

Apports et limitations des méthodes géophysiques dans le cadre de la démonstration de l'atténuation naturelle

Projet ATTENA – PHASE 2

Juin 2013

Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par J.C. Gourry, V. Naudet, F. Mathieu, A. Saada, A. Blondel

Coordination technique : Yves Duclos – Service Friches Urbaines et Sites pollués (SFUSP) – Direction Villes et Territoires Durables (DVTD) – ADEME (Angers)



RAPPORT FINAL

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'ADEME (convention n°0572C0064), ArcelorMittal Real Estate France, Rhodia et Total pour le soutien financier du projet. Nos remerciements vont également aux membres du Groupe d'Utilisateurs du projet ATTENA, pour l'aide qu'ils ont apporté à l'élaboration du protocole ATTENA, ainsi qu'aux membres du comité scientifique pour leur disponibilité et leur contribution à la rédaction des modes opératoires.

En français :

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par la caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

En anglais:

Any representation or reproduction of the contents herein, in whole or in part, without the consent of the author(s) or their assignees or successors, is illicit under the French Intellectual Property Code (article L 122-4) and constitutes an infringement of copyright subject to penal sanctions. Authorised copying (article 122-5) is restricted to copies or reproductions for private use by the copier alone, excluding collective or group use, and to short citations and analyses integrated into works of a critical, pedagogical or informational nature, subject to compliance with the stipulations of articles L 122-10 – L 122-12 incl. of the Intellectual Property Code as regards reproduction by reprographic means.

Synthèse

Parmi les étapes nécessaires à la démonstration de la faisabilité d'une gestion de site par atténuation naturelle (AN), les méthodes géophysiques sont des outils qui peuvent être utilisées à différents stades d'une étude dans le domaine des sites et sols pollués pour :

1. améliorer le modèle géologique et hydrogéologique,
2. faire le diagnostic environnemental d'un site afin de détecter les sources potentiels et les panaches,
3. une surveillance d'un panache portant sur :
 - sa géométrie,
 - les variations de concentration du polluant
 - l'évolution des propriétés physico-chimiques du polluant, liées aux réactions d'oxydo-réduction (notamment évolution du potentiel redox).

Ces utilisations peuvent participer des apports dans les étapes nécessaires pour la démonstration de la faisabilité d'une gestion de site par AN.

Contrairement aux techniques classiques de monitoring faisant appel à des analyses de sol ou d'eau provenant de forages, les méthodes géophysiques sont intégratrices, non destructives et peuvent être continues dans le temps.

Les méthodes géophysiques sont déclinées en fonction de ces 3 objectifs. Les méthodes sont classées par rapport à leur adéquation à répondre aux objectifs.

D'après la littérature et suite aux résultats obtenus dans le cadre d'ATTENA, les trois paramètres les plus sensibles à la présence d'un polluant (hydrocarbures pétrolier, goudrons de houille – HAP – ou organochloré) sous forme de source ou de panache sont : la résistivité électrique, la chargeabilité électrique et la polarisation spontanée. Afin de mesurer ces paramètres, les méthodes géophysiques recommandées sont respectivement les méthodes électriques, la polarisation provoquée et le potentiel spontané.

Plusieurs explications sur l'origine du contraste de résistivité, chargeabilité et potentiel spontané sont données et sont justifiées par une large recherche bibliographique. L'évaluation de l'état de dégradation d'un polluant a donné lieu à une nouvelle discipline : la biogéophysique.

Des exemples d'application de ces méthodes géophysiques sur les sites d'ATTENA sont fournis et commentés.

Enfin, des éléments de coût et de rendement par méthodes sont donnés afin d'évaluer le bénéfice qu'il peut y avoir d'utiliser la géophysique.

La plupart des méthodologies proposées sont du domaine de la recherche, certaines encore de la recherche fondamentale comme la biogéophysique. Certaines sont employées avec plus ou moins de succès de manière plus courante par les bureaux d'étude, telle que la caractérisation de source de pollution.

Ce document s'adresse essentiellement aux donneurs d'ordre afin qu'ils puissent prendre connaissance de l'état de l'art en terme de géophysique par la caractérisation de l'AN. Le présent rapport s'adresse également aux bureaux d'étude qui trouveront un ensemble de méthodologies et d'exemples d'application

Sommaire

1. Introduction	13
2. Etat de l'art des techniques géophysiques pour l'atténuation naturelle	16
2.1. INTRODUCTION	16
2.2. ETAT DE L'ART.....	17
3. Signatures géophysiques de l'atténuation naturelle	20
3.1. REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE POLLUTION : SOURCE ET PANACHE	20
3.1.1. Les produits légers, flottants, dits LNAPL.....	20
3.1.2. Les produits lourds, plongeants, dits DNAPL	21
3.2. INFLUENCE DE LA POLLUTION SUR LA RESISTIVITE ET SUR LA POLARISATION PROVOQUEE.....	22
3.2.1. Cas d'un polluant non dégradé.....	22
3.2.2. Cas d'un polluant partiellement dégradé	23
3.3. INFLUENCE DE LA POLLUTION SUR LE POTENTIEL SPONTANE	26
4. Application dans le cadre de l'atténuation naturelle : mise en œuvre, interprétation et points-clés	28
4.1. LA CHAINE D'ETUDE GEOPHYSIQUE	28
4.1.1. La préparation de l'étude	28
4.1.2. La phase d'acquisition	28
4.1.3. Traitement.....	29
4.1.4. Interprétation.....	29
4.1.5. La restitution des résultats.....	29
4.2. CHOIX DES METHODES GEOPHYSIQUES	29
4.3. LES CONNAISSANCES D'ENTREE NECESSAIRES.....	30
4.4. COMPLETER LES DONNEES D'ENTREE PAR LA GEOPHYSIQUE.....	31
4.4.1. Compléter la géologie par la géophysique	31
4.4.2. Compléter l'hydrogéologie par géophysique	32
4.5. LA RECHERCHE DE SOURCES ET LE DIAGNOSTIC DE SITE	32
4.5.1. Le principe d'emboîtement des échelles	32
4.5.2. Etudes géophysiques à grande échelle.....	33
4.5.3. Etude géophysiques à petite échelle	34
4.6. LA SURVEILLANCE	36
4.6.1. Objectifs de la surveillance	36

4.6.2. Les techniques de surveillance.....	37
4.6.3. Prise en compte de paramètres extérieurs.....	38
4.7. LIMITES DES METHODES GEOPHYSIQUES.....	38
4.7.1. Influence des structures enterrées	38
4.7.2. Seuil de détection	39
4.8. CONCLUSION.....	39
5. Illustrations	42
5.1. RECHERCHE DE SOURCE DANS LE CAS D'UN HYDROCARBURE PETROLIER NON DEGRADE (SITE 3).....	42
5.2. RECHERCHE DE SOURCES DANS LE CAS D'UN HYDROCARBURE PETROLIER PARTIELLEMENT DEGRADE (SITE 3).....	43
5.3. RECHERCHE D'UNE SOURCE DANS LE CAS D'UN GOUDRON DE HOUILLE (HAP) DEGRADE (SITE 2)	45
5.3.1. Diagnostic des sources.....	45
5.3.2. Diagnostic et surveillance du panache	46
5.4. RECHERCHE DE LA GEOMETRIE D'UN PANACHE DANS LE CAS D'UN ORGANOCHLORE (SITE 1)	51
6. Eléments de coûts et bénéfices associés	54
6.1. COUTS DES METHODES GEOPHYSIQUES	54
6.1.1. Potentiel spontané	55
6.1.2. Configuration gradient, mise-à-la-masse et électrode enterrée	55
6.1.3. Tomographie 2D de résistivité électrique	56
6.1.4. Tomographie 3D de résistivité électrique (configuration L ou C)	56
6.2. BENEFICES	56
7. Bibliographie.....	58
A. LA RESISTIVITE ELECTRIQUE	64
a. Définition	64
b. Mesure de la résistivité électrique	64
B. LA POLARISATION PROVOQUEE	66
a. Définition	66
b. Les processus à l'origine du phénomène de polarisation provoquée	66
c. Mesure de la polarisation provoquée	68
C. INFLUENCE DE PARAMETRES EXTERIEURS SUR LA RESISTIVITE ET LA POLARISATION PROVOQUEE.....	70
a. Saturation en eau de la zone non saturée.....	70
b. Niveau piézométrique	71

c.	Température	71
D.	TECHNIQUES D'ACQUISITION DES METHODES ELECTRIQUES.....	72
a.	Le panneau électrique	72
b.	La méthode rectangle ou gradient.....	76
c.	Les techniques de forage : la mise à la masse et l'électrode enterrée	77
E.	LES TECHNIQUES D'ACQUISITION 3D.....	80
F.	LES METHODES ELECTRIQUES CAPACITIVES	82
A.	ORIGINE DU POTENTIEL SPONTANE	86
B.	METHODE DE MESURE	88
A.	METHODES SISMIQUES	91
B.	TRAITEMENT SISMIQUE	93
a.	Traitement sismique réfraction	94
b.	Traitement sismique réflexion HR.....	94
c.	Traitement MASW.....	95
A.	PRINCIPE DE LA METHODE	98
B.	L'EQUIPEMENT « NUMIS+ »	99
C.	LE SONDAGE RMP	100
D.	INTERPRETATION DES DONNEES	102
a.	Inversion des sondages RMP.....	102
b.	Caractérisation hydrodynamique des aquifères par RMP	104
E.	CONDITIONS ET LIMITES D'APPLICATION DE LA METHODE RMP	105

Liste des illustrations

Figure 1 : Schéma d'une pollution de type LNAPL	20
Figure 2 : schéma de la distribution d'humidité et des différentes phases dans la porosité à l'interface entre la zone saturée et la zone non saturée, d'après Atekwana et Atekwana, 2010.	21
Figure 3 : Schéma d'une pollution de type DNAPL	22
Figure 4 : schéma d'explication de l'effet de polarisation de membrane et due à la constriction de pores.....	23
Figure 5 : diagramme de modifications des propriétés physiques d'un sol sous l'effet d'une pollution se dégradant, (traduit d'après Atekwana et Atekwana, 2010).	24
Figure 6 : Bloc diagramme synthétisant l'influence de la dégradation bactérienne sur la résistivité CC et la polarisation provoquée	26
Figure 7 Modèle conceptuel de biogéobatterie schématisant l'effet « électro-redox » qui génère un champ électrique lié à l'activité microbienne et qui, par conséquent, induit des anomalies PS. Les filaments protéiques extracellulaires et/ou les biominéraux orientés sont des conducteurs pour les	

électrons produits dans la région réductrice (anode) et captés dans la région oxydée (cathode). Un courant électrique circule alors de l'anode vers la cathode de ce système.	27
Figure 8 : Diagramme de la conduite d'une étude géophysique pour le diagnostic de l'atténuation naturelle.	35
Figure 9 : Simulations de profils de résistivité réalisés longitudinalement, transversalement et verticalement à un panache de LNAPL.	36
Figure 10 : photo du ohmmapper sur le site du projet européen HYGEIA.	43
Figure 11 : cartographie de la résistivité moyenne de la tranche 0-2m mesurée par Ohmmapper sur le site du projet HYGEIA.	43
Figure 12 : résistivité à la profondeur 4m (toit de la nappe phréatique) après inversion de mesures ohmmapper sur le site 3.	44
Figure 13 : a) Carte de potentiel spontané b) et de résistivité configuration gradient autour de la mare à goudrons (faible PS et faible résistivité).	46
Figure 14 : coupes verticales de résistivité (à gauche) et de chargeabilité (à droite) au dessus de la mare à goudrons sud avant excavation.	46
Figure 15 : coupes de résistivité de 4 tomographies de résistivité entourant le lotissement et oupant l'ancienne mare à goudrons (profils P1 et P2). Le positionnement des profils se trouve sur la Figure 16.	47
Figure 16 : plan de résistivité à la profondeur 30 à 40m après intégration de l'ensemble des tomographies de résistivité (profils rouges) sur le site 2.	48
Figure 17 : plan de résistivité à la profondeur 30m sous le lotissement, calculé à partir de l'inversion des tomographies entre profils croisés (acquisition en C).	49
Figure 18 : a) carte de potentiel électrique (maille 5 x 5m) mesuré par mise-à-la-masse (injection sur la croix « inj » au centre de la mare à goudrons encadrée en noir, b) carte de résistivité apparente mesurée par électrode enterrée (forage PzC), maille de mesure 5 x 5 m.	50
- Figure 19 : Plan de position des acquisitions géophysiques sur le site 1 : la zone source et les 2 tomographies de résistivité et polarisation provoquée.	51
Figure 20 : Coupe verticale de résistivité obtenue par tomographie électrique 2D sur le profil P253	
Figure 21 : Coupes verticales a) de résistivité électrique b) de la conductivité imaginaire à 8Hz sur le profil P1.	53
Figure 22 : Principe de la mesure en courant électrique continu.	65
Figure 23 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \theta, \Phi < \pi$).	65
Figure 24 : La polarisation d'électrode (d'après Telford et al., 1990).	67
Figure 25 : Représentation de l'origine du phénomène de polarisation de membrane. (a) avant l'application d'un courant ; (b) après l'application d'un courant (d'après Sumner, 1976).	68
Figure 26 : Signaux transmis et reçus en domaine temporel.	69
Figure 27 : Définition de la chargeabilité en domaine temporel.	69
Figure 28 : Déphasage entre courant injecté et voltage mesuré.	70
Figure 29 : Configuration dipôle-dipôle.	72
Figure 30 : Configuration de Schlumberger.	73
Figure 31 : Configuration de Wenner.	73
Figure 32 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner.	74
Figure 33 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).	75

Figure 34 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.	75
Figure 35 : Géométrie du dispositif rectangle. A et B sont les électrodes d'injection. M et N sont les électrodes de mesure.	76
Figure 36 : Principe de la mise-à-la-masse : l'électrode d'injection B se trouve en surface (cas présenté) ou dans un forage si le corps conducteur se situe en profondeur.	78
Figure 37 : Principe de la méthode électrique d'électrode enterrée. Vue de profil (gauche), vue de dessus (droite). L'électrode d'injection A est située dans le forage. Les mesures se font suivant deux directions perpendiculaires (dipôles MN et M'N').	79
Figure 38 : Carte de résistivité apparente du site 2 réalisée par la méthode de l'électrode enterrée.	80
Figure 39 : techniques d'acquisition 3D	81
Figure 40 : Photos du OhmMapper en action, tiré par un quad ou par un opérateur. Le récepteur est situé en queue du dispositif et les 4 récepteurs en tête.	82
Figure 41 : Géométrie du ohmmapper. Le dipôle émetteur (en rouge) est de même longueur a que le dipôle récepteur (en bleu). La corde qui relie les 2 dipôles est de longueur l.	83
Figure 42 : exemple de levé géoélectrique avec un ohmmapper	84
Figure 43 : Equipement de potentiel spontané : les électrodes, le multimètre, les câbles, eau, sel et bentonite pour améliorer le contact électrique des électrodes si nécessaire	87
Figure 44 : Schéma présentant la méthode du potentiel spontané et l'effet électro-redox.	87
Figure 45. Illustration du principe de monitoring PS	89
Figure 46: a) Exemple de tir sismique avec repérage de l'onde réfractée sur le substratum, b) Exemple de tomogramme onde P où l'on distingue le toit du substratum ($V_p=2200$ m/s).	91
Figure 47 : a) Exemple de tir sismique avec repérage de l'onde réfléchie sur le substratum, b) Exemple de coupe sismique haute résolution (HR) et son interprétation où l'on distingue la succession des réflecteurs en profondeur et le toit du substratum.	91
Figure 48 : a) Exemple de diagramme de dispersion des ondes de surface, b) Exemple de coupe MASW où l'on distingue le toit du substratum ($V_s=540$ m/s).	92
Figure 49 : a) modèle synthétique de vitesse des ondes P, b) Exemple de sismogramme obtenu pour la source 48 par simulation numérique	93
Figure 50 : schéma décrivant la méthodologie d'acquisition et traitement des données MASW (ou SASW)	96
Figure 51 - Principe de mesure RMP.	99
Figure 52 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.	99
Figure 53 - Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS ⁺ » sur site.	100
Figure 54 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.	101
Figure 55 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1	102
Figure 56 - Résultats d'inversion des données théoriques.	103
Figure 57 : Exemple de Sondage RMP en milieu sédimentaire. a) courbes de sondage ; b) log vertical de teneur en eau, W et de temps de décroissance, T_1 obtenu par inversion du sondage RMP; c) log de perméabilité RMP obtenue par combinaison des paramètres RMP W et T_1 . .	105
Figure 58 : Fonctions de transfert entre résultats RMP et transmissivité par pompage obtenues dans différents environnements géologiques (modifié d'après Boucher 2007, Estimation des propriétés hydrodynamique des aquifères par RMP, Thèse de l'Université d'Orléans).	105

Liste des annexes

Annexe 1 LA RESISTIVITE ELECTRIQUE ET LA POLARISATION PROVOQUEE	63
Annexe 2 Le potentiel spontané.....	85
Annexe 3 Les méthodes sismiques.....	90
Annexe 4 Résonnance Magnétique Protonique.....	97

Préambule

Le projet de recherche ATTENA a été coordonné par le BRGM, avec un partenariat public (ADEME, l'INERIS) et privé (l'APESA, ArcelorMittal Real Estate France, BURGEAP, Rhodia et TOTAL). Le rôle de chacun des partenaires du projet est présenté dans le tableau ci-dessous.

Organisme	Rôle dans le projet ATTENA
ADEME	Suivi scientifique du projet
BRGM	Coordination du projet ; Responsable du protocole ATTENA, de l'application du protocole ATTENA sur les sites 2 (HAP) et 3 (hydrocarbures pétroliers), des modes opératoires consacrés aux outils géophysique et isotopique, participation aux modes opératoires analyse de gaz et capteurs passifs
APESA	Responsable de la communication du projet et coordination des travaux du groupe utilisateur
ArcelorMittal Real Estate France	Mise à disposition du site 2. Participation à l'élaboration du protocole et à son application sur le site 2.
BURGEAP	Mise à disposition du site 1. Participation à l'élaboration du protocole ATTENA. Responsable de l'application des guides Macaoh sur le site 1 (solvants chlorés)
INERIS	Participation à l'élaboration du protocole ATTENA ; responsable de l'application du protocole ATTENA sur le site 1 (solvants chlorés) ; responsable des modes opératoires analyse de gaz et capteurs passifs
RHODIA	Participation à l'élaboration du protocole ATTENA
TOTAL	Mise à disposition du site 3. Participation à l'élaboration du protocole et à son application sur le site 3.

Rôle de chacun des partenaires du projet ATTENA

L'objectif du projet ATTENA est triple :

- En premier lieu, il s'est agit de développer un protocole opérationnel d'utilisation de l'atténuation naturelle permettant une gestion proportionnée et raisonnée des sites pollués par certains polluants organiques (solvants chlorés, hydrocarbures pétroliers, HAP) dans le contexte réglementaire et méthodologique français actuel. Ce protocole a été élaboré à travers le travail d'un groupe d'utilisateur, constitué de représentants des différentes parties prenantes de la thématique des sites et sols pollués : industriels, administration, bureaux d'étude, sociétés de travaux, organismes de recherche. Le détail des membres du groupe d'utilisateurs est donné dans le Tableau suivant.

Organisme	Représentant
MEDDE/DGPR/BSSS	Dominique Gilbert
DREAL	Jérémie Heinz (DREAL Alsace), Erika Peixoto (DREAL Lorraine)
BRGM	Céline Blanc, Stéfan Colombano, Alain Saada, Laurent Rouvreau, Elicia Verardo, Clément Zornig
ADEME	Yves Duclos, Nadine Dueso
TOTAL	Yannick Bret, Sébastien Dehez, Agathe Reubrez
ArcelorMittal Real Estate France	Patrick Charbonnier
Rhodia Services	Thierry Delloye
INERIS	Fabrice Quiot, Claire Rollin
APESA	Jean-Louis Crabos, Jean-François Lascourreges
BURGEAP	Sébastien Kaskassian, Jean-Marie Côme
UIC	David Cazaux (Solvay)
UIMM	Christian Cornet (CETIM)
EPF Yvelines	Thomas Lacaze
UPDS	Franck Karg (HPC Envirotec), Joachim Maier (ICF), Sophie Michel, Thierry Gisbert (ARCADIS), Alain Dumestre (SERPOL)
UCIE	Thierry Blondel

Constitution du Groupe Utilisateur du projet ATTENA

- Dans un second temps, il s'est agi de confronter ce protocole sur 3 sites, mis à disposition par les partenaires du projet, afin de tester ses possibilités d'application sur des cas réels et d'apporter des améliorations pratiques pour l'utilisation de l'atténuation naturelle dans la gestion des sites.
- Enfin, le projet ATTENA a visé à développer et/ou tester des outils de caractérisation dans l'objectif de faciliter la mise en évidence de l'efficacité de l'AN sur un site. Ces outils (géophysique, isotopie, analyse de gaz, capteurs passifs) étaient destinés à améliorer la caractérisation des zones sources et panache, ou à faciliter l'identification des mécanismes contribuant à l'atténuation naturelle, en particulier des processus de biodégradation. Des modes opératoires de l'utilisation de ces outils ont été rédigés au cours du projet dans l'objectif de permettre aux professionnels une appropriation facilitée. Ces modes opératoires ont été examinés et validés au cours du projet par un comité scientifique constitué de spécialistes issus du monde Académique présentés ci-dessous

Membres du Comité Scientifique du projet ATTENA	Organisme
Peter Werner	Université de Dresde (D). Coordinateur du programme national allemand KORA. http://www.natural-attenuation.de/
Gerhardt Schäfer	Université Louis Pasteur – Strasbourg
Patrick Höhener	Université de Provence

Comité Scientifique du projet ATTENA

Les différents livrables du projet (protocole, cas d'étude, modes opératoires) sont publiés en ligne sur le site du projet ATTENA <http://attena.org/> et sur le site de l'ADEME.

