (5) Analyse géostatistique des corrélations entre données PP et géochimiques ; (6) Interprétation quantitative à l'aide d'une approche géostatistique qui permet de distinguer différents volumes de composition chimique différente et d'y associer une probabilité jointe d'occurrence.*

**Mots clés :** *Polarisation Provoquée ; particules métalliques ; approche géostatistique ; probabilité jointe*

### ABSTRACT

*Induced polarization (IP) has been used to characterize past metallurgical sites and deposits as part of the NWE-REGENERATIS project. This presentation is based on the results obtained for the Pompey site (FR) to develop the adopted methodology: Classic approach to which is added (3) Targeted sampling; (4) Laboratory geochemical analyzes (XRF); (5) Geostatistical analysis of correlations between IP and geochemical datasets; (6) Quantitative interpretation using a geostatistical approach that makes it possible to distinguish between different volumes and to associate a joint probability of occurrence.*

**Key words:** *Induced Polarization; metallic particles; geostatistical approach; joint probability*

### INTRODUCTION

Les anciens sites et gisements métallurgiques représentent une part importante des sites potentiellement contaminés dans l'Union européenne (UE) : environ 100 000 ont été identifiés uniquement dans les régions du Nord-Ouest de l'UE. Si les déchets récents des sites encore en activité sont couramment valorisés, ce n'est pas le cas des anciens granulats à forte teneur en métaux ferreux (et autres), scories blanches et noires, résidus de bassins de décantation, etc., qui sont considérés comme des sources de pollution et sont coûteux à gérer ou à éliminer. Ces sites pourraient être considérés comme des opportunités de valorisation de grands volumes de ressources (métaux, matériaux et terres) en utilisant des techniques d'exploitation minières urbaines, s'ils étaient mieux caractérisés.

La méthode de polarisation provoquée (PP) est une méthode géophysique connue pour être sensible à la présence de particules métalliques disséminées dans les couches du sous-sol. Si l'interprétation qualitative des paramètres PP mesurés sur le terrain (c'est-à-dire la résistivité électrique et la chargeabilité) est répandue, l'interprétation quantitative en termes de concentrations de différentes particules métalliques reste à développer.

Cette présentation est centrée sur des expériences récentes à la fois en laboratoire et sur le terrain pour interpréter de façon quantitative les résultats PP.

## 1. CONTEXTE ET SITE D'ETUDE

L'exemple du site de Pompey (FR), investigué dans le cadre du projet NWE-REGENERATIS (<https://www.nweurope.eu/projects/project-search/nwe-regeneratis-regeneration-of-past-metallurgical-sites-and-deposits-through-innovative-circularity-for-raw-materials/>), est utilisé dans cette étude pour présenter l'intérêt d'utiliser des mesures PP dans le domaine temporel (TDIP) pour caractériser les anciens sites et dépôts métallurgiques. Il s'agit d'un ancien bassin de décantation des boues issues des hauts fourneaux de l'ancien site métallurgique de Pompey-Frouard-Custine. Le site est choisi pour deux raisons principales: (1) il accueillait diverses activités de production d'alliages à base de fer ; (2) il a été réhabilité en surface, et la documentation historique et les investigations ont été faites dans le respect de la législation et des valeurs-seuil françaises.

Des mesures géophysiques multi-méthodes ont été entreprises sur le site. Six profils de mesures électriques ont été réalisés (voir Fig. 1) : 5 profils dans la direction Nord-Sud et 1 profil transversal. La configuration choisie est de type Dipole-Dipole avec un écartement de 2.5 m pour des profils de 96 électrodes (voir Fig. 1). Les mesures ont été réalisées à la fois en terme de résistivité  $\rho$  et chargeabilité  $M$ . En plus des profils de polarisation provoquée, trois profils sismiques, ainsi qu'une cartographie magnétique et électromagnétique du site ont été déployés (voir Fig. 1).