1. Introduction

La méthodologie française de gestion des sites et sols pollués reconnaît l'atténuation naturelle (AN) comme une mesure de gestion qui peut être appliquée pour la gestion d'un site pollué, sous réserve que l'on puisse démontrer que cela est la meilleure solution de gestion, sur la base de critères techniques et économiques. L'AN consiste à surveiller la dépollution des eaux souterraines par des processus naturels (dispersion, dilution, adsorption, biodégradation,...). Elle s'applique plus favorablement aux polluants organiques susceptibles d'être dégradés, en particulier les BTEX les HAP et les solvants chlorés.

Le projet ATTENA, coordonné par le BRGM, est le fruit d'une recherche en partenariat public/privé entre l'ADEME, le BRGM, l'INERIS, l'APESA, BURGEAP, ArcelorMittal Real Estate France, Total et Rhodia.

L'objectif de ce projet est triple :

- En premier lieu, il s'agit de développer un protocole opérationnel permettant l'utilisation de l'atténuation naturelle dans le contexte réglementaire français. Ce protocole a été élaboré par les partenaires du projet, et validé à travers le travail d'un groupe d'utilisateurs, dans lequel les différentes parties prenantes de la thématique sont représentés (administration, bureaux d'étude, sociétés de travaux, industriels).
- Le second objectif consiste en une opération de démonstration, basée sur ce protocole, sur 3 sites contaminés par des polluants organiques (solvants chlorés ; hydrocarbures pétroliers ; HAP) mis à disposition par les partenaires du projet.
- Le troisième objectif du projet ATTENA porte sur le développement et la validation d'outils *in situ* de caractérisation et de surveillance des sites visant à améliorer la compréhension du fonctionnement du site, conformément aux prescriptions de la nouvelle méthodologie nationale de gestion des sites et sols pollués, élaborée en 2007 par le MEDDE. Les outils de caractérisation testés dans le cadre du projet ATTENA sont de 4 types : géophysique, géochimiques, analyse de gaz, isotopie. Chaque type d'outil donne lieu à la rédaction d'un guide méthodologique présentant les apports et limitations de la technique testée, validé par le comité scientifique du projet. Le présent guide porte sur l'utilisation des outils isotopiques dans le cadre de la démonstration d'AN.

Ce rapport présente les possibilités d'utilisation des outils géophysiques dans le cadre de la gestion des sites pollués, et plus particulièrement pour la démonstration d'atténuation naturelle sur un site.

Les méthodes géophysiques permettent de décrire le sous-sol à l'aide de paramètres physiques tels que :

- La densité
- La susceptibilité magnétique
- La résistivité électrique
- La permittivité électrique
- La vitesse d'ondes sismiques (P, S ...)
- ...

Les techniques de mesure de ces paramètres sont multiples ; pour la mesure d'un même paramètre, plusieurs techniques sont possibles.

L'interprétation de ces mesures consiste à relier ce paramètre physique à un objet géologique, tels que une couche géologique, une nappe phréatique, une salinité, des objets anthropiques enterrés (tuyau ...).

Souvent plusieurs phénomènes de nature différente peuvent conduire à une même mesure d'un paramètre physique : par exemple, un sable argileux et un sable contenant une eau légèrement salée auront la même résistivité électrique. C'est en couplant plusieurs méthodes géophysiques que l'on peut améliorer une interprétation.

D'une manière générale, les études géophysiques, qu'elles soient destinées à la recherche pétrolière, minière, à la géo-ingénierie ou à l'environnement visent à détecter ou décrire des structures particulières qu'il faut alors contrôler par un forage. Traditionnellement, les études géophysiques se situent en amont d'une étude de site, entre l'étude historique ou du contexte géologique générale, et la phase de prospection par sondages. Les résultats de la géophysique servent alors à orienter la campagne de sondages. On parle alors de caractérisation ou de diagnostic de site (cela s'applique également à la prospection pétrolière).

Plus récemment, les méthodes géophysiques sont employées pour la surveillance d'un phénomène : par exemple le pompage d'un réservoir pétrolier ou l'évolution d'un biseau salé en région côtière. On compare alors un paramètre physique mesuré à un certain instant à sa valeur mesurée à l'instant initial (début de la surveillance). Cette évolution n'a pu être possible que grâce au développement des technologies multi-capteurs et à l'automatisation des systèmes d'acquisition.

Les méthodes de surveillance géophysique seront naturellement très sollicitées dans les études de démonstration d'atténuation naturelle car c'est la délimitation d'une source, ou l'évolution d'un panache de pollution que l'on cherche à caractériser.

Ainsi, après un état de l'art sur les méthodes géophysiques applicables dans le domaine des sites pollués, le présent rapport présente la méthodologie i) de diagnostic d'un site pollué par des hydrocarbures pétroliers, HAP et organochlorés afin de déterminer les sources et la géométrie du panache, ii) de surveillance d'un panache. Cette méthodologie sera illustrée par des exemples réalisés dans le cadre du projet ATTENA.

2. Etat de l'art des techniques géophysiques pour l'atténuation naturelle

2.1. INTRODUCTION

L'état de l'art présenté dans ce rapport fait référence aux outils géophysiques utilisés dans le cadre du projet ATTENA. Ces outils avaient été choisis sur la base de :

- l'expérience passée du BRGM pour le diagnostic de sites pollués
 - o projet européen 5^{ème} PCRD HYGEIA
 - o projet CRITERRE
 - o projet ANR Precodd LOQUAS
- une étude bibliographique à partir de documents provenant de différents instituts et organismes publics :
 - o l'ADEME
 - o l'US-EPA¹
 - o les normes USTM
 - o les normes AFNOR
- une étude bibliographique à partir des articles de la littérature scientifique soumis à comité de lecture.

Dans le cadre du monitoring de l'atténuation naturelle, il est nécessaire de suivre les variations des propriétés du fluide interstitiel, d'un point de vue chimique et physico-chimique. L'ensemble des travaux montrent que les paramètres géophysiques sensibles aux propriétés chimiques et physico-chimiques du fluide interstitiel sont :

- la résistivité électrique
- la polarisation provoquée (effet capacitif du sol).
- Potentiel spontané (aussi appelée polarisation spontanée)
- La permittivité diélectrique

Certains paramètres géophysiques ne sont pas abordés dans ce rapport car l'expérience a montré qu'ils sont peu ou pas sensibles à la présence de pollutions organiques (méthodes sismiques, magnétiques). Par contre, ces méthodes géophysiques peuvent être utiles pour la reconnaissance géologique ou hydrogéologique visant à améliorer le modèle hydro-géochimique de l'atténuation naturelle (voir chapitre 4.4). C'est pourquoi ces méthodes sismiques et RMP sont décrites respectivement en annexe 3 et 4.

Plusieurs méthodes géophysiques permettent de mesurer chacun des paramètres² listés plus haut. La résistivité électrique peut être mesurée aussi bien par des méthodes électriques que par des méthodes électromagnétiques. La polarisation provoquée peut être mesurée par des méthodes électriques et dans une moindre mesure par des méthodes électromagnétiques. Le potentiel spontané est mesurable simplement par un voltmètre. La permittivité diélectrique est mesurable par la méthode du radar géologique.

Le radar géologique est une méthode encore couramment utilisée pour le diagnostic de site pollué, mais ses conditions d'utilisation sont trop restrictives pour en faire un outil routinier : il faut que le milieu soit peu conducteur (résistivité supérieure à 50 ohm.m) pour éviter les pertes par conduction ohmique, qu'il soit relativement homogène pour éviter des pertes par dispersion, et que la pollution soit située dans la gamme de profondeur accessible par le radar (inférieure à 5 m dans les cas favorables, plus généralement inférieure à 2 m). Pour toutes ces raisons, et surtout parce que la méthode n'est pas fiable (trop sensible aux conditions extérieures et faible profondeur d'investigation), le radar géologique a été écarté des

¹ <http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/properties/>

² Il ne faut pas confondre le paramètre mesuré et la méthode géophysique permettant de le mesurer.
ADEME

méthodes géophysiques pour le monitoring de l'atténuation naturelle. En fait sur les 3 sites tests qui sont représentatifs d'un grand nombre de cas, le radar géologique n'aurait été applicable que sur le site 3 (finalement abandonné à l'issue de la phase 1 du projet ATTENA). Sur les sites 1 et 3bis, les milieux sont trop conducteurs. Sur les sites 1bis et 2, les profondeurs à atteindre sont trop grandes.

L'AFNOR (1999) a édité un guide sur l'utilisation des méthodes géophysiques pour la détections des pollutions (norme FD X31-611-2). Le document présente les principes de chaque méthode et leur utilisation possible pour la détection de pollutions, ainsi qu'un tableau d'adéquation de chaque méthode en fonction du type de pollutions. Mais ces résultats sont déjà anciens ne tiennent pas compte des récents progrès depuis les années 2000.

L'ASTM (organisme normatif américain) a défini de nombreuses normes sur l'utilisation des méthodes géophysiques (électrique, sismique, radar géologique, diagraphies, électromagnétisme ...). Nous proposons quelques références de normes (ASTM, 2010, 2011a,b,c). Mais aucune norme ne présente l'utilisation de la géophysique dans le domaine des sites pollués.

L'US-EPA a édité plusieurs guides présentant comment utiliser les méthodes géophysiques sur des sites pollués (USEPA, 1997, 1998a, b, 2000). Mais comme pour l'AFNOR, ces travaux sont anciens et font appel à des concepts qui se sont avérés faux.

Aussi, confirmé par notre étude bibliographique, les seuls paramètres géophysiques intéressant pour le monitoring de l'atténuation naturelle sont :

- la résistivité électrique (voir annexe 1)
- la polarisation provoquée (voir annexe 1)
- Le potentiel spontané (voir annexe 2)

Ce sont sur ces trois principaux paramètres que la recherche bibliographique a été orientée.

On évoquera marginalement les méthodes sismiques et la Résonance Magnétique Protonique (voir annexes 3 et 4) qui sont des méthodes géophysiques utiles à la caractérisation du contexte géologique et hydrogéologique, mais ne sont pas directement sensibles à la présence d'une pollution, ni aux phénomènes de dégradation de cette pollution.

2.2. ETAT DE L'ART

Dans le cadre de l'étude de l'atténuation naturelle les méthodes géophysiques sont utilisées d'une part pour la détection des sources et des panaches (diagnostic géophysique environnemental), d'autre part pour le monitoring géophysique (mesure de l'évolution d'un paramètre géophysique). Bien que les méthodes géophysiques employées dans les 2 cas soient les mêmes, leur mise en œuvre et l'interprétation des résultats diffèrent sensiblement.

La plupart des travaux trouvés dans la littérature concernent le diagnostic géophysique environnemental. On trouve 3 grandes familles de pollution étudiées, classées par ordre décroissant du nombre d'études :

- Les lixiviats de décharge provenant de fuites de décharges : ils sont forment un panache composés d'un mélange complexe d'ions (chlorures par exemple), de matière organique plus ou moins dégradée, de produits organochlorés.
- Les LNAPL (produits non aqueux plus denses que l'eau) : ce sont toujours des produits pétroliers (essences, gas-oil provenant de dépôts ou de stations-service).
- Les DNAPL (produits non aqueux plus denses que l'eau) : en général, ce sont des sources de produits organochlorés (type TCE, PCE)

Bien que l'étude des déchets et des lixiviats de décharge ne concernent pas la présente étude (mais l'atténuation naturelle s'applique également aux lixiviats de décharge), les méthodes géophysiques utilisées pour les déchets et lixiviats sont les mêmes que pour les DNAPL et LNAPL.

Cardarelli et Bernabini (1997), Cardarelli et di Filippo (2004), Abu-Zeid et al. (2004) et Gazoty et al. (2012) donnent une bonne description des propriétés électriques des déchets et des panaches de lixiviats en fonction de leur état de maturation et du type de déchets. Les déchets sont conducteurs et leur résistivité diminue proportionnellement à leur état de dégradation. Ce résultat connu pour la conductivité de l'eau se confirme pour la conductivité globale du matériau. Cardarelli et di Filippo (2004), et Gazoty et al. (2012) observent une augmentation de la chargeabilité PP dans les déchets due à la présence de métaux mais aussi à des réactions d'oxydo-réduction dans le déchet. Cardarelli et di Filippo (2004), Aristodemou et Thomas-Betts (2000) observent cette même augmentation de la chargeabilité dans un panache de lixiviats qui pourrait être due à des changements de propriétés physico-chimiques, à des précipitations de métaux ou aux réactions d'oxydo-réductions elles-mêmes. Aucune hypothèse n'est vérifiée sur l'origine de l'effet PP des lixiviats de décharge.

De nombreuses publications concernent la détection de sources de pollutions par des hydrocarbures pétroliers ou goudrons de houille (HAP) ou par des organochlorés.

Ajo-Franklin et al. (2006) exposent les propriétés géophysiques des organochlorés et fournissent des modèles sur le contraste que donnerait des mélanges avec ces organochlorés. Mais il n'y a rien sur la résistivité, ni sur la chargeabilité PP.

Tant qu'ils ne sont pas dégradés et sont accumulés en phase pure, les DNAPL organochlorés sont résistants, mais la création de chlorures pendant leur dégradation rend le milieu conducteur (e.g. Chambers et al., 2004), Gourry et Mathieu, 2004, Daily et al., 1998). Récemment Vaudelet et al. (2012) confirment ces résultats pour un site contenant une pollution par des organochlorés (TCE, PCE). Ils observent également une anomalie de chargeabilité PP mais qu'ils ne peuvent interpréter.

Depuis Borner et al. (1993) et Vanhala et al. (1992), de nombreuses publications concernent des études de site avec des pollutions d'origine pétrolière par résistivité et polarisation provoquée (e.g. Martinho et al., 2006, Lopes de Castro et Castelo Branco, 2003, Godio et Naldi, 2003). Toutes les études montrent une pollution conductrice et un fort effet PP au-dessus ou à la périphérie des sources de pollution. Les travaux de Kulesa et al. (2006) et Behaegel et Gourry (2003) confirment des résultats également pour des pollutions provenant de goudrons de houille (hydrocarbures DNAPL).

Les explications sur l'origine de la forte conductivité et du fort effet PP sur des pollutions par hydrocarbures fait l'objet d'une large littérature et d'une nouvelle discipline : la biogéophysique. Depuis Atekwana et al. (2000), Sauck (2000), l'influence de la dégradation biologique sur la résistivité a été démontrée par plusieurs auteurs (Cassidy et al., 2001, Atekwana et al., 2004a,b, et Atekwana et al., 2006). Ces travaux ont été étendus à l'étude des propriétés PP pendant une biodégradation et aux effets d'un biofilm sur la PP (e.g. Abdel Aal, et al., 2004, 2006, 2009 et 2010, Davis et al., 2006, Williams et al., 2005, Ntarlagiannis et Ferguson, 2009, Slater al., 2009).

Dans le domaine du radar géologique, Steward et North (2006) proposent la seule publication montrant des résultats probants sur la détection d'une pollution par DNAPL mais par des mesures entre forages. En règle générale, la profondeur d'investigation est limitée avec le radar géologique et cette technique n'est plus utilisée pour la caractérisation d'une pollution.

Plusieurs travaux ont montré la relation entre le Potentiel Spontané et le potentiel redox des eaux souterraines (e.g. Timm et Moller, 2001, Nyquist et Corry, 2002). Naudet et al. (2003, 2004), Naudet et Revil (2005) ont montré que cette relation entre le potentiel spontané de surface et le potentiel redox des eaux souterraines est linéaire, via un coefficient de couplage de 0.5, appelé électro-redox. Arora et al. (2007) retrouve expérimentalement et par la théorie ce même coefficient de couplage de 0.5. Ces résultats ont été confirmés par Mainault et al. (2006) dans des essais en modèle réduit. D'après ces auteurs, le potentiel spontané serait donc un bon indicateur de l'état redox du milieu et pourrait être utilisé à des fins de monitoring à condition que l'on sache retrancher de la mesure brute tous les autres couplages électrocinétique, thermoélectrique ou électro-diffusif afin de ne conserver que l'effet électro-redox.

Des méthodes d'inversion de la PS ont été développées par Minsley (2006), Minsley et al. (2007) et Linde et Revil (2007). afin de localiser les fronts redox et focaliser sur l'origine des sources ou défauts de courant dans des sites pollués. Ainsi Minsley et al. (2007) montrent que la plupart des anomalies de PS sur un site

pollué par des PCE, TCE correspondent à des zones de fortes concentrations des organochlorés, mais qu'une partie des anomalies ne sont pas expliquées.

Des anomalies de PS ont été observées sur des pollutions par hydrocarbures pétroliers et HAP par Vichabian et al. (1999), Behaegel et Gourry (2003), Gourry et al (2005), Gourry et Saada (2006). Sur ces pollutions massives et souvent anciennes, les anomalies de PS ont une amplitude de plusieurs centaines de mV. Elles circonscrivent les sources de pollution.

Plusieurs publications s'attachent à la stratégie d'étude d'une pollution, d'une part pour le diagnostic, d'autre part pour le monitoring. Bien qu'elle soit appliquée à une pollution d'origine minière, l'étude de Buselli et Lu (2001) est remarquable sur la stratégie employée sur l'emboîtement des échelles. Naudet et al. (2012) présentent les résultats d'une étude sur une ancienne cokerie où les outils géophysiques ont été adaptés en fonction de l'échelle.

3. Signatures géophysiques de l'atténuation naturelle

3.1. REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE POLLUTION : SOURCE ET PANACHE

Afin d'examiner comment un polluant sous forme de source (concentrée) ou de panache (dilué, dissous) peut influencer les propriétés électriques, il faut d'abord fixer un schéma représentant une pollution de type LNAPL (Light Non Aqueous Phase Liquid, par exemple hydrocarbure pétrolier) d'une part, de type DNAPL (Dense Non Aqueous Phase Liquid, par exemple goudron de houille – HAP – ou organochloré) d'autre part.

3.1.1. Les produits légers, flottants, dits LNAPL

Les produits flottants, moins denses que l'eau, sont pour l'essentiel des produits pétroliers, raffinés ou non, tels que les essences, gas-oil, solvants pétroliers.

Comme ils flottent et sont peu solubles, ils restent globalement étalés à la surface de la nappe phréatique (

Figure 1). Ils sont soumis aux battements de nappes et vont donc également s'étaler dans la zone non saturés. Les produits sont au contact de la zone non saturée et donc potentiellement au contact de l'oxygène de l'air.

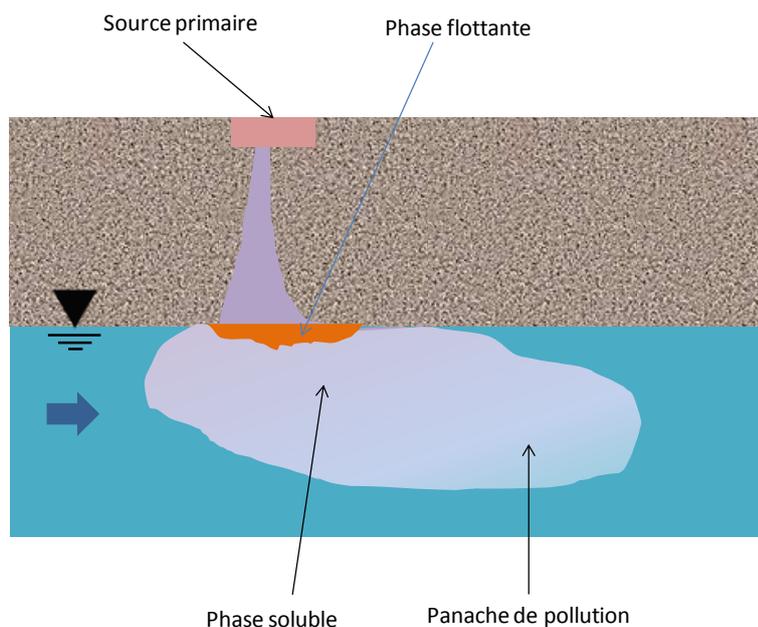


Figure 1 : Schéma d'une pollution de type LNAPL

Le comportement des LNAPL va donc avoir une influence sur la répartition verticale des différentes phases du polluant. La Figure 2 décrit précisément la distribution verticale de ces phases qui auront une influence sur les propriétés électriques des sols pollués par des LNAPL.

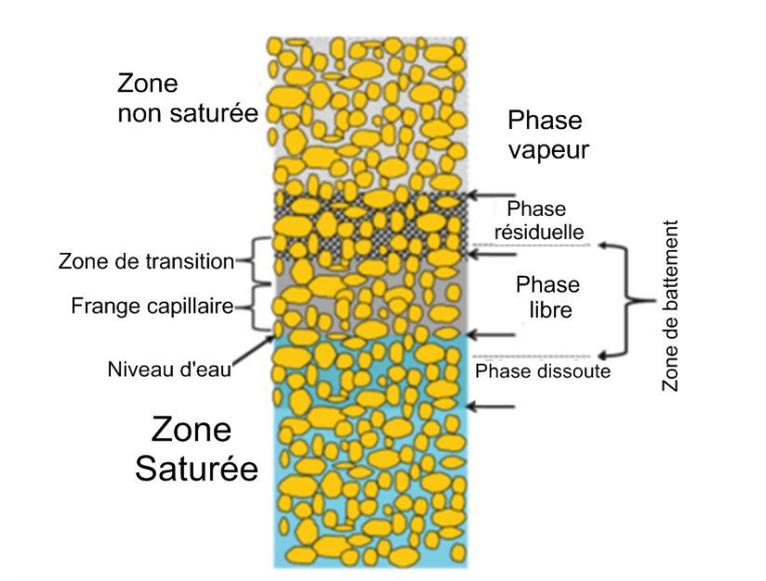


Figure 2 : schéma de la distribution d'humidité et des différentes phases dans la porosité à l'interface entre la zone saturée et la zone non saturée, d'après Atekwana et Atekwana, 2010.

3.1.2. Les produits lourds, plongeants, dits DNAPL

Les produits plus denses que l'eau, non miscibles dans l'eau (DNAPL), sont relativement nombreux ; on peut citer les produits organochlorés et une grande partie des produits issus de la carbochimie, dont les goudrons de houille contenant des HAP.

Comme ils ont une faible solubilité dans l'eau, les DNAPL ont tendance à plonger en masse dans la nappe et ne sont stoppés que par une couche imperméable. Suivant les contextes géologiques, on peut retrouver des amas de DNAPL à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. On les trouve souvent accumulés en masse compacte en base d'aquifère. Déplacés par le flux hydraulique, ils peuvent être piégés dans des dépressions de la couche imperméable (Figure 3). Sous l'effet de la dégradation anaérobie, ces DNAPL peuvent engendrer un panache de produits solubles dans l'eau et donc beaucoup plus mobiles que les produits purs (par exemple les chlorures avec les organochlorés de type PCE, TCE).