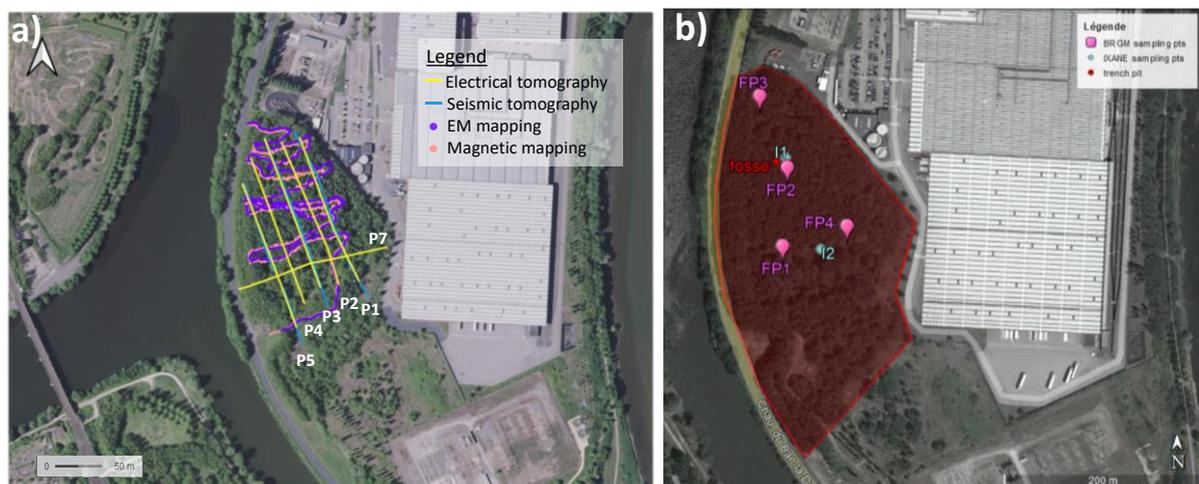


Fig. 1 –a) Carte du site de Pompey avec positionnement des différentes mesures géophysiques réalisées ; b) Carte du site de Pompey avec localisation des différents points d'échantillonnage.

## 2. METHODOLOGIE

La méthodologie de travail pour les données PP sur le site, développée au cours du projet NWE-REGENERATIS par l'université de Liège et le BRGM, peut être découpée en plusieurs phases :

### Phase 1 : Conception des levés géophysiques

Cette phase comprend une analyse des données historiques (plans, rapports, photos), ainsi qu'une visite de site pour analyser l'environnement du site. Une sélection des implantations d'électrodes et des configurations de mesure les plus adaptées est effectuée à ce stade.

### Phase 2 : Mesures sur site

Cette phase comprend les mesures PP sur site, ainsi que le traitement et l'inversion des données pour aboutir à une interprétation qualitative des données en terme de zones ou de couches d'intérêt.

### Phase 3 : Echantillonnage ciblé

Suite à ces premières investigations et à l'identification des zones d'intérêt, un plan d'échantillonnage est proposé pour extraire des échantillons de sol qui seront analysés en termes de propriétés géophysiques ainsi que de paramètres physico-chimiques.

#### Phase 4 : Analyses en laboratoire

Des analyses chimiques plus ou moins poussées sont réalisées. Une analyse en terme de concentration en éléments chimiques à l'aide de la méthode de fluorescence aux rayons X est un minimum. Elle peut être complétée par une analyse de diffraction aux rayons X pour connaître la nature des minéraux, couplée à une analyse granulométrique. Enfin des mesures PP de laboratoire peuvent être effectuées sur les mêmes échantillons.

#### Phase 5 : Analyse géostatistique des corrélations

Une analyse en terme de matrice de corrélation ou une analyse des composants principaux sur l'ensemble du jeu de données précédemment acquis (terrain et laboratoire) est utilisée pour identifier des corrélations entre les jeux de données géophysiques, physiques et géochimiques. Les corrélations établies permettent de distinguer des clusters qui serviront d'entrée à l'interprétation finale

#### Phase 6 : Interprétation quantitative

Les clusters obtenus sont utilisés dans l'interprétation finale des données de terrain. Celle-ci se fait soit par application d'algorithmes de type machine-learning, soit par approche probabiliste (cf. Isunza-Manrique *et al.*, 2023). L'interprétation permet de caractériser les matériaux de valeur en termes de volume/quantité, concentration, type de métal, granulométrie...

### 3. RESULTATS

Après filtrage et inversion séparés de chaque profil électrique, les 6 sections inversées sont replacées dans un système de coordonnées globales. La Figure 2a) présente les résultats obtenus en terme de facteur métallique  $MF$  ( $MF=2000.M/\rho$ ), qui met en évidence les zones à la fois conductrice et chargeable. Une zone de  $MF$  plus élevée est observée au Sud du site. Des échantillons provenant de deux forages sont prélevés sur ce volume (FP1 et FP4). Une autre anomalie de  $MF$  élevée est observée à l'extrême Nord des profils. Un sondage (FP3) est réalisé dans cette zone. Enfin, l'emplacement du dernier forage (FP2) est choisi comme représentatif des niveaux moyens observés sur la majorité du bassin.

Une analyse en composantes principales (PCA) a été réalisée sur les résultats XRF des échantillons prélevés (voir Fig. 2b) et c)). Quatre composantes principales expliquent la majorité du jeu de données géochimiques. L'analyse PCA, couplée avec un outil de clustering permet de mettre en évidence 4 couches différentes: (1) une couche d'alluvions naturels profonde (couche A sur la Fig 2b)) ; (2) et (3) deux couches de matériaux provenant de l'ancien bassin de décantation ; (4) une couche de dépôts anthropiques post-fermeture du site sidérurgique (couche la plus en surface).

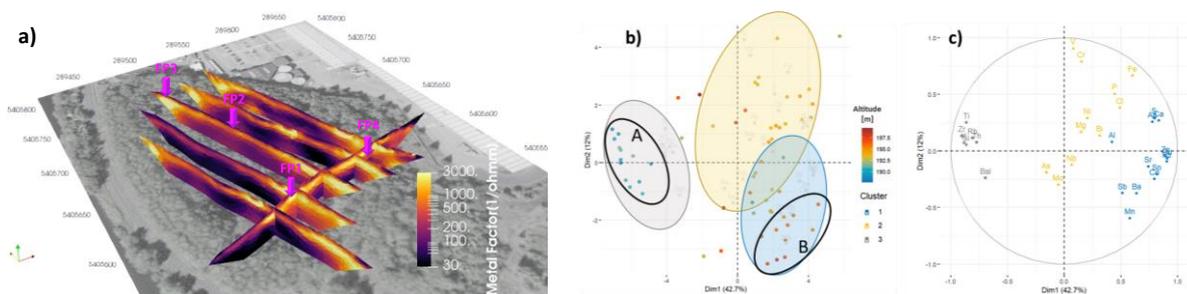


Fig. 2 –a) Profils de mesure PP représentés en terme de facteur métallique ( $MF=2000.M/\rho$ ) et localisation des points d'échantillonnage ; b) analyse des composantes principales (PC1 vs PC2) avec identification de 3 clusters sur les éléments chimiques et projection des points de mesure représentés en fonction de leur altitude. Les groupes A et B ont été identifiés par une analyse plus fine en fonction de l'altitude ; c) analyse des composantes principales (PC1 vs PC2) sur les éléments chimiques représentés en fonction de leur cluster d'appartenance

Les clusters obtenus sur les échantillons sont utilisés pour interpréter les données PP de terrain. Une approche probabiliste (cf. Isunza-Manrique *et al.*, 2023) a été adaptée aux données de Pompey pour

interpréter les résultats en terme de couches, avec une probabilité jointe conditionnelle associée (voir Fig. 3).

## CONCLUSIONS

La méthodologie développée lors du projet NWE-REGNERATIS par l'université de Liège et le BRGM a été appliquée sur le site pilote de Pompey. Elle permet d'identifier plusieurs couches de matériaux revalorisables, avec une probabilité jointe d'occurrence associée à chaque couche (voir Fig. 3). Cette information supplémentaire est intéressante pour établir un modèle économique et déterminer l'intérêt du site à être reclassée. La signature PP obtenue sur le site permet donc de mieux le caractériser et réévaluer le potentiel des sites et gisements métallurgiques passés.