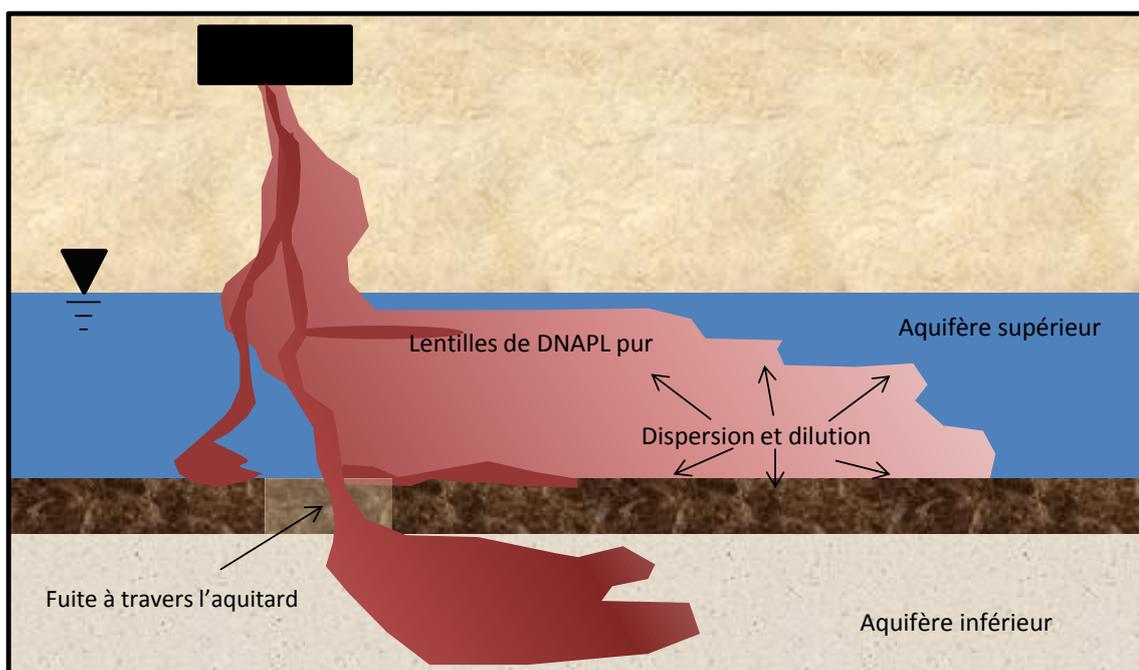


Figure 3 : Schéma d'une pollution de type DNAPL.

3.2. INFLUENCE DE LA POLLUTION SUR LA RESISTIVITE ET SUR LA POLARISATION PROVOQUEE

Par principe les mesures géophysiques appliquées aux sites pollués ont pour objet de mettre en évidence des anomalies de signal dues aux polluants : ce ne sont pas les valeurs absolues qui nous intéressent mais les contrastes de valeurs.

Par ailleurs, on ne raisonne généralement pas à partir de la valeur absolue d'une résistivité. Par exemple, une valeur de 20 ohm.m mesurée en un point ne renseigne pas sur la présence ou non d'une pollution. L'interprétation d'une mesure de résistivité n'a de sens que par analyse du contraste par rapport à un état de référence :

- Soit par rapport à la zone non polluée
- Soit dans la zone polluée elle-même par rapport à un état initial

On travaille donc toujours en relatif.

Toute chose étant égale par ailleurs (c'est-à-dire dans un même contexte géologique et hydrogéologique), pour qu'une pollution génère un contraste de résistivité, il faut que l'un des paramètres de la formule de la résistivité ρ_b change au niveau de la pollution (source ou panache) :

$$\sigma_b = \frac{1}{F} \left(\sigma_F + \frac{2\Sigma_s}{\Lambda} \right)$$
$$\frac{1}{\rho_b} = \frac{\phi^m}{a} \left(\frac{1}{\rho_F} + \frac{2\Sigma_s}{\Lambda} \right)$$

Avec σ_F conductivité du fluide (ρ_s est la résistivité du fluide),

Σ_s conductance de surface de grain,

ϕ porosité,

m facteur de cimentation.

Le paramètre Λ est inversement proportionnel à la surface effective de pore,

a = facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0.6 et 2 ($a < 1$ pour les roches à porosité intergranulaires et $a > 1$ pour les roches à porosité de fracture) ;

m = facteur de cimentation, il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,2 pour les calcaires cimentés.

Cette formule témoigne que la conductivité de fluide a une importance prépondérante sur la mesure de la résistivité globale du milieu. Il faut donc distinguer le cas où le polluant organique est dégradé et celui où il est partiellement dégradé.

3.2.1. Cas d'un polluant non dégradé

La conductivité du fluide est proportionnelle à la concentration en ions de l'eau porale connectée. Une phase pure non miscible des polluants organiques étudiés est très résistante. La plupart des LNAPL (HC pétroliers) et DNAPL (goudrons de houille et organochlorés) peuvent être considérés comme des isolants électriques (de l'ordre de 1 MOhm.m ou 0.01 μ S/cm) comparés à l'eau porale (20 à 100 ohm.m ou 100 à ADEME

500 $\mu\text{S}/\text{cm}$). L'ajout de polluant organique non dégradé aura pour effet de remplacer l'eau porale par un isolant électrique. Le polluant n'aura pas d'influence directe sur la conductivité du fluide mais plutôt sur la porosité connectée des pores.

Par exemple, si un sol a une porosité connectée de 30%, et que dans la zone saturée 40 % de la porosité est remplacée par un polluant organique (phase pure de LNAPL ou DNAPL), la porosité résiduelle connectée va tomber à 18%. Ainsi pour un sable où $a=0.68$, et $m=1.5$, la résistivité va augmenter d'un facteur 2. Pour une phase pure, le contraste de résistivité est significatif. Mais si le polluant est dispersé (1% de la porosité remplie par le polluant, soit 10 000 ppm), alors le contraste de résistivité n'est plus que de 1.5 %. On voit donc qu'une pollution non dégradée doit être très concentrée pour être détectable par résistivité électrique.

Ce cas a été rencontré sur le site 3, dans une raffinerie où on a détecté des anomalies résistantes correspondant à des hydrocarbures pétroliers non dégradés (cf. 5.1).

L'effet capacitif du sol mesuré par la polarisation provoquée peut donner des anomalies significatives dans certaines conditions encore mal connues. C'est le cas rencontré sur le site 1. En présence d'un polluant organique isolant (très résistant par rapport à l'eau porale), l'effet capacitif peut être augmenté par la restriction des pores (polarisation par constriction de pores- Figure 4b) ou par blocage différentiel des anions et cations à la manière de particules argileuses (effet de polarisation de membrane - Figure 4a).

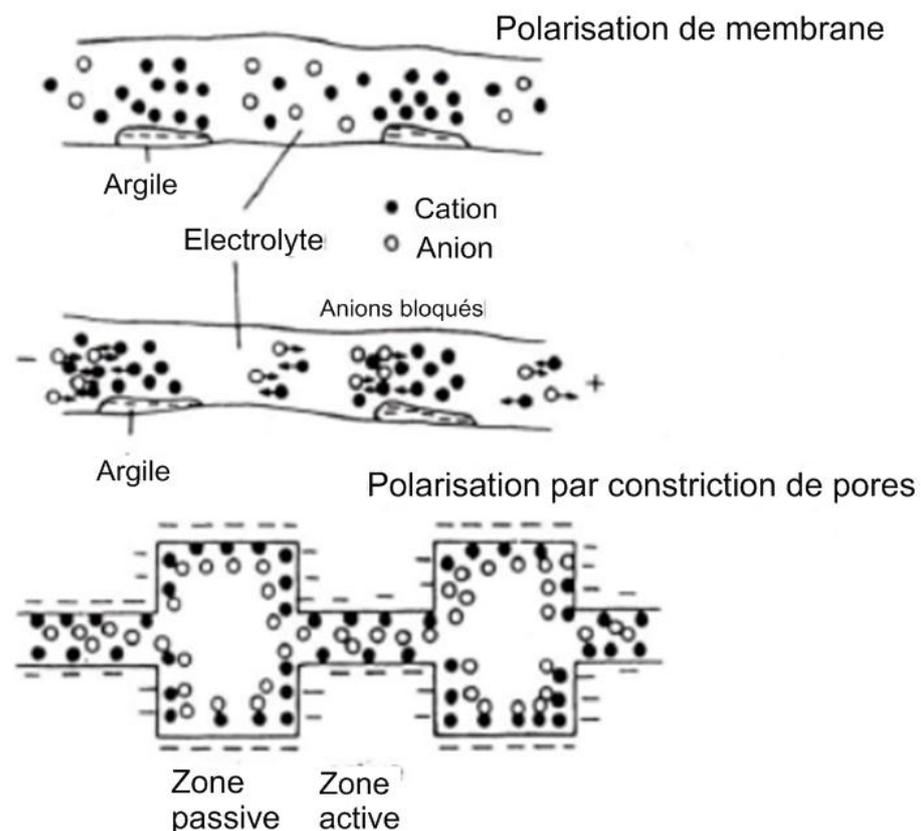


Figure 4 : schéma d'explication de l'effet de polarisation de membrane et due à la constriction de pores.

3.2.2. Cas d'un polluant partiellement dégradé

Par contre, si les conditions géochimiques et microbiologiques s'y prêtent, le polluant va se dégrader et modifier ainsi les propriétés électriques du fluide. Nous résumons ci-après l'article d'Atekwana et Atekwana (2010) qui ont fait un état de l'art exhaustif de l'influence de la biodégradation sur les propriétés électriques

des hydrocarbures légers (pétroliers). Une grande partie des concepts validés pour les LNAPL restent valables pour les DNAPL bien que les études sur les DNAPL soient moins fournies car les contrôles sur site sont plus complexes du fait que les polluants plongent en base d'aquifère.

Si l'activité bactérienne est suffisante pour dégrader significativement le polluant, l'altération microbienne des propriétés de l'aquifère va engendrer des modifications des propriétés géophysiques dues aux causes suivantes (Figure 5) :

1. Augmentation dans le temps de la population microbienne dégradant le polluant
2. Adhérence des bactéries sur les surfaces minérales et développement de biofilms,
3. Colmatage des pores de l'aquifère par les cellules bactériennes et les biofilms,
4. Diminution de la concentration du polluant par l'utilisation du carbone par les bactéries,
5. Produits de métabolites pendant la biodégradation, telles que acides organiques, bio-surfactants, et gaz biogéniques (par exemple CO₂, CH₄, H₂S, H₂),
6. Altération des surfaces minérales dues au weathering augmenté par l'action directe des colonies bactériennes et/ou par les métabolites (par ex. acides carboniques et organiques)
7. Augmentations de la concentration électrolytique par altération minérale et changement des états de saturation des solutés dans l'eau porale,
8. Précipitation de matériel biologique et de différentes phases minérales sur les surfaces minérales et dans les pores,
9. Processus des accepteurs d'électrons qui causent des diminutions et augmentations des espèces solutés et changement de la chimie redox de l'eau porale.

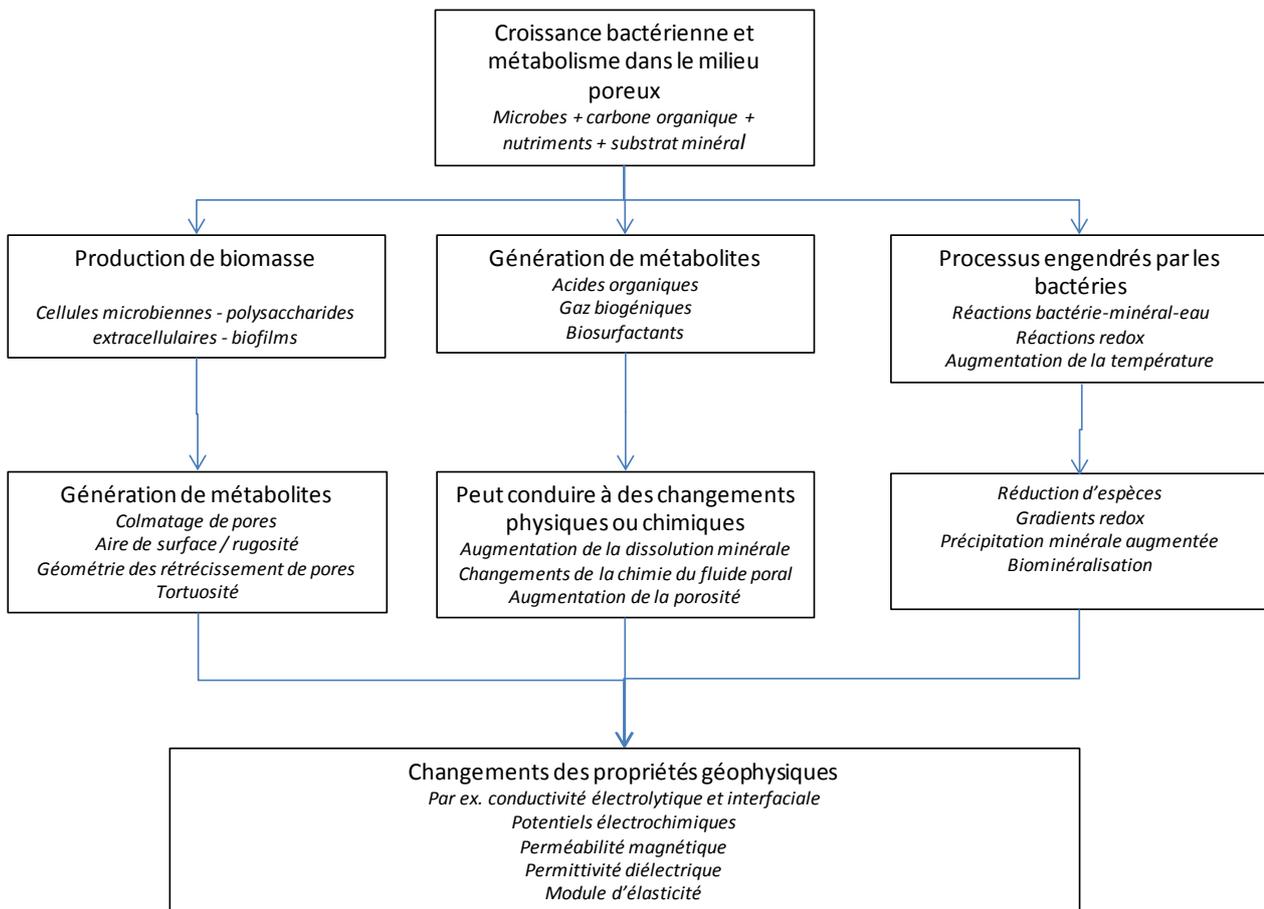


Figure 5 : diagramme de modifications des propriétés physiques d'un sol sous l'effet d'une pollution dégradante, (traduit d'après Atekwana et Atekwana, 2010).

Différents processus vont modifier la chimie du fluide interstitiel, ainsi que la texture et les propriétés de surface de la matrice, jouant ainsi sur tous les paramètres de l'équation de la résistivité globale du milieu.

La croissance des bactéries et l'adhérence de biofilms sur les surfaces minérales va modifier les caractéristiques de la porosité tel que la taille et la tortuosité.

Comme pour les produits non dégradés, la constriction des pores va augmenter l'effet de polarisation de membrane (Ntarlagiannis et al. 2005). Les changements du volume poral peuvent aussi provenir de processus créés par les bactéries, où des phases minérales conductrices (par exemple les hydroxydes de fer et les argiles) ou des phases isolantes (par exemple la calcite) précipitent dans l'espace poral et réduisent la porosité et la perméabilité, et donc la conductivité hydraulique. Le dépôt de phases minérales conductrices va augmenter la conductivité globale, ainsi que la conductivité de surface.

Dans le cas des hydrocarbures pétroliers et des goudrons de houille, il y a à la production d'acides organiques et carboniques qui peuvent dissoudre certaines phases minérales. Le processus de dissolution peut supprimer les cimentations ou les précipitations minérales qui vont modifier le facteur de cimentation (tendance à la diminution du facteur de cimentation). L'augmentation de la porosité va diminuer l'effet de polarisation de membrane. Les changements de porosité vont également modifier directement la résistivité globale.

Les changements de la rugosité et de l'aire de la surface des grains de matrice se produisent sous l'effet d'adhérence de bactéries sur les surfaces minérales. Les bactéries présentent une large surface ; aussi leurs adhérences aux surfaces minérales augmentent la surface spécifique et la rugosité globale. Abdel Aal et al. (2009) ont montré que l'augmentation de la rugosité de surface conduit à une augmentation de la composante imaginaire de la conductivité complexe, mesurée par PP. Plus récemment Albrecht et al. (2011) ont montré que la simple présence de bactéries en activité va augmenter l'effet de polarisation. De plus, à concentration de bactéries égale, la polarisation est plus importante pour des bactéries formant un biofilm que pour des bactéries ne formant pas de biofilm.

L'augmentation de la surface spécifique peut également provenir de la diminution de la taille de grains due au fractionnement de minéraux sous l'effet d'acides organiques et à la précipitation de nanoparticules de différentes phases minérales.

Les changements de la chimie du fluide poral peuvent se produire de différentes façons :

- Par la production de métabolites directement sous forme d'ions : par exemple les chlorures créés par dégradation des organochlorés,
- par la production d'acides organiques et carboniques et de bio-tensioactifs à partir de produits pétroliers et goudrons de houille.
- par l'altération chimique des minéraux par les acides organiques et carboniques qui relâchent des ions dans l'eau poral.
- Par l'utilisation des accepteurs d'électrons (par exemple NO_3^- , SO_4^{2-}) par les bactéries et la production d'espèces redox (par ex. Fe^{2+} , Mn^{2+}) qui peut aussi affecter la concentration ionique.

Ces changements de la chimie du fluide interstitiel affectent directement la conduction électrolytique mesurable par résistivité CC (Courant Continu, ou DC – Direct Current en anglais), polarisation provoquée, mais également par potentiel spontané (voir les potentiels de diffusion au chapitre 3.3).

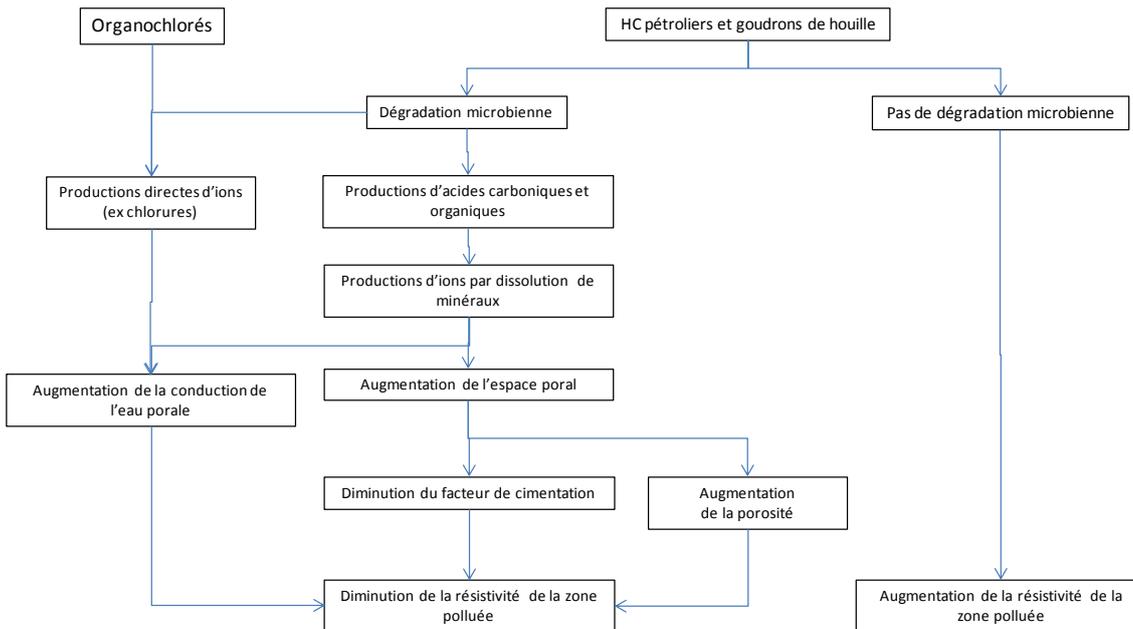


Figure 6 : Bloc diagramme synthétisant l'influence de la dégradation bactérienne sur la résistivité CC et la polarisation provoquée

3.3. INFLUENCE DE LA POLLUTION SUR LE POTENTIEL SPONTANE

Dans le cadre de sites contaminés, les trois principales sources des signaux PS sont associées à :

- des gradients hydrauliques, Le gradient hydraulique associé à l'écoulement de la nappe va générer un potentiel d'origine électrocinétique.
- des gradients géochimiques Le gradient géochimique associé aux contrastes de concentration chimique au sein du panache de contamination et principalement à sa périphérie va générer un potentiel électrochimique
- des gradients redox, qui sont reliés à l'activité microbienne. Enfin, le gradient de potentiel redox couplé à la présence d'une activité microbienne et de conditions particulières des bactéries va générer un potentiel souvent appelé électro-redox.

Le potentiel électrocinétique est de signe positif et croissant dans le sens d'écoulement de la nappe et peut être quantifié par calage avec des mesures piézométriques. La contribution du potentiel électrochimique est généralement de faible amplitude sur les mesure de terrain En effet, les variations de concentration saline n'excèdent généralement pas plus de 3 décades, soit un potentiel électrique associé de 42 mV. Ce qui reste négligeable, comparé aux composantes électrocinétiques et surtout électro-redox. Cette dernière composante est généralement celle qui permet de mieux identifier un panache de contamination en état de biodégradation.