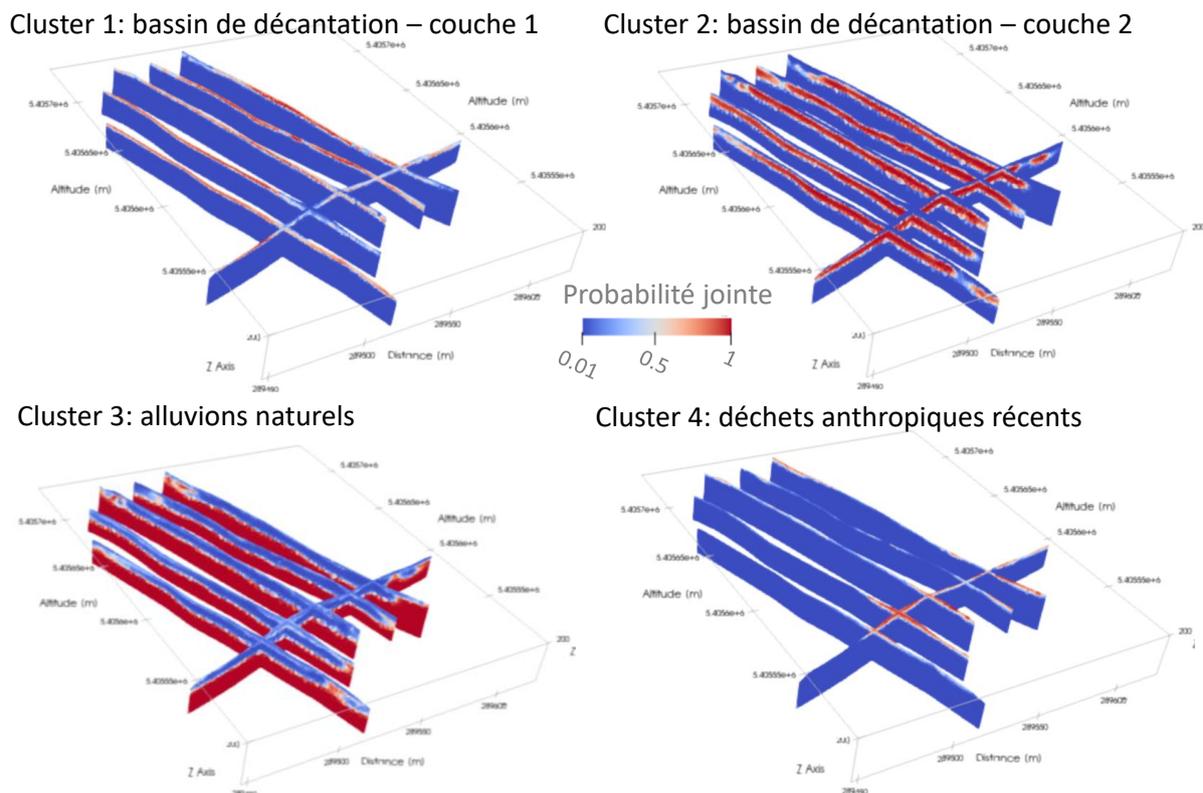


Fig. 3 – Probabilité jointe conditionnelle de présence de chaque couche (cluster) en fonction de la position de la cellule sur les profils PP.

## REMERCIEMENTS

Cette étude a été financée par le projet Interreg North West Europe (NWE) appelé NWE-REGNERATIS qui vise à la régénération des anciens sites et gisements métallurgiques grâce à une circularité innovante pour les matières premières.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ISUNZA MANRIQUE I., CATERINA D., NGUYEN F., HERMANS T., 2023 – Quantitative interpretation of geoelectric inverted data with a robust probabilistic approach. p. 93.