En effet, les panaches de contamination contiennent toute une séquence redox dépendante des réactions physico-chimiques de biodégradation de la matière organique principalement contrôlées par les bactéries. Ces dernières puisent leur source d'énergie directement des réactions redox en utilisant l'énergie des électrons issus de l'oxydation de la matière organique pour leur chaîne énergétique avant de transférer les électrons à des accepteurs. Les bactéries jouent ainsi le rôle de catalyseurs des réactions d'oxydo-réduction. En plus de leur fonction de catalyseurs, les bactéries semblent jouer le rôle de transfert d'électrons au travers de leurs biofilms. Ces transferts ont lieu dans la zone de forte croissance des biofilms, où les concentrations en oxygène et matière organique sont abondantes. Ces conditions sont rencontrées à l'interface de la zone vadose et de l'aquifère (surface piézométrique de l'aquifère) où un fort gradient de potentiel redox est présent. Les biofilms serviraient alors de support à la migration des électrons entre la zone réduite sous le niveau piézométrique et la zone oxydée au-dessus du niveau piézométrique. D'autres mécanismes facilitant ce transfert d'électrons sont également proposés comme la présence d'oxydes de fer, d'argile, de biominéraux ou de matériaux biologiquement conducteurs comme les

substances polymériques extracellulaires sécrétées par les bactéries et qui semblent être électriquement très conductrices. Ce phénomène assimilable à une bio-géo-batterie et comparable au phénomène rencontré dans les gisements de minerai métallique semblerait expliquer en grande partie les forts signaux négatifs observés à l'aplomb des panaches de contamination (Figure 7). De ce fait, les mesures PS pourraient servir à l'identification des zones en conditions réductrices induites par l'activité microbiologique au sein d'un panache de contamination.

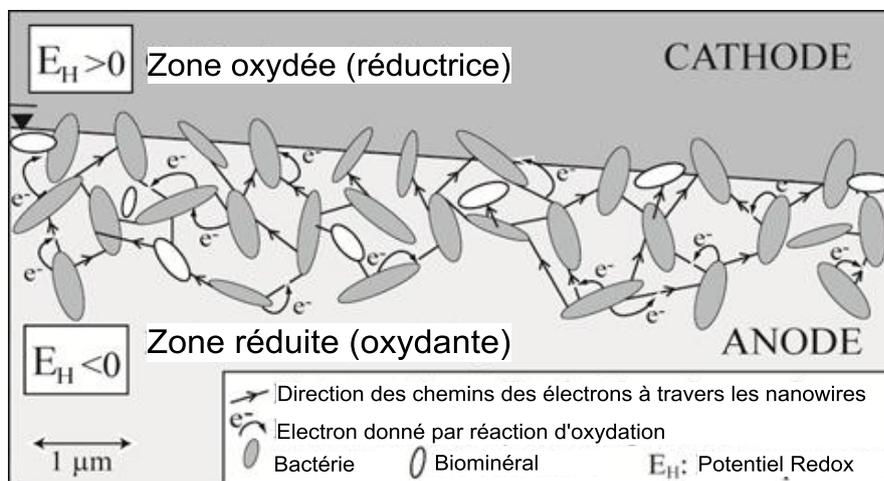


Figure 7 Modèle conceptuel de biogéobatterie schématisant l'effet « électro-redox » qui génère un champ électrique lié à l'activité microbienne et qui, par conséquent, induit des anomalies PS. Les filaments protéiques extracellulaires et/ou les biominéraux orientés sont des conducteurs pour les électrons produits dans la région réductrice (anode) et captés dans la région oxydée (cathode). Un courant électrique circule alors de l'anode vers la cathode de ce système.

De plus, dans les environnements pollués, l'interaction des bactéries avec la matière minérale induit des modifications bio-physico-chimiques du milieu. Elles sont attachées à la surface de la matrice minérale, formant comme un tapis. La formation de ces colonies à la surface de la matrice engendre le plus souvent des modifications de la texture des grains avec une diminution de la porosité et donc une diminution de la perméabilité de la roche. Ces modifications peuvent également avoir un impact sur le potentiel électrocinétique mais de façon moindre par rapport au signal « électro-redox ».

4. Application dans le cadre de l'atténuation naturelle : mise en œuvre, interprétation et points-clés

4.1. LA CHAÎNE D'ÉTUDE GEOPHYSIQUE

Une étude géophysique est traditionnellement divisée en 5 étapes :

- Préparation de l'étude
- Acquisition des mesures
- Traitement de mesures
- Interprétation des résultats
- Restitution des résultats

Suivant les recommandations de l'AGAP Qualité, ces 5 étapes doivent être détaillées dans la proposition technique et dans le rapport remis par le prestataire géophysique. Ce chapitre présente l'essentiel de ces recommandations

4.1.1. La préparation de l'étude

La préparation de l'étude est elle-même divisée en plusieurs étapes :

- Choix de la zone d'étude basé sur l'historique du site :
 - a. Géologie et hydrogéologie du site si elles sont connues,
 - b. Position de la pollution (source, panache) d'après les chroniques disponibles,
 - c. Présence d'infrastructures qui peuvent pénaliser l'utilisation de certaines méthodes (voir chapitre 4.7)
- Choix de la méthode géophysique en fonction du type de polluant et de son état de biodégradation (voir chapitre 3)
- Choix de la configuration de mesure en fonction :
 - a. de l'échelle d'étude (voir chapitre 4.5)
 - étude globale d'un site à grande échelle
 - étude ciblée sur un objet particulier à plus petite échelle
 - b. de la profondeur de la cible (source ou panache).

4.1.2. La phase d'acquisition

La phase d'acquisition est naturellement la plus cruciale d'une étude géophysique. Sans mesure de bonne qualité, on ne peut pas faire de bonne interprétation des résultats. Les outils géophysiques modernes sont de plus en plus automatisés et peuvent être utilisés par des non-spécialistes. Mais cette automatisation a été développée par les constructeurs pour faciliter la mise en œuvre, non pour une utilisation sans connaissance de la méthode.

Les utilisateurs des outils géophysiques doivent être formés à la méthode et avoir une expérience de plusieurs années dans l'étude des milieux pollués.

C'est pourquoi l'AGAP Qualité recommande que la mise en œuvre soit assurée a minima par un technicien supérieur formé à l'instrument, et supervisée par un ingénieur expérimenté. L'AGAP Qualité recommande de fournir les CV des intervenants à la remise de l'offre, en spécifiant l'expérience de chaque intervenant dans la méthode proposée et pour le type d'étude sollicitée.

4.1.3. Traitement

Le traitement de l'étude consiste à transformer la mesure brute enregistrée sur le terrain en un résultat interprétable.

La première étape consiste à filtrer les mesures géophysiques qui peuvent être entachées d'un bruit (par exemple parasite électromagnétique, infrastructure enterrée). Les critères de filtrage doivent être impérativement spécifiés et justifiés dans le rapport d'étude.

La seconde étape consiste à restituer les données filtrées sous forme d'un résultat interprétable par le géophysicien :

- Une simple carte du paramètre mesuré (par exemple carte de potentiel électrique pour la Polarisation Spontanée, ou la mise-à-la-masse)
- Un sondage 1D ou une coupe 2D d'un paramètre géophysique après inversion des mesures (par exemple coupe de résistivité pour la tomographie de résistivité électrique, ou coupe de vitesse sismique onde S pour la MASW).

L'inversion consiste à proposer un modèle de terre (1D s'il est supposé tabulaire, 2D ou 3D) d'un paramètre géophysique (résistivité, vitesse sismique) qui corresponde aux mesures brutes de terrain.

4.1.4. Interprétation

L'interprétation d'une étude géophysique consiste à rendre les données traitées intelligibles au client. Il s'agit de faire « parler » les mesures en fonction de l'objectif de l'étude.

Les résultats attendus par l'utilisation de la géophysique pour la mise en évidence de l'atténuation naturelle ont été décrits dans les chapitres précédents. Notamment, on a vu que la connaissance de la résistivité globale du milieu peut renseigner sur l'état de dégradation, qui est l'un des problèmes de l'atténuation naturelle.

En revanche il n'est pas possible de quantifier dans l'absolu les concentrations en polluants, l'état de biodégradation du polluant, l'activité présente des bactéries à travers les méthodes géophysiques. A ce jour, les méthodes géophysiques ne sont interprétées qu'en relatif par rapport à un état de référence qui sera :

- le milieu non pollué (dit normal) dans le cas d'un diagnostic,
- l'état initial avant le début de la surveillance.

Cette phase d'interprétation doit être réalisée dans la mesure du possible par un géophysicien senior, en collaboration avec un ingénieur environnement. L'étude des milieux pollués requiert des connaissances de chimie et microbiologie que ne possède généralement pas le géophysicien.

4.1.5. La restitution des résultats

La restitution des résultats passe avant tout par la remise d'un rapport détaillant l'ensemble des étapes de l'étude. L'AGAP Qualité propose un plan type de rapport d'étude géophysique.

Les résultats des mesures géophysiques doivent être présentés sous forme de carte ou de coupe à une échelle suffisante pour être exploitable en l'état par le client. Il est recommandé de fournir également les résultats sous forme numérique afin que le client puisse les intégrer dans son modèle de site, au même titre que les données sur la pollution, la géologie ou l'hydrogéologie.

4.2. CHOIX DES METHODES GEOPHYSIQUES

La mise en évidence de l'atténuation naturelle par méthodes géophysiques requiert un grand nombre de compétences alliant géophysique et chimie de l'environnement. C'est une science encore jeune ; on en

situe la naissance au début des années 2000. Elle est à l'origine d'une nouvelle discipline la bio-géophysique (Atekwana et al. , 2006, Atekwana et Atekwana, 2010).

La proposition des méthodes géophysiques à mettre en œuvre reviendra toujours à un géophysicien expérimenté, superviseur des travaux. Les méthodes et la méthodologie exposées plus haut sont le résultat de plusieurs années d'expérience. La connaissance théorique des méthodes géophysiques ne suffit pas. En matière de science du sol, on sait que chaque cas d'étude est un cas particulier. Il faut toujours adapter les méthodes et l'approche méthodologique. Par ailleurs, cette science est encore jeune et de nouveaux résultats sortent régulièrement, qui, chacun, apporte de nouvelles explications aux signatures géophysiques mesurées sur le terrain. Il faut donc faire une veille technologique perpétuelle. Le choix d'un superviseur expérimenté est un critère que doit exiger le client avant de retenir une offre.

Dans le cadre de l'atténuation naturelle, la géophysique peut être utilisée à différents stades du processus de démonstration de l'atténuation naturelle :

- Afin de compléter la connaissance géologique et/ou hydrogéologique d'un site (chapitre 4.4),
- Afin de réaliser un diagnostic environnemental initial du site, c'est-à-dire pour la recherche de sources et/ou d'un panache de pollution (chapitre 4.5),
- Afin d'assurer une surveillance du panache de pollutions.

Mais avant tout, toute étude géophysique dans le domaine environnemental exige un certain nombre de connaissances de base sur le site qui sont détaillées au chapitre 4.3

4.3. LES CONNAISSANCES D'ENTREE NECESSAIRES

Dans le cadre d'un diagnostic de site, l'utilisation des méthodes géophysiques se situe entre l'étude historique et la première phase de caractérisation par des forages. C'est dans cet ordre que les résultats de la géophysique auront le meilleur coût/ bénéfices.

L'historique du site est donc nécessaire avant d'engager des études géophysiques. Les éléments fondamentaux sont :

- un bilan de l'activité industrielle du site afin de connaître les éventuels polluants
- un bilan des accidents éventuels recensés avec date, positionnement et volume incriminé.
- un plan du site à l'échelle la plus appropriée, en spécifiant les structures restantes et les structures démantelées, aériennes et enterrées et la nature des matériaux de ces structures (métallique, plastique, béton armé ou non ...).

Comme pour toute étude géophysique, il est nécessaire de connaître la géologie et l'hydrogéologie du site :

- La lithologie et la stratigraphie des formations géologiques
- La géologie structurale connue et/ou supposée (présence de faille par exemple)
- Le positionnement et les coupes géologiques des forages du site et/ou ceux proches du site à condition qu'ils soient représentatif de la lithologie du site.
- La présence de nappes phréatiques libres, perchées ou captives, permanentes ou temporaires, ainsi que l'évolution du niveau piézométrique moyen saisonnier

Une visite de site s'impose toujours avant une étude géophysique, ceci afin de repérer d'éventuelles difficultés non prévues pour la mise en œuvre et pour orienter les profils de mesures.

Enfin la mise en œuvre des méthodes géophysiques proposées (méthodes électriques de résistivité CC, polarisation provoquée et potentiel spontané) nécessite la connaissance de l'existence et du positionnement des objets qui pourraient parasiter les mesures :

1. Réseaux enterrés, et principalement les tuyaux métalliques et les lignes électriques enterrées
2. Structures enterrées non visibles en surface

3. Grillages et glissières de sécurité (tout objet métallique aligné et planté au sol par des piquets métalliques)
4. Bâtiments
5. Routes

Les points 1 à 3 sont des parasites qui vont empêcher toute mesure correcte.

Les points 4 et 5 doivent être connus pour organiser le plan de campagne. Grâce aux nouveaux équipements de mesure et de traitements, il est possible de s'affranchir d'une partie des inconvénients liés aux routes et bâtiments (voir exemple au chapitre 5.3).

On pourra détecter et positionner les réseaux et autres structures enterrées à l'aide d'outils géophysiques tels que le radar géologique, le magnétisme (objets ferromagnétiques) et l'électromagnétisme si ces objets sont métalliques. Un document devrait être édité en 2013 par l'ADEME avec le concours de l'AGAP Qualité (Association Française pour la Qualité en Géophysique Appliquée) sur la reconnaissance des objets enterrés par géophysique. Ce guide sera complémentaire à ce mode opératoire.

4.4. COMPLETER LES DONNEES D'ENTREE PAR LA GEOPHYSIQUE

Comme expliqué précédemment, afin d'établir un diagnostic de site pollué et d'en faire le modèle dans le cadre d'un monitoring de l'atténuation naturelle, il est nécessaire d'avoir une description aussi précise que possible de la géologie et de l'hydrogéologie :

- Lithologie
- Géologie structurale, notamment failles, à toutes les échelles. Par exemple, un DNAPL peut être piégé dans une petite dépression du toit d'un aquitard.
- Niveau de nappe phréatique.

La géophysique est souvent utile pour compléter cet état initial préalable à l'étude de l'atténuation naturelle car les forages sont parfois insuffisants pour une description de la géologie et de l'hydrogéologie.

4.4.1. Compléter la géologie par la géophysique

Pour une description de la géologie, les 2 méthodes géophysiques recommandées sont :

- Les méthodes sismiques (voir annexe 3)
 - o Sismique réfraction
 - o Sismique MASW
 - o Sismique réflexion
- Les méthodes électriques de résistivité CC (voir annexe 1)
 - o Tomographie (Panneau) 2D
 - o Tomographie 3D de résistivité électrique

Les méthodes sismiques sont sensibles aux variations de vitesses de propagation sismique :

- En sismique réfraction et sismique réflexion : vitesse onde P
- En sismique MASW : vitesse onde S

En sismique réfraction, on calcule des sondages 1D ou des tomographies 2D de vitesse d'onde P. En sismique MASW, on calcule des sondages 1D ou des tomographies 2D de vitesse d'onde S. En sismique réflexion, on ne distingue que les couches dont la vitesse est supérieure à celle de la couche immédiatement supérieure, alors que la répartition des vitesses est indifférente en MASW. Par ailleurs, la méthode MASW est plus simple à mettre en œuvre sur le terrain, puisque l'on peut utiliser des capteurs sismiques simplement posés au sol sans couplage physique avec le sol, alors qu'en réfraction, l'énergie de ces ondes étant faible, il est nécessaire d'avoir un bon couplage et une énergie de source plus puissante qu'en MASW.

Mais la profondeur d'investigation est plus faible en MASW : elle atteint au maximum 30 m avec une source à chute de poids accéléré. La profondeur d'investigation est liée au contenu basse fréquence du signal source et de la puissance de la source. Or il est difficile de maîtriser l'énergie basse fréquence d'une source sismique. La profondeur d'investigation peut atteindre 200 m en sismique réfraction, car elle est principalement liée à la longueur totale du dispositif de mesure et à la puissance de la source, dans la mesure où on peut utiliser des sources à explosif plus énergétiques.

La sismique réflexion haute résolution (SRHR) permet de restituer l'image géométrique des réflecteurs correspondant aux interfaces géologiques. Elle est particulièrement bien adaptée à la description de l'environnement géologique. La profondeur d'investigation n'est pas limitée avec cette méthode à condition que la puissance de la source sismique soit suffisante.

Les méthodes électriques ont été décrites en détail en annexe 1. La résistivité électrique étant sensible aux variations de porosité et de facteur de cimentation, elle permettra de distinguer des couches de lithologie contrastée : par exemple un sable et un gravier, un limon et un calcaire. Comme la résistivité est sensible à la conductance de surface, notamment des argiles, la méthode est très sensible à la présence d'argiles qui apparaissent très conductrices. La profondeur d'investigation du panneau électrique n'est théoriquement pas limitée : elle est fonction de l'écartement des électrodes les plus éloignées. Il faut également assurer une source de courant suffisamment puissante. Mais dans les cas d'étude qui intéressent l'atténuation naturelle, une profondeur de 200 m peut être aisément atteinte.

4.4.2. Compléter l'hydrogéologie par géophysique

La reconnaissance du niveau piézométrique peut être menée :

- Par méthodes électriques (tomographie 2D ou 3D)
- Par Résonance Magnétique Protonique (RMP, voir annexe 2)

La résistivité électrique volumique est sensible à la saturation en eau dans le sol, et à la conductivité de l'eau porale. Si l'interface entre zone saturée et zone non saturée est franc (c'est-à-dire si la frange capillaire n'est pas trop large), la nappe phréatique apparaît plus conductrice que la zone non saturée. Mais cette interface est souvent floue car la saturation croît progressivement et la résistivité électrique résultante décroît lentement. L'interface est alors mal marquée.

La Résonance Magnétique Protonique (RMP) est une méthode unique en géophysique car elle détecte et quantifie directement la présence d'eau libre dans le sol. Cette méthode n'est sensible qu'à la présence de molécules d'eau et il n'y a pas d'ambiguïté sur l'interprétation. La profondeur d'investigation maximum est entre 50 et 80 m suivant le niveau de bruit électromagnétique ambiant. Cette méthode est très sensible au bruit électrique 50 Hz, son utilisation est souvent limitée dans les secteurs habités ou dans les zones industrielles.

4.5. LA RECHERCHE DE SOURCES ET LE DIAGNOSTIC DE SITE

4.5.1. Le principe d'emboîtement des échelles

Même en présence de connaissances historiques, environnementales précises de la pollution, une étude géophysique se conduit toujours en 2 phases :

- Une phase d'étude générale, dite à grande échelle³,
- Suivie d'une phase sur des points ciblés, plus détaillée, dite à petite échelle.

³ Contrairement à sa définition du dictionnaire, on désignera par « grande échelle » une échelle dont le dénominateur est grand. Par exemple $1/1000^{\text{ème}}$ sera une plus grande échelle que $1/100^{\text{ème}}$. Pour un géographe, c'est la valeur de l'échelle qui sert de référence : $1/1000^{\text{ème}} = 0.001$ est plus petit que $1/100^{\text{ème}} = 0.01$. Mais l'usage commun que nous utilisons ici a inversé l'ordre.

La phase à grande échelle permet de définir les conditions de l'encaissant non pollué, de déterminer les grands ensembles géologiques en termes de résistivité, et d'identifier un ou plusieurs secteurs anormaux que l'on choisira d'étudier à une échelle plus fine.

4.5.2. Etudes géophysiques à grande échelle

Les méthodes géophysiques à grande échelle doivent être très intégratrices et à grand rendement pour que leur coût reste économiquement acceptable. Ces méthodes sont :

- Le Potentiel Spontané (PS),
- le rectangle-gradient en mode résistivité ou polarisation provoquée,
- l'électrode enterrée en mode résistivité ou polarisation provoquée.

Les méthodes « rectangle » ou gradient, d'une part, et « électrode enterrée » d'autre part font partie de la famille des méthodes électriques, et sont caractérisées par deux configurations particulières des électrodes d'injection et de mesure. La mise en œuvre de ces méthodes est détaillée dans l'annexe 1. L'interprétation des résultats est basée sur les concepts expliqués au chapitre 3.2, propres à la résistivité et à la polarisation provoquée.

Ces méthodes sont très efficaces pour positionner en (X, Y) les sources et panaches de pollution. Par contre, elles ne permettent pas directement de retrouver la profondeur des sources et panaches. Néanmoins, la taille et l'intensité de l'anomalie peut donner des informations sur la profondeur. Une anomalie avec une frontière à faible gradient sera plus profonde qu'une anomalie de même maximum mais aux frontières pentues.

La source de signal est naturelle pour la PS, donc on n'a pas à la gérer. Elle est fixée pour le gradient, la mise-à-la-masse ou l'électrode enterrée. Pour ces 3 techniques d'acquisition, les électrodes d'injection sont fixées en début d'opération. Une fois installées, on n'a plus à les gérer, d'où un gain en temps et personnel.

Ces méthodes sont mises en œuvre à partir d'un quadrillage, afin de déterminer la position du récepteur de mesure. Le choix de la maille de mesure va fixer la résolution latérale, et donc la taille minimum de l'objet résolu. Dans la pratique, il faut un minimum de 3 points dans une zone anormale pour confirmer l'existence de cette anomalie. Ainsi si un point de mesure diffère de l'environnement, mais se retrouve isolé, il pourra être :

- soit éliminé car la taille de l'objet est inférieure à celle des objets recherchés.
- Soit être vérifié : en matière d'environnement, il est souvent nécessaire de rechercher l'ensemble des sources car même une petite source de pollution peut générer de grands panaches. Il faut alors resserrer la maille autour des points anormaux isolés (division par 2 de la maille). Si l'anomalie ne ressort pas sur 3 points, il faut alors le considérer comme une erreur de mesure ou un problème local superficiel ne correspondant pas à une source de pollution.

Afin de bien distinguer ce qui est anormal de l'encaissant non pollué (ce qui est considéré comme normal), il est nécessaire d'avoir une vision d'ensemble suffisamment large pour établir la gamme normale du paramètre mesuré.

Un grand principe de ces levés à émetteur naturel ou fixe est de fermer les anomalies. Le non-respect de ce principe est générateur de nombreuses erreurs. La fermeture d'anomalies consiste à ne déclarer « anomalie » que des ensembles de points de mesures qui sont entourés de mesures situées dans une gamme dite normale : en d'autres termes, il faut que l'on puisse tracer les limites des anomalies. En effet, une source ou un panache de pollution ont des limites. Si un ensemble de mesures anormales s'étend jusqu'au bord de la zone prospectée, il faut étendre les mesures dans ce secteur jusqu'à atteindre des niveaux normaux du paramètre mesuré. Une anomalie non fermée peut simplement être une tendance de l'encaissant, par exemple l'épaississement d'une couche géologique.

Cela oblige à réaliser des mesures non prévues dans le planning initial et donc à dépasser le volume et temps prévu pour la prospection. C'est une éventualité à prévoir dans le devis initial. Par exemple, il faut compter 10% de points supplémentaires.

4.5.3. Etude géophysiques à petite échelle

La localisation d'anomalies de PS, de résistivité ou de PP à partir d'une cartographie générale peut être suffisante dans des cas d'étude les anomalies ne sont pas profondes et où on peut engager des forages de contrôle à faible coût.

Mais l'incertitude de la profondeur ou la nécessité de mieux connaître la géométrie des sources et panaches peut conduire à engager une nouvelle campagne de géophysique ciblée sur des anomalies particulières. Par exemple, ce choix peut s'avérer économiquement intéressant si le coût de chaque forage de contrôle est supérieur à une nouvelle étude plus précise de géophysique. En dehors de ces considérations de coût, il peut être instructif de connaître la relation et la connexion possibles entre anomalies.

Ceci nous conduit à envisager des méthodes géophysiques plus focalisantes et surtout donnant une description en profondeur (2D) ou volumique (3D) de chaque anomalie.

Les méthodes potentielles telles que le Potentiel Spontané ne permettent pas d'obtenir une vision en profondeur. En revanche, il existe des techniques d'acquisition de résistivité électrique et de polarisation provoquée qui permettent d'améliorer la description de chaque anomalie locale de type source de pollution ou de panache :

- la tomographie électrique 2D ou 3D,
- la mise-à-la-masse

La description du principe et de la mise en œuvre sont données en annexe 1 :

- chapitre a pour la tomographie électrique 2D,
- chapitre E pour la tomographie électrique 3D
- au chapitre c pour la mise-à-la-masse.

La tomographie 2D ou 3D de résistivité ou de polarisation provoquée donne la répartition 2D ou 3D de la résistivité ou de l'effet PP (chargeabilité, chargeabilité normalisée ou facteur métal, déphasage). Les objets qui intéressent l'atténuation naturelle (sources et panaches) sont donc localisés dans l'espace (contrairement aux méthodes à grande échelle qui ne permettent pas de connaître la profondeur). On peut identifier la géométrie de ces objets. On peut voir d'éventuelles connexions entre des anomalies, tels que des alimentations en polluants venant d'une source.

La mise-à-la-masse en mode résistivité ou polarisation provoquée est précisément conçue pour donner l'extension latérale d'un panache et établir les connexions entre sources et panaches. Le point d'injection du courant électrique étant situé dans la source ou dans le panache, cela suppose que l'on ait déjà établi un diagnostic du site, par une cartographie en configuration gradient ou par quelques tomographies 2D. Mais afin de réduire la quantité d'investigations, une mise-à-la-masse donnera l'ensemble des points connectés au point d'injection de courant électrique à travers le panache de polluant. La mise-à-la-masse est une bonne alternative à la réalisation d'un réseau de tomographies électriques.

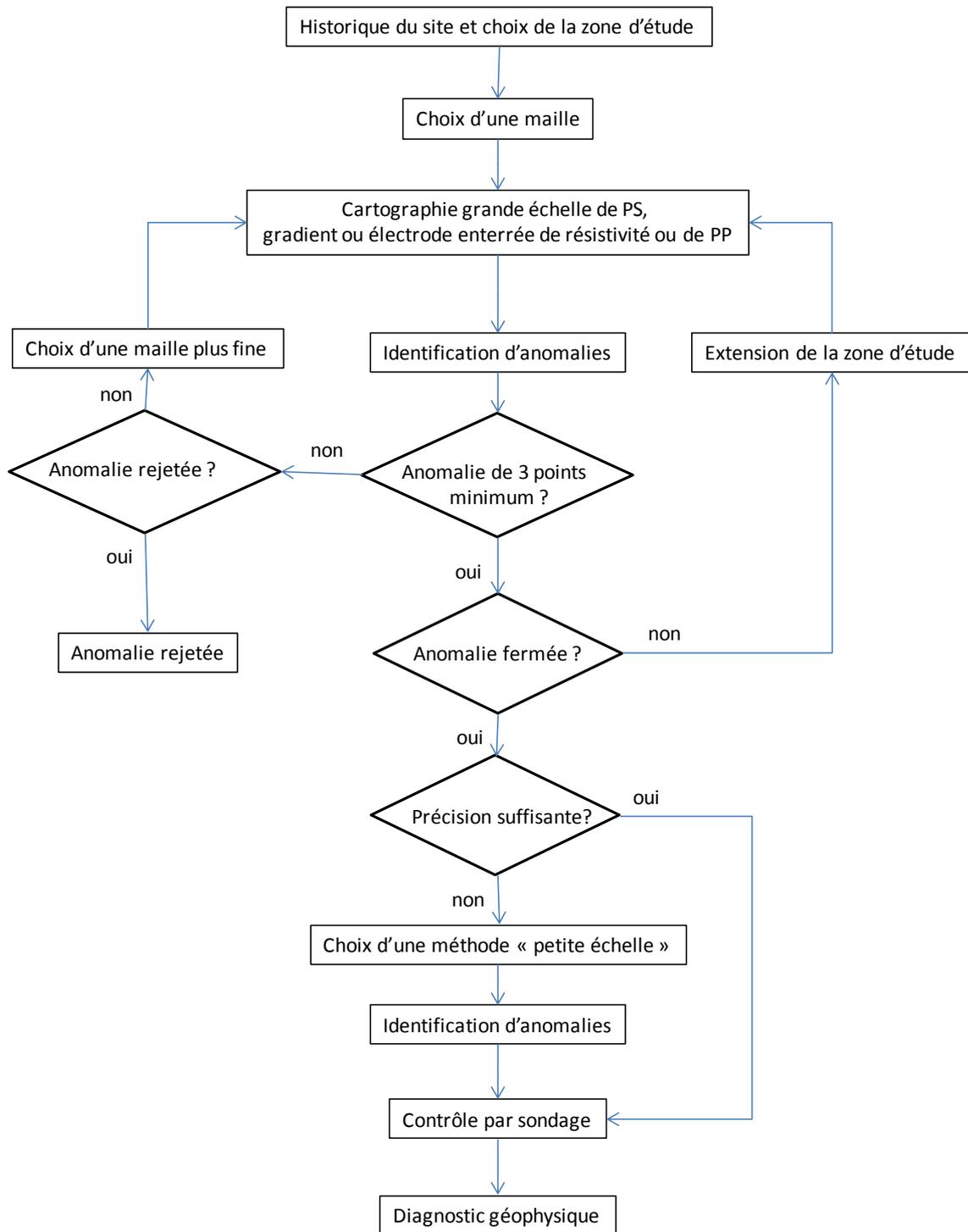


Figure 8 : Diagramme de la conduite d'une étude géophysique pour le diagnostic de l'atténuation naturelle.

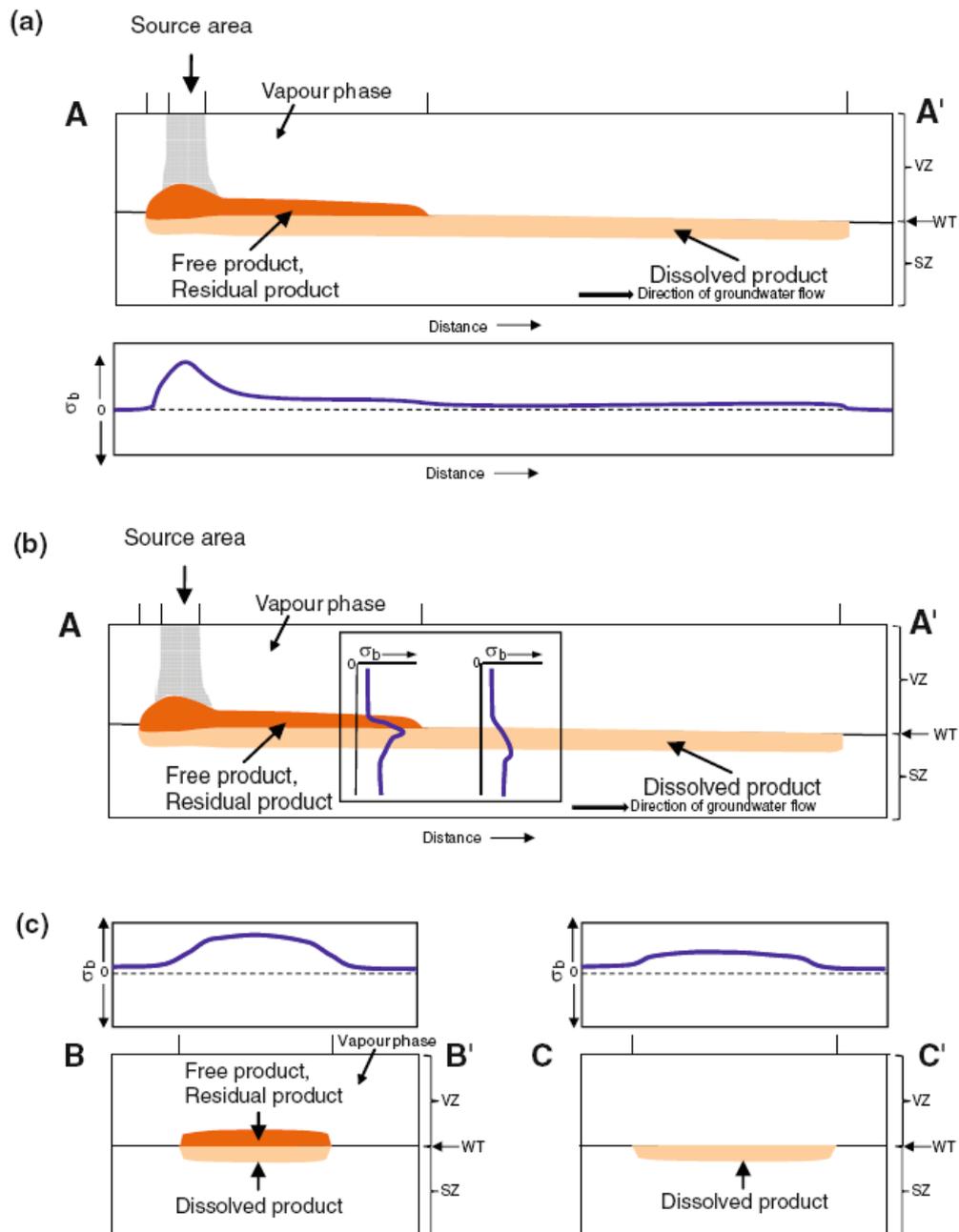


Figure 9 : Simulations de profils de résistivité réalisés longitudinalement, transversalement et verticalement à un panache de LNAPL

4.6. LA SURVEILLANCE

4.6.1. Objectifs de la surveillance

La surveillance de l'atténuation naturelle consiste à mesurer l'évolution des paramètres géophysiques, déjà évoqués précédemment dans le cadre du diagnostic de site, au niveau de sources ou de panaches, afin :

- De quantifier l'évolution de la concentration du polluant,
- De quantifier l'extension et l'évolution de la géométrie d'un panache.

Contrairement au diagnostic où le bilan géophysique s'établit en terme relatif (par exemple, tel endroit est plus conducteur, et donc vraisemblablement plus pollué, que tel autre), la surveillance devrait permettre de quantifier de manière absolue l'évolution (la variation) de tel ou tel paramètre.

Après correction des paramètres extérieurs influençant la PS, la résistivité ou la PP (voir chapitre 4.6.3), l'évolution de ces grandeurs physiques renseigne sur les variations de géométrie et de concentrations de la pollution tant dans les sources que dans le panache : c'est précisément l'objectif de la surveillance de l'atténuation naturelle.

4.6.2. Les techniques de surveillance

Toutes les méthodes géophysiques proposées pour le diagnostic peuvent être utilisées en mode surveillance :

- Cartographie de Potentiel Spontané
- Résistivité électrique et polarisation provoquée suivant les configurations :
 - o Gradient (rectangle)
 - o Tomographie 2D ou 3D
 - o Mise-à-la-masse

Le choix entre ces méthodes reste du ressort du géophysicien en charge de l'étude, en fonction du budget alloué, du contexte géologique, de l'encombrement au sol de la zone d'étude, et des objectifs de la surveillance.

La surveillance peut s'envisager de 2 manières différentes :

- installation pérenne d'équipements géophysiques et télétransmission des données
- Installation partielle d'équipements géophysiques et retour régulier sur site pour réaliser les mesures.

Le choix entre les 2 options est un simple calcul économique, basé sur la durée de surveillance, de la vitesse d'évolution de l'atténuation naturelle (et donc de la fréquence de mesures) et du coût d'immobilisation d'équipements généralement assez onéreux (voir chapitre 6).

Pour chaque méthode géophysique envisagée, la mise en œuvre de cette surveillance est identique à celle du diagnostic : maillage, fréquence de mesure, configuration de mesure, etc. Par contre, on portera une attention particulière à l'installation des équipements pérennes :

- A minima, il faut que les électrodes de mesures (PS, résistivité ou PP) restent en place pendant la durée de la surveillance. En effet, l'erreur de positionnement est génératrice d'erreurs de mesure. Afin de comparer un même levé, il faut que la résistance de contact des électrodes soit similaire. Ainsi les câbles et électrodes devront être installés définitivement pour la durée de la surveillance, en enterrant les câbles et les électrodes, de telle manière qu'ils ne puissent être détériorés au cours du temps, et en maintenant une humidité relativement constante au niveau des électrodes afin de conserver une bonne résistance de contact.
- choix des matériaux : la surveillance peut durer plusieurs années. Il faut donc des câbles gainés de polyéthylène (PE) de préférence, plus résistant que le PVC. Les électrodes de courant en métal devront être en acier inox 316. Les électrodes impolarisables de potentiel pour la PS ou la PP seront choisies avec soin afin que leur durée de vie soit supérieure à la durée de surveillance, ou que l'on puisse aisément les changer. En cas de changement d'électrodes, on veillera à répéter la même série de mesure à quelques heures d'intervalle avec les anciennes électrodes, puis avec les nouvelles, afin de calculer la dérive.

4.6.3. Prise en compte de paramètres extérieurs

Les résultats de chaque campagne de mesures doivent être comparés à l'état initial (baseline en anglais). Comme on l'a vu précédemment, les paramètres géophysiques sont dépendants de nombreux facteurs en plus de la concentration en polluants dans le sol (cf. annexe 1, chapitre C) :

- Etat hydrique du sol (teneur en eau)
- Hauteur du niveau d'eau
- Température du sol et température de la nappe phréatique

Il est donc conseillé d'exercer en parallèle une surveillance :

- de la pluviométrie par un pluviomètre,
- de la teneur en eau sur les 2 premiers mètres du sol, c'est-à-dire de la zone où la teneur en eau évolue rapidement dans de grandes proportions, grâce à des capteurs TDR, sondes capacitives, ou tensiomètres, ...
- de la température de la nappe phréatique par des thermomètres enterrés,
- de la température du sol, par exemple à 50 cm et 1m de profondeur, par des thermomètres enterrés. En dessous de cette profondeur, les variations de température annuelles sont faibles.
- Du niveau piézométrique grâce à un capteur de niveau piézométrique.

. Il est nécessaire de contrôler l'évolution de ces paramètres à travers :

- une surveillance continue si la surveillance géophysique est continue (installation pérenne des équipements)
- ou par une mesure ponctuelle de ces paramètres à chaque série de mesure.

Néanmoins il est recommandé d'avoir un suivi quasiment continu de ces paramètres car l'état instantané de la résistivité ou de la PP dépend aussi de l'historique de l'évolution de ces paramètres qui peuvent être enregistrés numériquement. Par exemple, la résistivité dépend de la teneur en eau des sols, mais elle est différente si on est en phase de séchage ou en phase d'humectation (e.g. Garra et al, 2011). En première approximation, pour un diagnostic, cette dépendance peut être annulée, mais, il faut en tenir compte pour une surveillance où la variation des paramètres est faible. Pour le cas de l'état hydrique des sols, une simple surveillance de la pluviométrie peut être un bon indicateur.

Partant du principe que ces paramètres externes sont identiques sur l'ensemble du secteur à surveiller, on ne multipliera pas les points d'observations de ces paramètres.

4.7. LIMITES DES METHODES GEOPHYSIQUES

4.7.1. Influence des structures enterrées

Les méthodes géophysiques de diagnostic et de surveillance (PS, résistivité et PP) sont toutes des méthodes de mesure de potentiels et/ courants électriques. La présence de structures métalliques enterrées interdit l'usage de ces méthodes :

- Béton armé
- Rails et tuyaux parallèles aux profils
- Cuve métallique
- Grillages métalliques, barbelés mis à la terre,
- Clôtures électriques.

Dans le cas où le profil d'étude coupe perpendiculairement un tuyau métallique, il est possible de faire des mesures de résistivité et PP, mais en supprimant les points de mesures où les électrodes d'injection de courant ou de potentiel sont à moins d'une certaine distance du tuyau. Cette distance dépend du diamètre et de la profondeur du tuyau, de la résistivité du milieu. On peut estimer à une dizaine de mètres l'influence d'un tuyau enterré sur les mesures. En revanche, l'aire d'influence d'un objet métallique (tuyau, cuve, ...)

est beaucoup plus large sur le Potentiel Spontané. L'influence d'un tuyau d'1 m de diamètre a été ressentie sur plus de 50 m à proximité d'une décharge (Naudet et al., 2004).

Comme les objets métalliques aériens sont également des parasites sur les méthodes électromagnétiques, ces méthodes ont volontairement été écartées de ce rapport.

Ainsi, dans la mesure du possible, il est nécessaire de connaître le positionnement de toutes les infrastructures enterrées avant toute étude géophysique (voir chapitre 4.3). Dans le cas où les infrastructures enterrées ne seraient pas connues, certaines méthodes géophysiques peuvent servir à en faire l'inventaire. L'ADEME va éditer en 2013 un guide supervisé par l'AGAP Qualité sur les méthodes géophysiques appliquées à la détection des objets enterrés.

4.7.2. Seuil de détection

Comme il a été montré au chapitre 3, la présence de polluants dégradés ou non dégradés a un effet sur la valeur de résistivité et de polarisation provoquée. Mais aucune étude n'a permis de fixer un seuil de détection en fonction de la concentration du polluant. Ce seuil dépend de la résistivité de l'encaissant et du taux de dégradation du polluant. Si la pollution (hydrocarbures pétroliers, goudrons de houille ou organochlorés) est dégradée, elle devient conductrice. La valeur de résistivité globale volumique mesurée sera proportionnelle au degré de dégradation du polluant et non à la concentration résiduelle en polluant. De fait, les résultats de diagnostic ou de surveillance géophysique de l'atténuation naturelle seront toujours à considérer en relatif par rapport à un état de référence qui sera soit la résistivité en dehors de la zone de pollution dans le cadre d'un diagnostic, soit la résistivité au début de la surveillance (état zéro) dans le cadre de la surveillance de l'atténuation naturelle.

4.8. CONCLUSION

En conclusion de ce chapitre, on peut tenter de dresser un tableau d'adéquation de chaque méthode géophysique en fonction de chaque étape dans un processus de monitoring de l'atténuation naturelle :

- Complément d'information géologique,
- Complément d'information hydrogéologique,
- Détection de sources de pollution
 - a. Liquide sous forme DNAPL, LNAPL
 - b. Solide (cuve, tuyau métalliques ou non métalliques)
- Détection de panache de pollution
- Surveillance d'un panache de pollution.

Ce tableau reflète l'état des connaissances en 2012 et reste très subjectif. Il a été établi sur la base de l'état de l'art et de l'expérience du BRGM dans le cadre du projet ATTENA mais également dans d'autres programmes de recherche sur la géophysique environnementale. Plusieurs méthodes géophysiques qui n'ont pas l'objet d'une description technique sont malgré tout envisagées

		Méthodes électriques	Méthodes électromagnétiques	Polarisation Provoquée	Potentiel Spontané	Radar géologique	Magnétisme	RMP	Sismique réflexion	SASW	Sismique réfraction
Complément d'information géologique		+++	++	+	0	--	0	--	+++	+++	+++
Complément d'information hydrogéologique		+++	++	-	++	--	--	+++	-	-	-
Détection de sources de pollution	Liquide sous forme DNAPL, LNAPL	+++	++	+++	+++	0	--	--	--	--	--
	Solide (cuve, tuyau métalliques ou non métalliques)	+	+++	+	0	++	+++	--	--	--	--
Détection de panache de pollution		+++	++	++	++	--	--	--	--	--	--
Surveillance d'un panache de pollution	Sans biodégradation	+++	0	+	+	--	--	--	--	--	--
	Avec biodégradation	+++	0	+++	+++	--	--	--	--	--	--

Tableau 1 : tableau d'adéquation entre des méthodes géophysiques et d'objectifs dans le cadre du monitoring de l'atténuation naturelle : +++ à + = méthode adéquate (critère décroissant). 0 = peut être utilisé dans des cas particuliers ; - et -- : méthode inadéquate (critère décroissant).

5. Illustrations

Pour des informations plus complètes de présentation des sites, il est recommandé de se reporter aux case studies des sites 2 et 3 bis, disponibles en lignes sur le site du projet (www.attena.org/)

5.1. RECHERCHE DE SOURCE DANS LE CAS D'UN HYDROCARBURE PETROLIER NON DEGRADE (SITE 3)

Ce cas a été rencontré dans le cadre du projet européen 5^{ème} PCRD « HYGEIA » en 2003.

Le site est un centre de pompage de navires pétroliers vers des raffineries (Figure 10). Le volume annuel est de 500 navires par an. Le site en bordure de côte, dans des alluvions grossiers de plusieurs mètres d'épaisseur, reposant sur un socle calcaire. La nappe phréatique est à 1 m de profondeur. Elle est composée d'une eau légèrement saumâtre. Plusieurs piézomètres de la zone 2 (area 2, Figure 11) ont montré l'existence d'un flottant pétrolier d'une épaisseur de quelques centimètres, allant jusqu'à 1 m au centre de la zone 2.

Comme l'ensemble du site est couvert de goudron et pour des raisons de sécurité, il n'est pas possible de mener des mesures d'électricité avec électrodes plantées. La cartographie de résistivité électrique a donc été réalisée avec un Ohmmapper (électrique capacitif présenté en annexe 1) au centre des routes. Cet outil permet de mesurer une tomographie de résistivité électrique sans contact électrique physique (pas d'électrode plantée). Le résultat peut se présenter sous forme de carte de résistivité apparente ou de coupe de résistivité après inversion.

La longueur du dipôle émetteur et du dipôle récepteur (un seul récepteur) est de 5m, l'espacement émetteur/récepteur est de 5 m également. La profondeur d'investigation est de 2 à 3 m, suivant que le milieu est conducteur ou résistant. L'espacement entre mesures OhmMapper est de 1 m (1 mesure par seconde et vitesse d'avancement de 1 m/s). Les mesures ont été couplées avec un positionnement GPS. Les mesures dites « spikes⁴ » ont été filtrées par une médiane glissante. Le résultat final est une carte de résistivité apparente après interpolation des mesures filtrées géoréférencées. On ne peut pas inverser les mesures car on ne dispose de mesures réalisées avec différents espacements émetteur-récepteur.

La carte de résistivité apparente intégrant les 2 premiers mètres fait apparaître des secteurs résistants (résistivité supérieure à 200 ohm.m) contrastant avec un encaissant normal dont la résistivité est inférieure à 30 ohm.m (Figure 11) correspondant aux alluvions grossiers dans l'eau saumâtre :

- Ensemble de la zone 1 et de la zone 2,
- Zones 3a et 3b
- Petit secteur sur la zone 4

Ces zones polluées par un pétrole frais et non dégradé, donc résistant, étaient connues pour la zone 2 et zone 3a. Les autres anomalies ont été contrôlées par des sondages avec présence de flottant qui ont confirmé les résultats de la géophysique. Notamment, la géophysique montre une absence de connexion entre les zones 1 et 2 d'une part et zones 3a et 3b d'autre part, puisque les 2 ensembles résistants ne sont pas reliés. Cette « non-connexion » a été confirmée par cette étude au moment de l'écumage du flottant.

La géophysique a permis de préciser les contours des lentilles de flottant. Cet apport a contribué à dimensionner les conditions techniques à mettre en œuvre au moment de l'écumage du flottant.

⁴ Un « spike » en géophysique est une mesure anormale de haute fréquence spatiale, c'est-à-dire dont l'intensité est très différente de la valeur moyenne. C'est un bruit de mesure qui est filtré par un simple filtre passe-bas ou une médiane glissante. Dans le cas du ohmmapper, les spikes sont dus à des problèmes de contact des câbles dipôles ou par la présence de réseaux métalliques enterrés.



Figure 10 : photo du ohmmapper sur le site du projet européen HYGEIA

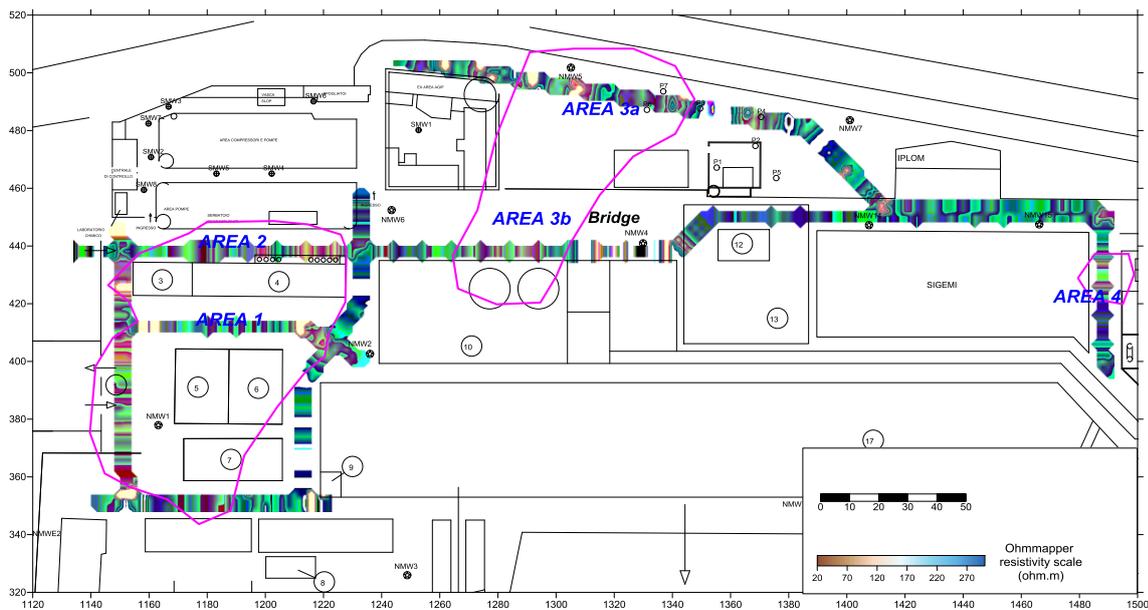


Figure 11 : cartographie de la résistivité moyenne de la tranche 0-2m mesurée par Ohmmapper sur le site du projet HYGEIA

5.2. RECHERCHE DE SOURCES DANS LE CAS D'UN HYDROCARBURE PETROLIER PARTIELLEMENT DEGRADE (SITE 3)

Le site 3bis est un dépôt de carburant en activité où du flottant a été identifié dans plusieurs piézomètres. Le dépôt est situé dans une plaine alluviale formée de sables et galets. Les seuls secteurs accessibles pour des mesures géophysiques sont les routes contournant les citernes et les bacs de rétention en béton armé.

L'Ohmmapper a été utilisé avec 2 passages sur les mêmes profils :

- avec des dipôles de 5 m et 2 récepteurs à 5, et 10 m de l'émetteur ;

- avec des dipôles de 10 m et 2 récepteurs à 10, et 20 m de l'émetteur.

Après repositionnement des profils et concaténation des fichiers, une inversion a été réalisée avec Res2DInv pour chaque profil, en 6 couches (bases à 0.5m, 1.5 m, 2.5 m, 3.5 m et 4.5 m, qui sont les profondeurs des couches du modèle calculées automatiquement par Res2DInv). L'ensemble des inversions a été concaténée et les plans pour chaque profondeur de couche ont été extraits. Le plan de résistivité à 4 m (milieu de la couche 3.5 à 4.5 m) correspond au toit de nappe (Figure 12). Les secteurs conducteurs (couleurs orange et rouges) de résistivité inférieure à 50 ohm.m correspondent aux zones où un flottant a été mesuré sur la nappe et où la conductivité de l'eau était la plus forte. A l'issue de l'opération géophysique, des analyses géochimiques et microbiologiques ont été réalisés sur un grand nombre de piézomètres préexistants. Ces secteurs ont été reconnus comme étant pollué et où une atténuation naturelle a eu lieu.

Cet exemple confirme qu'un hydrocarbure pétrolier fortement dégradé crée des anomalies de faible résistivité, due une forte teneur en électrolytes, qui comptent parmi les produits issus de la dégradation de l'hydrocarbure.

Comparé à l'exemple précédent, cet exemple sur un hydrocarbure pétrolier dégradé montre que l'état de dégradation de l'hydrocarbure est une donnée fondamentale à prendre en compte au moment de l'interprétation. Si l'on ne connaît pas l'état de dégradation de la pollution, il faut rester ouvert à toutes les possibilités au moment de l'interprétation des mesures géophysiques, la pollution pouvant apparaître conductrice ou résistante par rapport à l'environnement non pollué. Ainsi, c'est bien le contraste de résistivité avec l'encaissant géologique non pollué qu'il faut rechercher. C'est pourquoi cette interprétation géophysique doit toujours être réalisée en collaboration avec un ingénieur environnement qui pourra valider le type de contraste de résistivité en fonction du contexte hydro-bio-géochimique.

La phase terrain de cette étude s'est résumée à une demi-journée de mesures pour un ingénieur géophysicien. Pour un coût modeste, cette étude géophysique a permis de dresser un premier diagnostic et de situer les secteurs prioritaires pour le monitoring de l'atténuation naturelle.

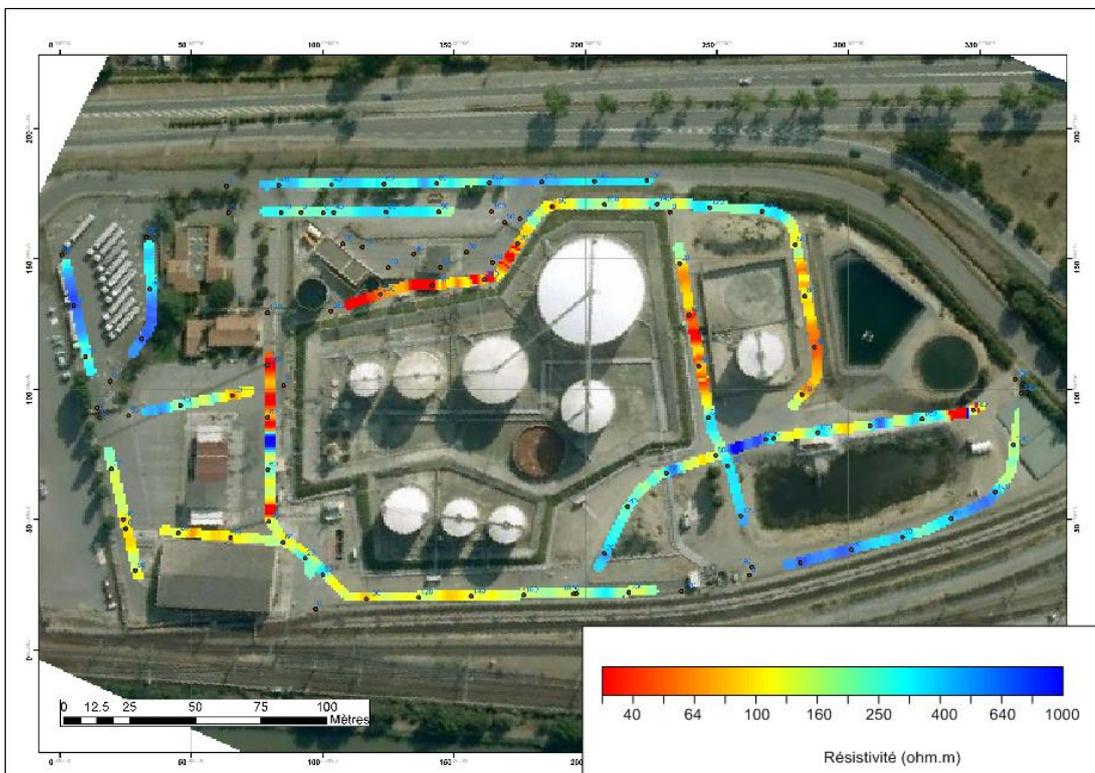


Figure 12 : résistivité à la profondeur 4m (toit de la nappe phréatique) après inversion de mesures ohmmapper sur le site 3

5.3. RECHERCHE D'UNE SOURCE DANS LE CAS D'UN GOUDRON DE HOUILLE (HAP) DEGRADE (SITE 2)

Ce site a été le plus étudié par géophysique pendant le projet ATTENA. Il avait déjà fait l'objet d'études géophysiques dès 2003 (Behaegel et Gourry, 2003). Ce site a servi à des expérimentations de mise en œuvre de méthodes géophysiques pour le diagnostic de sites pollués à travers plusieurs projets de recherche au BRGM. Des mesures géophysiques ont été menées avant, puis après la réhabilitation partielle du site après excavation de la mare à goudrons sud. Néanmoins il reste toujours une source secondaire dans la zone non saturée et un panache de pollution dans la nappe phréatique qui ont fait l'objet d'études dans le cadre d'ATTENA.

Pour cet exemple d'application des méthodes géophysiques, nous montrons :

- un diagnostic géophysique au droit de l'ancien site industriel, où le principal objectif est la recherche des sources résiduelles (constituées principalement de mares à goudrons). Les profondeurs d'investigation sont limitées à 5 m. Ce diagnostic est antérieur au projet ATTENA, mais il rentre dans le schéma de surveillance de l'atténuation naturelle par géophysique.
- un diagnostic géophysique sur et en aval hydraulique du site industriel, afin de caractériser le panache de pollution,
- comment mettre en œuvre une surveillance du panache. En effet, compte tenu des faibles vitesses d'écoulement sur le site, aucune surveillance n'a été entreprise.

5.3.1. Diagnostic des sources

Un premier diagnostic a été établi en 2003 autour de la mare à goudrons sud (Behaegel et Gourry, 2003), uniquement sur l'ancien site industriel. Ce diagnostic est un préalable à toute étude de surveillance de l'atténuation naturelle par géophysique. En effet, dans un premier temps, il est nécessaire de faire un bilan des sources de pollution résiduelles dans la zone non saturée, puis, dans un second temps, il est préconisé de dresser l'état de la zone saturée.

Les méthodes géophysiques mises en œuvre pour ce diagnostic sont :

- le potentiel spontané (Figure 13a)
- la résistivité électrique en configuration gradient (Figure 13b)
- des tomographies de résistivité électrique et polarisation provoquées croisant la mare à goudrons (Figure 14).

L'ensemble de ces mesures géophysiques confirment qu'une pollution de goudrons de houilles (contenant des HAP) fortement dégradée génère des anomalies :

- Potentiel spontané fortement négatif (atteignant -200 mV par rapport à une référence située dans un champ agricole en amont hydraulique du site, au sud-ouest).
- Faible résistivité électrique au-dessus de la mare à goudron en configuration gradient et en configuration tomographie 2D.
- Forte chargeabilité électrique sur les bords de la mare à goudrons, c'est-à-dire dans des zones où il y a une dégradation active des hydrocarbures, avec présence de bactéries.

Ces résultats confirment que l'état de dégradation de l'hydrocarbure (pétrolier ou goudron de houille) à l'origine de la pollution va fixer le type d'anomalie géophysique à rechercher au-dessus des sources :

- Polarisation Spontanée négative par rapport à une électrode de référence située loin de la zone source (distance au moins 10 fois la taille de la source). L'anomalie de PS est générée par un potentiel électro-redox, dû une zone fortement réductrice dans la source.
- Résistivité faible, due à la présence d'électrolytes générés par la biodégradation
- Chargeabilité électrique forte, liée à la présence d'une activité de biodégradation.

Les résultats du diagnostic vont permettre de définir le type de contraste des paramètres géophysiques qu'il faut rechercher dans le cadre de la surveillance de l'atténuation naturelle.

Tomographie 2D de résistivité électrique

Dans ce cas d'étude, la nappe phréatique se situe à 30 m environ de la surface. Les sources correspondant aux mares à goudrons ont relâché des goudrons acides vers la nappe phréatique, générant un panache qui s'est propagé vers Nord / Nord-Ouest dans la direction du flux hydraulique local. L'aquifère se situe dans la craie ; il atteint 70 m jusqu'aux marnes imperméables. Des argiles plus ou moins silteuses retrouvent la craie sur 5 à 8 m.

Il s'agissait donc de détecter la présence d'un panache, théoriquement conducteur puisque les mares à goudrons source sont électriquement conductrices (voir chapitre précédent). Un ensemble de 12 tomographies de résistivité ont été réalisées en configuration Wenner-Schlumberger (espacement entre électrodes de 5 m) afin d'atteindre une profondeur d'investigation de 80 m environ (Figure 16).

Les 4 profils P1, P2, P3 et P4 sont représentatifs du contexte et des résultats obtenus sur le site 2. Les profils P1 et P2 recourent les mares à goudrons au niveau de PzS et PzC. On remarque un flux conducteur partant de la surface, se propageant verticalement jusqu'à la nappe phréatique, puis se dirigeant vers l'ouest pour P1 et vers le nord pour P2. Les profils P3 et P4 sont situés à l'aval hydraulique proche des sources sur la bordure Nord et Ouest du lotissement au nord du site 2. Ces 2 profils ne montrent aucune anomalie de résistivité, excepté sur le profil P4 au niveau d'une route où un tuyau enterré a probablement créé cet axe vertical conducteur. La craie est parfaitement homogène de résistivité entre 80 et 120 ohm.m.

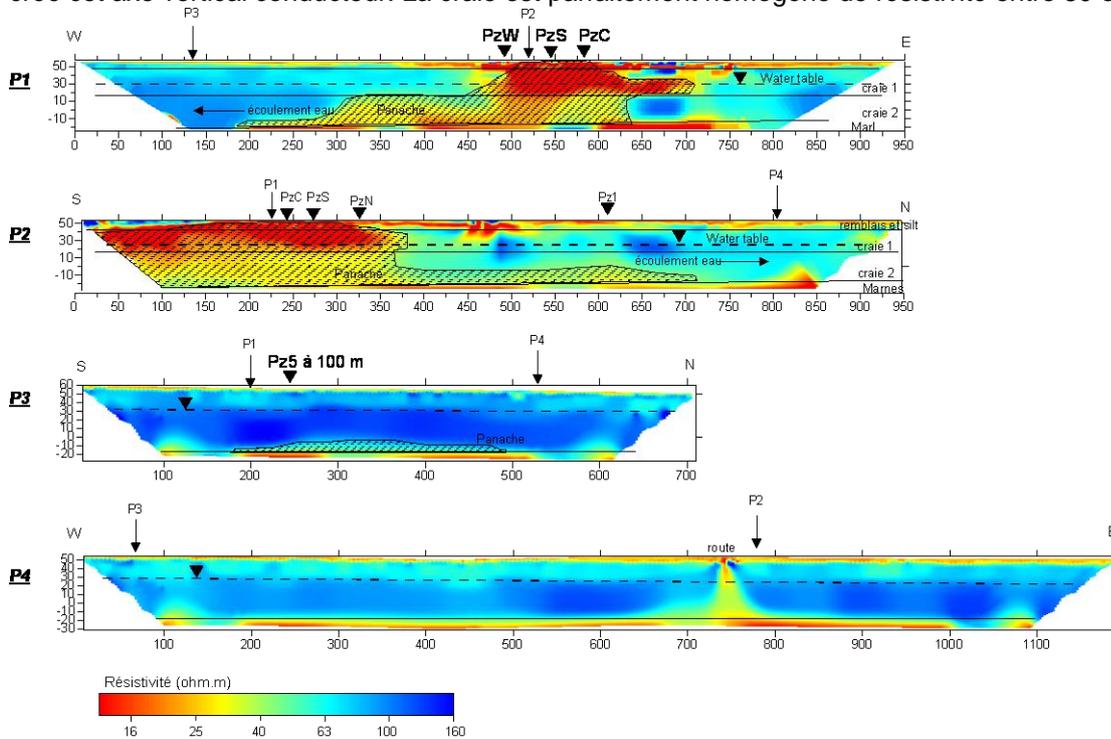


Figure 15 : coupes de résistivité de 4 tomographies de résistivité entourant le lotissement et oupant l'ancienne mare à goudrons (profils P1 et P2). Le positionnement des profils se trouve sur la Figure 16.

La concaténation des résultats sur les 12 profils a permis d'extraire le plan horizontal de résistivité à la profondeur entre 30 et 40 m (toit de l'aquifère, Figure 16). On observe un corps conducteur (résistivité inférieure à 15 ohm.m) contrastant avec l'encaissant résistant. Il existe 2 centres conducteurs à ce corps : un premier de résistivité inférieure à 5 ohm.m correspond au secteur des mares à goudrons, le second situé plus sud de résistivité inférieure à 10 ohm.m correspond vraisemblablement à une contamination provenant du terril qui a dû servir à entreposer des déchets de la cokerie. Ce corps conducteur, c'est-à-dire le panache de pollution, s'allonge Nord-Sud dans la direction du flux de l'aquifère. Mais avec cette configuration de tomographie électrique 2D, il n'est pas possible de savoir si le panache s'étend sous le

connectés à l'émetteur et au récepteur à chaque campagne de mesures. La durée d'acquisition est de l'ordre d'une journée au total. Comme il est contraignant de laisser du matériel à demeure sur site (sécurité, immobilisation d'équipement), il est également envisageable de revenir faire un diagnostic géophysique de la nappe à intervalle de temps régulier, en réimplantant les électrodes au même endroit, avec une précision inférieure à 1%, soit 10 cm pour des espacements de 10 m. En effet, il faut que l'erreur d'implantation soit du même ordre de grandeur que le bruit de mesure (de l'ordre de 2% avec les résistivimètres de dernières générations). Or l'erreur engendrée par un mauvais positionnement multiplie par 2 l'erreur de mesure. Pour garantir un repositionnement à 1%, il est nécessaire de réimplanter avec GPS différentiel centimétrique, ou de laisser des marqueurs des électrodes.

Comme on a pu le voir au chapitre précédent, des anomalies de chargeabilité électrique ont été détectées au-dessus des sources de pollution (mare à goudrons), dues à la présence d'une communauté bactérienne participant à la biodégradation. Il est donc fort probable que le panache de pollution aurait pu révéler également une anomalie de polarisation provoquée (PP). Mais cette technique a un rapport signal/bruit très faible : dans un contexte conducteur, on mesure quelques dizaines de microvolts pour des injections de courant de plusieurs Ampères. Par ailleurs, les configurations 3D, où le facteur géométrique est souvent très élevé (> 100 000 m), sont particulièrement défavorables à la mesure de PP. Donc, sauf pour l'étude de nappes peu profondes (< 10m) où les plus grands écartements entre électrodes de mesure ne dépassent pas 100 m, il n'est pas recommandé de faire de la polarisation provoquée pour la surveillance d'un panache de pollution.

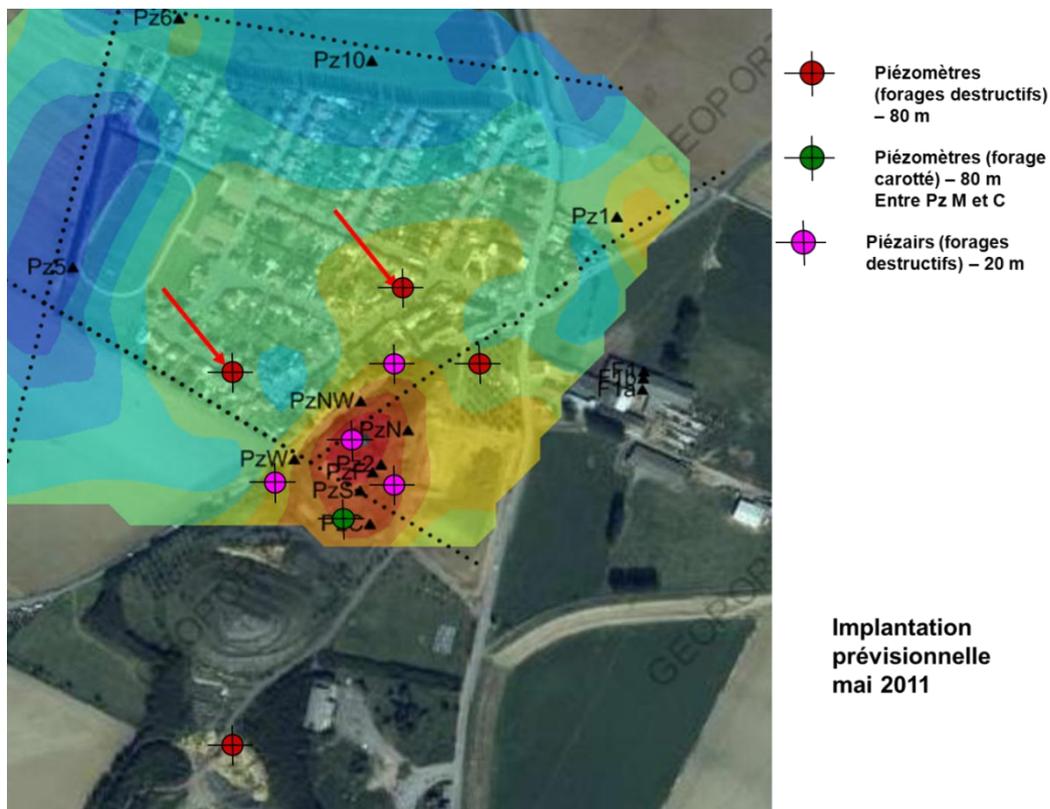


Figure 17 : plan de résistivité à la profondeur 30m sous le lotissement, calculé à partir de l'inversion des tomographies entre profils croisés (acquisition en C)

Mise-à-la-masse et électrode enterrée

Ces méthodes, détaillées en annexe D, chapitre c, sont également efficaces pour la surveillance d'un panache. Ces 2 méthodes ont été mises en œuvre sur le site 2, dans la phase initiale de diagnostic quand il y avait encore peu d'indices du développement d'un panache. C'est pourquoi la zone d'étude est restreinte autour des sources.

Ces méthodes sont particulièrement adaptées pour des prospections sur de grandes surfaces car l'émetteur et le récepteur ne sont généralement pas connectés. Une fois l'émetteur en place, les mesures peuvent être menées par une seule personne.

Pour des raisons de durée du projet, il n'y a pas eu de surveillance géophysique à proprement parlé (répétition de la même méthode à intervalle régulier) avec ces méthodes sur le site 2. De plus, l'état initial établi en 2003 couvrait une petite zone autour la mare à goudrons et n'a pas été étendue sur en panache en aval.

Sur le site 2, et pour les 2 méthodes, l'électrode d'injection « à l'infini » était située à 500 m au sud-est. Pour la mise-à-la-masse, l'électrode d'injection était à la surface de la mare à goudrons sud (Figure 18a). Elle doit être absolument dans un corps conducteur (ici dans la mare à goudrons). Pour l'électrode enterrée, l'électrode d'injection était à 5 m sous le toit de l'aquifère dans PzC ((Figure 18b).

La carte des iso-potentiels de la mise-à-la-masse (Figure 18a) montre l'extension de la mare à goudron vers PzS. On voit le développement d'un panache vers le Nord. Mais la zone couverte est trop faible pour préciser la vraie direction du panache associée à cette source. Cette méthode est bien adaptée à la surveillance d'une source de pollution ou d'un panache qu'il serait difficile de traiter par excavation ou traitement chimique.

La carte de résistivité obtenue par la méthode de l'électrode enterrée confirme l'extension d'un panache vers le PzS et d'un autre panache vers le Nord-Ouest. Réalisé 3 ans avant la campagne de tomographie 3D autour du lotissement (Figure 17), cette carte de résistivité suggère déjà l'existence d'un panache se dirigeant vers le lotissement situé au Nord-Ouest de la mare à goudrons. La méthode de l'électrode enterrée est adaptée à la surveillance de la qualité d'un aquifère et à la progression d'un panache de pollution.

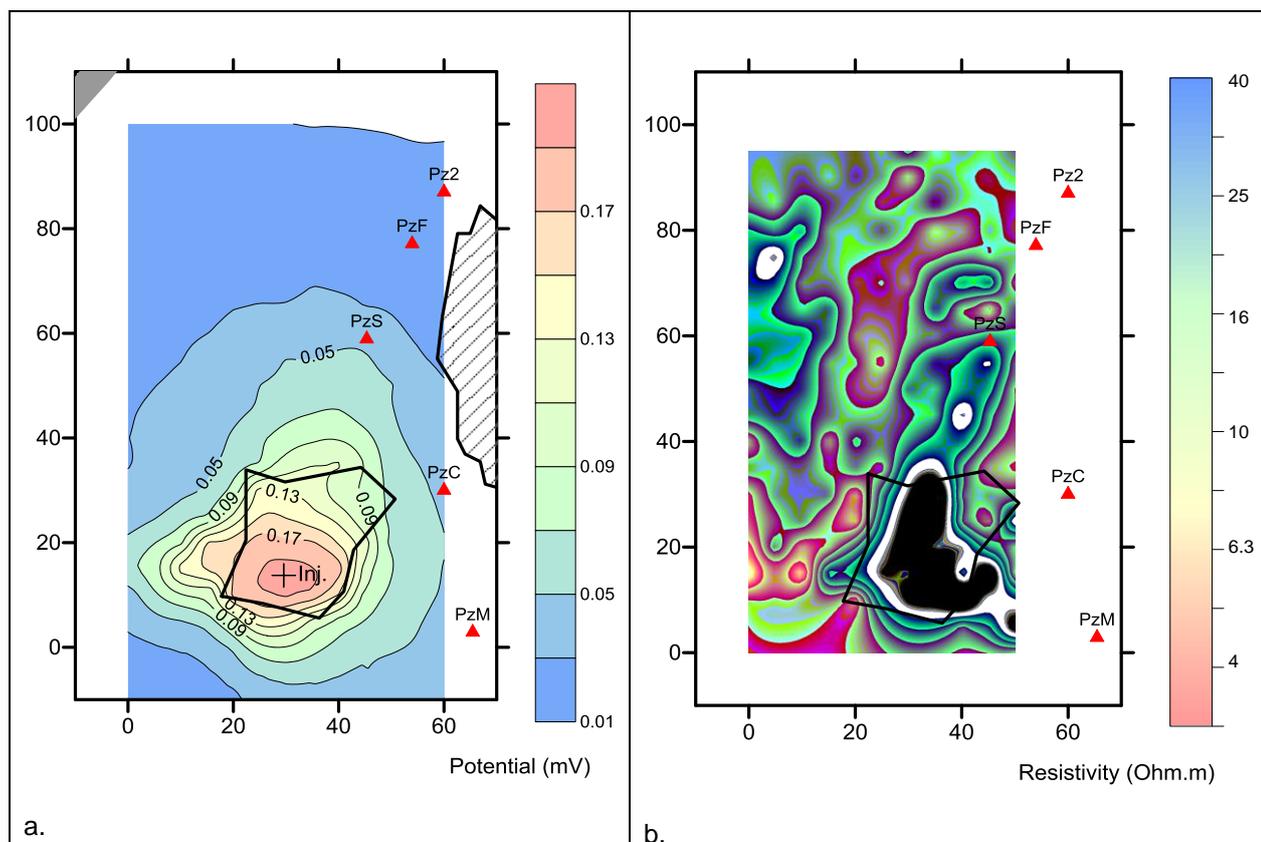


Figure 18 : a) carte de potentiel électrique (maillage 5 x 5 m) mesuré par mise-à-la-masse (injection sur la croix « inj » au centre de la mare à goudrons encadrée en noir, b) carte de résistivité apparente mesurée par électrode enterrée (forage PzC), maillage de mesure 5 x 5 m.

Dans le cas d'une surveillance géophysique, la variation de résistivité par rapport à un état initial (état de référence) est calculée à chaque nouvelle campagne. On interprète alors les variations de résistivité électrique en les confrontant aux analyses chimiques obtenues sur les piézomètres surveillés.

5.4. RECHERCHE DE LA GEOMETRIE D'UN PANACHE DANS LE CAS D'UN ORGANOCHLORE (SITE 1)

Le site 1 se situe dans une plaine alluviale, en contre-bas (aval hydraulique) d'une carrière située sur un plateau d'où provient une pollution d'organochlorés. Une dizaine de piézomètres, situés le long du profil P1, ont été installés transversalement au sens d'écoulement de la nappe.

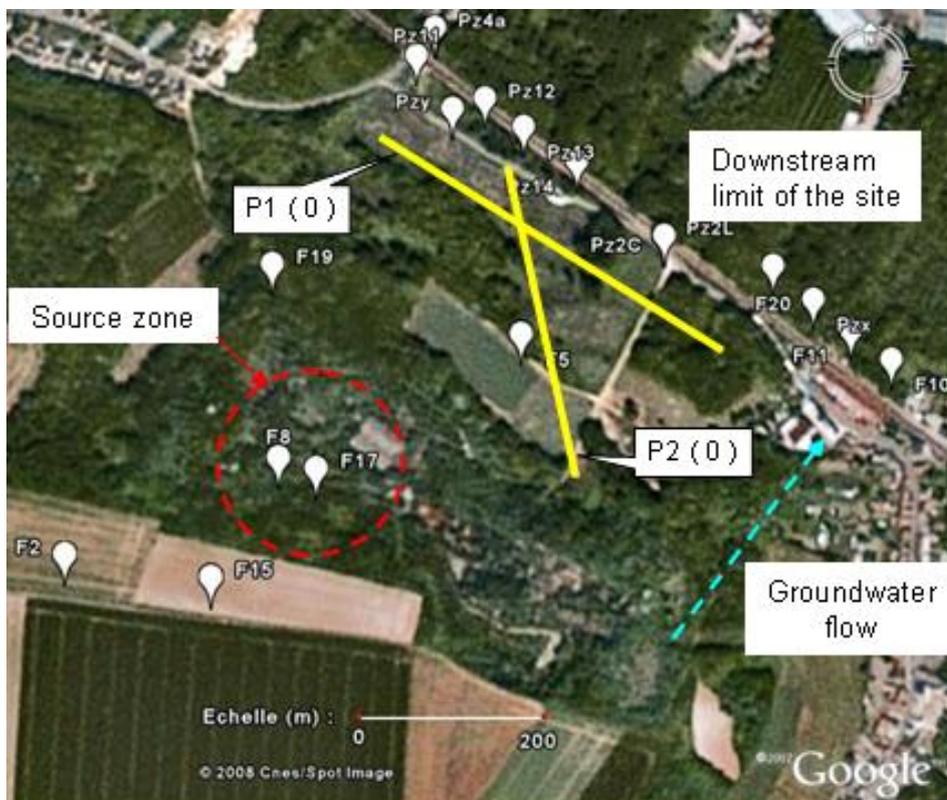
Les objectifs fixés à l'étude géophysique consistaient :

- A établir la géométrie du panache de pollution par organochlorés (extension vers l'aval et largeur du panache au niveau de la route qui le recoupe où sont établis la plupart des piézomètres de surveillance),
- A donner un indice géophysique qui permettrait de faire la différence entre les organochlorés non dégradés et les organochlorés dégradés.

Pour les 2 objectifs, on peut envisager une diminution de la résistivité électrique au niveau du panache à cause de l'augmentation en chlorures notamment provenant de la dégradation des organochlorés.

Ainsi, 2 profils de tomographies ont été réalisés (Figure 19):

- Profil P1, transverse au sens d'écoulement de la nappe phréatique, afin de recouper le panache de pollution, tomographie de résistivité complexe (ou polarisation provoquée spectrale)
- Profil P2, parallèle au sens d'écoulement de la nappe, part de l'aval proche de la source en allant vers la plaine alluviale, tomographie 2D de résistivité CC.



- Figure 19 : Plan de position des acquisitions géophysiques sur le site 1 : la zone source et les 2 tomographies de résistivité et polarisation provoquée

Profil P2

La tomographie de résistivité sur le profil 2 montre un étagement horizontal des résistivités :

- Au-dessus de l'altitude 45 m, la résistivité est relativement élevée, supérieure à 200 ohm.m. Cette couche géoélectrique correspond aux sables Cuisiens non saturés.
- Entre les altitudes 20 m et 45 m, la résistivité est plus faible, inférieure à 25 ohm.m, atteignant parfois 5 ohm.m. Cette couche géoélectrique correspond aux sables Cuisiens saturés.
- Entre les altitudes 10 et 20 m, la résistivité augmente par rapport à la couche sus-jacente (entre 30 et 60 ohm.m). On remarque des variations latérales de résistivité dans cette couche. Cette couche considérée dans les sables Cuisiens pourrait correspondre à une couche plus argileuse, donc plus imperméable, où la résistivité diminuerait en moyenne à cause de l'argile, et où les secteurs localement conducteurs pourraient représenter des panaches plongeant en base de l'aquifère.
- En-dessous de l'altitude 10 m, la couche a une résistivité moyenne de 25 ohm.m. Elle correspond à la couche des argiles du Sparnassien.

Les secteurs très conducteurs de l'aquifère du Cuisien (résistivité inférieure à 10 ohm.m) sont dus au panache de pollution qui s'est diffusé vers l'aval.

Profil P1

Le profil P1 situé dans le contre-bas du site est positionné à une altitude moyenne de 40 m, c'est-à-dire dans les sables du Cuisien. On retrouve les mêmes couches géoélectriques que pour le profil P2.

Les résultats de la résistivité (module de la résistivité complexe) et de la conductivité imaginaire à 8Hz montrent l'existence d'un aquifère conducteur et d'une zone à forte conductivité imaginaire, au niveau des piézomètres Pz13 et Pz14, alors que la résistivité de l'aquifère et la conductivité imaginaire sont 2 à 3 fois plus faible sur Pz11 et Pz12. Les analyses de l'eau des forages (Tableau 2) montrent des fortes concentrations des chlorures et en BTEX sur Pz13 et Pz14, nettement plus faibles sur Pz11 et Pz12.

Ces résultats confirmeraient que les conditions locales permettent la dégradation des organochlorés, qui tendent à terminer en chlorures, d'où la faible résistivité de l'aquifère. Néanmoins les concentrations en organochlorés restent fortes sur les piézomètres P13 ou Pz14 où la biodégradation est la plus active, augmentant ainsi la conductivité imaginaire (augmentation de l'effet PP).

Sur cet exemple encore, l'état de dégradation du polluant, qu'il soit hydrocarbure ou organochlorés, aura une influence prépondérante sur le contraste de résistivité ou chargeabilité électrique.

Une couche de forte conductivité imaginaire (ou chargeable) apparaît en-dessous de l'altitude 15 m, c'est-à-dire proche de la couche des argiles du Sparnassien. La présence d'argiles peut expliquer cette forte chargeabilité électrique. Là encore, l'interprétation de données géophysiques n'est pas univoque : le même contraste d'un paramètre géophysique (augmentation ou diminution d'un paramètre par rapport à la valeur moyenne de l'environnement) peut être interprété de diverses manières. Toute interprétation géophysique doit être confrontée aux données géologiques et hydrogéologiques connues, en collaboration avec l'ingénieur environnement en charge de la surveillance du site.

Dans le cadre de la surveillance de l'atténuation naturelle, la géophysique peut être mise en œuvre pour la caractérisation initiale d'un site, afin :

- d'implanter au mieux des forages de contrôle,
- de délimiter le panache de pollution,
- de caractériser la géologie et l'hydrogéologie.

Ces mêmes méthodes géophysiques peuvent être mises en œuvre sous forme d'un monitoring afin de suivre l'évolution du panache en terme de géométrie (extension), et en terme de concentration de la pollution.

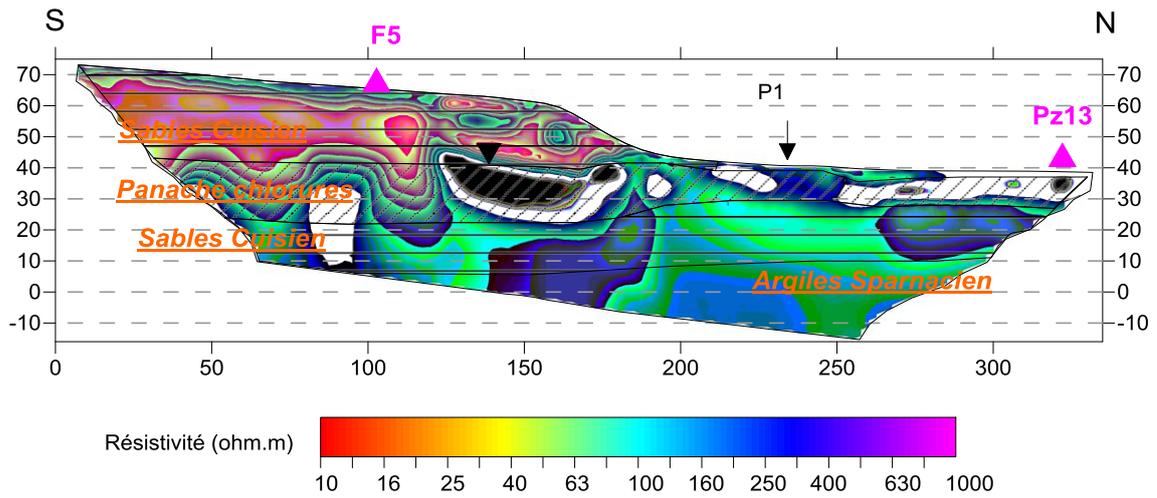


Figure 20 : Coupe verticale de résistivité obtenue par tomographie électrique 2D sur le profil P2

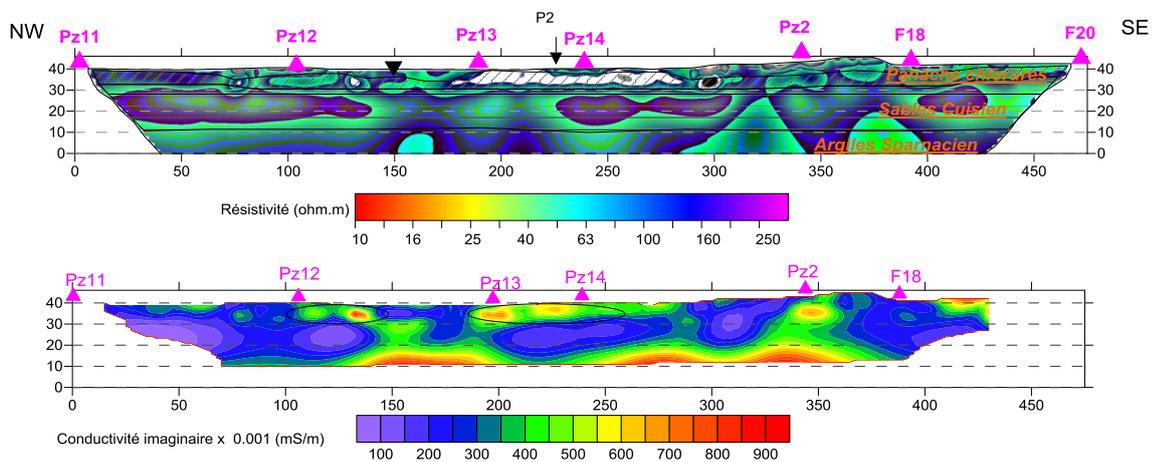


Figure 21 : Coupes verticales a) de résistivité électrique b) de la conductivité imaginaire à 8Hz sur le profil P1.

Piézomètre	Carbone Organique				
	VOHC	BTEX	Total	Chlorures	Eh
	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	mV
PZ4C	4593	360	1 900	41 900	- 122
PZ12	4254	224	2 100	40 600	- 169
PZ13	96	668	12 800	104 500	- 305
PZ14	6	2260	30 600	241 200	- 364
F5	10918	1255	14 900	129 300	- 287

Tableau 2 : analyse des polluants organiques et des teneurs en chlorures

6. Eléments de coûts et bénéfices associés

6.1. COUTS DES METHODES GEOPHYSIQUES

Une étude géophysique se décompose en 4 phases :

- L'aménage – repli et préparation du matériel géophysique,
- La réalisation des mesures sur le terrain,
- Le traitement et l'interprétation des données,
- La rédaction du rapport d'étude.

Nous ne traiterons pas de l'aménage-repli et préparation du matériel qui est dépendant du lieu d'étude, mais le coût de cette phase peut varier de plusieurs ordres de grandeur, à cause du volume et du poids de matériel pour certaines opérations, et de la distance au site.

L'interprétation des données est une phase difficilement chiffrable car elle est dépendante du volume de données de la campagne de terrain, et de la complexité de l'étude et du site. La rédaction du rapport dépend elle-même du degré de complexité de l'étude. Elle ne sera pas chiffrée.

Ce rapport va donner des indications sur le coût des phases « mesures de terrain » et « traitement » en les déclinant par méthode géophysique.

Contrairement à une analyse chimique standardisée qui se pratique avec un protocole fixé, l'étude géophysique est soumise à de nombreux aléas qui ont un fort impact sur le coût d'une campagne d'étude :

- Conditions de terrain : accessibilité du terrain, nécessité de layonnage, sécurisation du secteur (par exemple en bordure de route), présence de routes, de lotissements, topographie, travail sur route goudronnée,
- La profondeur d'investigation étant variable d'une étude à l'autre, la quantité de capteurs à déployer, la puissance de la source (électrique ou sismique) est variable,
- La résolution latérale et verticale est une composante variable d'une étude à l'autre, l'espacement entre capteurs doit également être adapté,
- Pour un profil, le pas de mesure va conditionner le coût ; de la même manière, lorsqu'on étudie une zone, la densité de profils va aussi conditionner le coût de l'opération.
- Les conditions de sol auront également une forte influence sur le coût d'étude. En méthode électrique, les sols secs ou très grossiers (graviers ou remblais) demandent une préparation initiale des trous d'électrode qui peut être longue et difficile : réalisation des trous, remplissage des trous avec une bentonite salée (à minima une boue saturée en eau).
- les impondérables car très dépendant du terrain : il est souvent nécessaire d'obtenir des autorisations d'accès sur les parcelles de la zone à étudier. Ces demandes d'autorisation d'accès sur un terrain sont souvent coûteuses en temps. Elles dépendent des « relations de voisinage » et du nombre de propriétaires à contacter.

On ne va donc pas calculer de coût kilométrique d'une étude géophysique, mais on va donner quelques indications :

- sur les rendements théoriques possibles pour chaque méthode, c'est-à-dire sur un terrain dégagé, sans difficulté de mise en œuvre,

- le nombre, le niveau de technicité et l'expérience exigée pour intervenant.

Cette évaluation est donc très minorante et il faudra la pondérer en fonction des surcoûts éventuels liés au terrain. Il faut noter que les rendements augmentent généralement avec l'augmentation de la surface à couvrir, car pour chaque étude il y a des travaux forfaitaires à réaliser dont le coût varie peu si la surface à couvrir augmente. Par exemple, le positionnement et le nivellement de points de mesure par DGPS est souvent lourd à mettre en œuvre, mais un fois en route, les points supplémentaires sont levés rapidement.

Autre exemple : on mettra 1 jour pour lever 2 panneaux électriques s'il n'y en a que 2 à lever, mais le rendement pourra monter à 3 ou 4 (suivant la longueur ou la difficulté) s'il y en a 20 à lever. C'est pourquoi les coûts donnés plus bas sont indicatifs mais ne peuvent servir à établir un devis d'étude. La grille de calcul des bureaux d'étude est beaucoup plus complexe et surtout, elle change pour chaque site.

Afin de faire un calcul du coût d'une étude, on peut se fixer sur le coût journalier⁵ :

- entre 300 et 500 € pour un technicien géophysicien
- entre 500 à 700 € pour un ingénieur d'étude géophysicien
- entre 700 et 900 € pour un ingénieur géophysicien senior

Ce coût dépend des bureaux d'étude, du degré de qualification et de l'expérience du géophysicien. D'une manière général, une étude fait appel à des travaux de technicien et d'ingénieur d'étude pour la phase terrain, des travaux d'ingénieur senior pour la conception, l'interprétation et le suivi de l'étude (parfois pour le terrain si celui-ci est complexe).

6.1.1. Potentiel spontané

L'absence de source extérieur de courant électrique rend la méthode du potentiel spontané très simple et peu couteuse, que ce soit pour le diagnostic et tout particulièrement pour la surveillance. Ce type de méthode est réalisé avec un seul opérateur.

Dans le cas d'un diagnostic de site, la maille de mesure est de 5 x 5 m ou de 10 x 10 m. Si le terrain est dégagé, on peut réaliser de manière optimale environ 400 stations par jour qui sont positionnées au préalable (par exemple par GPS différentiel). Cela permet de couvrir 1 ha ou 4 ha par jour respectivement à la maille 5 x 5 m ou 10 x 10 m.

L'opérateur peut être un technicien géophysicien.

Le traitement consiste à interpoler l'ensemble des mesures et à soustraire éventuellement un champ régional pour en déduire les secteurs anormaux. Cette phase demande peu de temps en comparaison avec le temps de mesure sur le terrain. Il faut compter 1 jour de traitement pour 2 à 4 jours de mesure de terrain.

6.1.2. Configuration gradient, mise-à-la-masse et électrode enterrée

Les configurations de mesure de résistivité électrique « gradient », « mise-à-la-masse » et « électrode enterrée » ont été regroupées dans une même catégorie de coût car elles utilisent une source fixe tout au long de la campagne de mesure. Ces méthodes sont réalisées avec un seul opérateur.

La maille de mesure est typiquement de 5 x 5 m ou 10 x 10 m. Dans le cas de surveillance, on peut espacer les points de mesures, qui sont choisis en fonction des résultats du diagnostic. Une fois les électrodes de courant installées et la grille de mesures positionnée, le rendement optimal de ces méthodes est de l'ordre de 200 à 400 points par jour. Cela dépend de l'amplitude du potentiel mesuré et donc du bruit de mesure.

Ce type de mesure est relativement complexe : un ingénieur senior doit superviser l'étude qui sera menée *a minima* par un ingénieur d'étude et un technicien.

Le traitement consiste à interpoler l'ensemble des mesures et à soustraire éventuellement un champ régional pour en déduire les points anormaux. Mais la mise au format des données diminue le rendement. Il faut compter 1 jour de traitement pour 2 jours de mesure de terrain

⁵ Prix de 2012
ADEME

6.1.3. Tomographie 2D de résistivité électrique

Cette méthode est celle dont le coût est le plus complexe à chiffrer. Le plus coûteux en temps est l'installation des électrodes de mesure. Ainsi, suivant le nombre d'électrodes, l'espacement entre électrodes, la topographie du terrain et le nombre d'opérateurs pour l'installation, le rendement peut varier de 1 à 8 profils par jour.

Typiquement, la plupart des tomographies sont réalisées avec 96 électrodes et un espacement de 5 m entre électrodes. A 2 opérateurs, on peut réaliser 4 profils de ce type par jour, si les déplacements entre profils sont rapides.

Ce type de mesure est devenu relativement banal grâce à une simplification des équipements de mesure. Néanmoins, un ingénieur senior devra initier l'étude qui pourra être menée par un ingénieur d'étude et un technicien (2 opérateurs). Si l'espacement entre électrodes est supérieur à 5 m, il faut ajouter un 3^{ème} opérateur (un manoeuvre ou un technicien) en raison des déplacements longs et nombreux qu'il faut faire le long d'un profil.

Les logiciels de filtrage et d'inversion sont devenus très performants. Il faut compter 1 jour de traitement pour 2 jours de mesure de terrain.

6.1.4. Tomographie 3D de résistivité électrique (configuration L ou C)

Il y a encore peu de tomographies 3D de ce type réalisées en France. Il est donc difficile de fixer des rendements.

La campagne de mesure sur le site 2 (4 profils de 400 m environ autour d'un lotissement) a pris 3 jours à 4 opérateurs (1 ingénieur senior référent et 3 techniciens géophysiciens).

Il y a ici une grosse phase de compilation des données et d'homogénéisation, car les géométries de mesure sont souvent complexes. Il faut compter 1 jour de traitement pour chaque jour de mesure de terrain.

6.2. BENEFICES

Toutes les autres méthodes employées pour un diagnostic environnemental ou une surveillance de l'atténuation naturelle font appel à des prélèvements (eaux ou sols) et des analyses dans des forages, que ce soit pour la chimie, la microbiologie, l'isotopie. Les résultats sont par définition ponctuels et sont souvent sujets à controverse en fonction du protocole de prélèvement ou de la méthode d'analyse. Par ailleurs, il existe encore peu d'outils pour une surveillance continue dans le temps des paramètres chimiques, physico-chimiques, isotopiques ou microbiologiques.

Les méthodes géophysiques sont par essence non destructives, non intrusives et intégratrices. Elles ne remplacent pas des analyses car les paramètres géophysiques mesurés sont toujours examinés en relatif par rapport à un état de base, dit normal. On ne sait pas relier un paramètre géophysique à une valeur absolue de concentration de polluant par exemple. Par contre, grâce à sa vision intégratrice, la géophysique permet d'obtenir une continuité spatiale d'un paramètre géophysique. Cela permet de distinguer les secteurs anomaux dans le bruit de fond : on peut alors implanter des forages de contrôle et de surveillance en les répartissant entre zones anomaux et zones normales. Il y a lors un gain financier car on limite le nombre de forages et on abaisse l'incertitude sur l'étude car la vision intégratrice des mesures géophysiques permet de ne rien « rater ».

Il existe désormais des outils permettant de mettre en œuvre une surveillance géophysique à des coûts raisonnables, n'impliquant un retour de personnel sur le terrain et pouvant être piloté à distance. Par exemple, il est possible de suivre l'évolution de la résistivité sur un transect ou sur une surface, en installant un équipement permanent pilotage à distance via internet ou GSM.

En amont de l'étude de l'atténuation naturelle, les méthodes géophysiques apportent une meilleure connaissance géologique et hydrogéologique, car elles permettent de reconstruire la géométrie et la nature lithologique. Il est possible de suivre le niveau de nappe phréatique.

Grâce aux méthodes géophysiques, on peut espérer un gain en temps pour un diagnostic, un gain en connaissances, et une continuité des connaissances.

Néanmoins aucune étude n'a encore pu évaluer le bénéfice financier d'utiliser la géophysique plutôt que d'avoir recours à un diagnostic ou une surveillance classique basé sur des analyses de forage. Enfin le bénéfice en connaissances scientifiques qu'apporte la géophysique est difficilement chiffrable car il dépend de chaque cas d'étude qui est un cas particulier.

7. Bibliographie

- Abdel Aal, G. Z., E. A. Atekwana, L. D. Slater, and E. A. Atekwana (2004), Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12505, doi:10.1029/2004GL020030.
- Abdel Aal, G. Z., L. D. Slater, and E. A. Atekwana (2006), Induced polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation, *Geophysics*, 71, 13– 24.
- Abdel Aal, G. Z., E. Atekwana, S. Radzikowski, and S. Rossbach (2009), Effect of bacterial adsorption on low frequency electrical properties of clean quartz sands and iron-oxide coated sands, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L04403, doi:10.1029/2008GL036196.
- Abdel Aal, G. Z., E. A. Atekwana, E. A. Atekwana (2010). Effect of bioclogging in porous media on complex conductivity signatures. *Journal of Geophysical Research*, 115, G00G07, doi:10.1029/2009JG001159
- Abu-Zeid N., Æ G. Bianchini Æ G. Santarato Æ C. Vaccaro, 2004, Geochemical characterisation and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy) *Environmental Geology* 45:439–447, DOI 10.1007/s00254-003-0895-x
- AFNOR – Commission X31, 1999, Qualité du sol - Méthodes de détection et de caractérisation des pollutions - Partie 2 : guide général pour l'utilisation de méthodes géophysiques en criblage de terrain, FD X31-611-2 Août 1999
- Ajo-Franklin J. B., Geller J.T., Harris J. M., 2006, A survey of the geophysical properties of chlorinated DNAPLs, *J. Applied Geophys*, 59 (2006) 177– 189.
- Albrecht R, Gourry J-C, Simonnot M.O.et C Leyval (2011) Complex conductivity response to microbial growth and biofilm formation. *J. of Appl. Geophys*, 75, 558–564, doi:10.1016/j.jappgeo.2011.09.001.
- Aristodemou, E; Thomas-Betts, A, 2000, DC resistivity and induced polarisation investigations at a waste disposal site and its environments, *Journal of Applied Geophysics*, vol.44, no.2-3, pp.275-302.
- Arora T., N. Linde, A. Revil, J. Castermant, 2007, Non-intrusive characterization of the redox potential of landfill leachate plumes from self-potential data, *J. of Contaminant Hydrology* 274-292.
- ASTM, 2010, ASTM D6431 - 99(2010) Standard Guide for Using the Direct Current Resistivity Method for Subsurface Investigation
- ASTM, 2011a, ASTM D5777 - 00(2011) Standard Guide for Using the Seismic Refraction Method for Subsurface Investigation
- ASTM, 2011b, ASTM D6432 - 11 Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation
- ASTM, 2011c, ASTM D6429 - 99(2011)e1 Standard Guide for Selecting Surface Geophysical Methods
- Atekwana, EA; Sauck, WA; Werkema, DD, 2000, Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site, *Journal of Applied Geophysics* Volume: 44 Issue: 2-3 Pages: 167-180
- Atekwana, E. A., E. A. Atekwana, D. D. Werkema, J. P. Allen, L. A. Smart, J. W. Duris, D. P. Cassidy, W. A. Sauck, and S. Rossbach (2004a), Evidence for microbial enhanced electrical conductivity in

- hydrocarbon- contaminated sediments, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L23501, doi:10.1029/2004GL021359.
- Atekwana, E. A., D. D. Werkema, J.W. Duris, S. Rossbach, E. A. Atekwana, W. A. Sauck, D. P. Cassidy, J. Means, and F. D. Legall (2004b), In-situ apparent conductivity measurements and microbial population distribution at a hydrocarbon-contaminated site, *Geophysics*, 69, 56–63.
- Atekwana E., D. D. Werkema, E. A. Atekwana, 2006, Biogeophysics: The Effects of microbial processes on geophysical properties of the shallow subsurface, *Hydrogeophysics* 71, 161-193.
- Atekwana E.A., and E. A. Atekwana, 2010, Geophysical Signatures of Microbial Activity at Hydrocarbon Contaminated Sites: A Review, *Surv Geophys* (2010) 31:247–283 DOI 10.1007/s10712-009-9089-8.
- Barker R., Moore J., 1998. The application of time-lapse electrical tomography in groundwater studies. *The Leading Edge* 17, 1454–1458.
- Béhaegel M., Gourry J.C. (2003) - Investigations de pollutions organiques par méthodes géophysiques - BRGM/RP-52642-FR, 92 p., 57 fig., 4 tabl.
- Bigalke, J., and E. W. Grabner, The Geobattery model: A contribution to large scale electrochemistry, *Electrochim. Acta*, 42, 3443– 3452, 1997.
- Bond, D. R., D. E. Holmes, L. M. Tender, and D. R. Lovley, Electrodereducing microorganisms that harvest energy from marine sediments, *Science*, 295, 483– 485, 2002.
- Börner F., Gruhne M. and J. Shön, 1993, Contamination indications derived from electrical properties in the low frequency range, *Geoph. Prospect.*, 41, 83-98.
- Brusseau, M.L., N.T. Nelson, Z. Zhang, J.E. Blue, J. Rohrer, T. Allen, 2007 ,Source-zone characterization of a chlorinated-solvent contaminated Superfund site in Tucson, AZ, *Journal of Contaminant Hydrology* 90 21–40.
- Buselli, G; Lu, K, 2001, Groundwater contamination monitoring with multichannel electrical and electromagnetic methods, *Journal of Applied Geophysics*, vol.48, no.1, pp.11-23.
- Cardarelli E., Bernabini M., 1997. Two case studies of the determination of parameters of urban waste dumps. *Journal of Applied Geophysics*, 36, 167-174.
- Cardarelli E., G. di Filippo, 2004, Integrated geophysical surveys on waste dumps: evaluation of physical parameters to characterize an urban waste dump (four case studies in Italy), *Waste Manage Res* 2004: 22: 390–402
- Cassidy, D.P., Werkema Jr., D.D., Sauck, W., Atekwana, E., Rossbach, S , Duris, J., 2001, The effects of LNAPL Biodegradation Products on Electrical Conductivity Measurements: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics* 6, 47-52.
- Chambers J.E., M.H. Loke, R.D. Ogilvy, P.I. Meldrum, 2004, Noninvasive monitoring of DNAPL migration through a saturated porous medium using electrical impedance tomography , *Journal of Contaminant Hydrology*, 68, 1– 22
- Daily, A.L. Ramirez , R. Johnson (1998) – Electrical impedance tomography of a perchloroethylene release. *J. Eng. Env. Geophysics*. Vol.2, 189-201
- Davis C. A., E. A. Atekwana., E. Atekwana, L. Slater, S. Rossbach, M. R. Mormile. 2006, Microbial growth and biofilm formation in geologic media is detected with complex conductivity measurements, *Geophys. Res. Lett.*, 33 L18403.
- Delong, E., L'électricité bactérienne, plus qu'une curiosité, *La Recherche*, 358, 17, 2002.

- Garre, S.; Javaux, M; Vanderborght, J; Pages, L; Vereecken, H, 2011, Three-dimensional electrical resistivity tomography to monitor root zone water dynamics, *Vadose Zone Journal*, vol. 10, no. 1, pp.412-424,
- Gazoty A., G. Fiandaca, J. Pedersen, E. Auken, A. V. Christiansen, and J. K. Pedersen, 2012, Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 1793–1804, 2012
- Godio A. and M. Naldi, 2003, Two-dimensional electrical imaging for detection of hydrocarbon contaminants, *Near Surface Geophysics*, 2003, 131-137
- Gourry J.C. et Mathieu F. (2004) Reconnaissance géophysique des produits organo-chlorés dans des bassins de décantation, *Bibliographie et étude préliminaire*, BRGM/RC- 53937 FR, 66 p, 16 ill, 1 ann.
- Gourry J. C., Saada A., Dictor M. C., Joulian C., Crouzet C., Girard J. F., 2005, Influence of hydrocarbon biodegradation on geophysical parameters, *CONSOIL'2005*, Bordeaux, France.
- Gourry J. C., Saada A., 2006, Hydrocarbon plume and natural attenuation monitoring with electrical methods, *Proceedings of EAGE Near Surface conference*, Helsinki..
- Grellier, S., Robain, H., Bellier, G., Skhiri, N. (2006) – Influence of temperature on the electrical conductivity of leachate from municipal solid waste. *Journal of Hazardous Materials*, B137, pp. 612-617.
- Jougnot D., A. Ghorbani, A. Revil, P. Leroy, and P. Cosenza, 2010, Spectral induced polarization of partially saturated clay-rocks: a mechanistic approach, *Geophys. J. Int.* 180, 210–224 doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04426.x
- Kulesa, B; Kalin, R; Doherty, R; Phillips, D, 2006, Self-Potential (SP) and Active Electrical Geophysical Assessment of Bioremediation at a Contaminated Gasworks Plant, *Proceedings of the 2006 American Geophysical Union Joint Assembly*. [np].
- Llera, F J; Sato, M; Nakatsuka, K; Yokoyama, H, 2006, Temperature dependence of the electrical resistivity of water-saturated rocks, *Geophysics*, vol.55, no.5, pp.576-585, May 1990
- Linde N. and A. Revil Inverting residual self-potential data for redox potentials of contaminant plumes *Geophys. Res. Lett.* 34 (2007) L14302.
- Lopes de Castro D., R. M. G. Castelo Branco, 2003, 4-D ground penetrating radar monitoring of a hydrocarbon leakage site in Fortaleza (Brazil) during its remediation process: a case history, *Journal of Applied Geophysics* 54, 127– 144
- Loke M.H. and Barker,R.D., 1996, Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton methods. *Geophysical Prospecting*, 44, 131-152.
- Maineult A., Y. Bernabé, P. Ackerer, 2006, Detection of advected, reacting redox fronts from self-potential measurements, *Journal of Contaminant Hydrology* 86, 32-52.
- Martinho E., Almeida F. and Senos Matias M.J., 2006, An experimental study of organic pollutant effects on time domain induced polarization measurements, *J of Applied Geophys*, 60, 27-40.
- Minsley B.J., Modeling and inversion of self-potential data, PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology (2007) 251 p.
- Minsley B. J., J. Sogade, and F. D. Morgan, 2007, Three-dimensional self-potential inversion for subsurface DNAPL contaminant detection at the Savannah River Site, South Carolina, *Water Resour. Res.* 43 W04429.

- Naudet V., A. Revil, E. Rizzo, J.-Y. Bottero and P. Bégassat, 2004, Groundwater redox conditions and conductivity in a contaminant plume from geoelectrical investigations, *Hydrology and Earth System Sciences*, 8, 1, 8–22.
- Naudet V., A. Revil, J.-Y. Bottero and P. Bégassat, 2003, Relationship between self-potential (SP) signals and redox conditions in contaminated groundwater, *Geophysical Research Letters*, 30, 2091, doi:10.1029/2003GL018096
- Naudet V., and A. Revil, 2005, A sandbox experiment to investigate bacteria-mediated redox processes on self-potential signals, *Geophysical Research Letters*, 32(11), L11405, doi:10.1029/2005GL022735,.
- Naudet V., J.C. Gourry, F. Girard, F. Mathieu and A. Saada (2012), 3D electrical resistivity tomography to locate DNAPL contamination around a housing estate, *Near Surface Geophysics*, doi:10.3997/1873-0604.2012059.
- Ntarlagiannis D. and A. Ferguson. 2009. SIP response of artificial biofilms. *Geophyscis*, 74(1), 10.1190/1.3031514
- Ntarlagiannis, D., N. Yee and L. Slater, 2005a. On the low-frequency electrical polarization of bacterial cells in sands, *Geophys. Res. Lett.*, 32(L24402), 1-4.
- Ntarlagiannis, D., K. H. Williams, L. Slater and S. Hubbard, 2005b. The low frequency response to microbial induced sulfide precipitation, *J. Geophys. Res*, 110.
- Nyquist, J. E., and C. E. Corry, 2002, Self-potential: The ugly duckling of environmental geophysics, *The Leading Edge*, 21, 446– 451.
- Perry J. W., C. E. Corry, T. R. Madden, 1996, Monitoring leakage from underground storage tanks using spontaneous polarization (SP) method, *SEG Expanded Abstr.* 15, 932–935.
- Sauck, W.A., 2000, A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments: *Journal of Applied Geophysics* 44, 151-165.
- Slater, L. D., F. D. Day-Lewis, D. Ntarlagiannis, M. O'Brien, and N. Yee (2009), Geoelectrical measurement and modeling of biogeochemical breakthrough behavior during microbial activity, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L14402, doi:10.1029/2009GL038695.
- Stewart M., L. North, 2006, A borehole geophysical method for detection and quantification of dense, non-aqueous phase liquids (DNAPL) in saturated soils, *Journal of Applied Geophysics* 60 87–99
- Timm, F., Moeller, P., 2001, The relation between electric and redox potential; evidence from laboratory and field measurements: *J. Geochem. Explor.*, 72, 115-128.
- US-EPA, 1997, *Field Analytical and Site Characterization Technologies, Summary of Applications*, EPA-542-R-97-011, November 1997
- US-EPA, 1998a, *Geophysical Techniques to Locate DNAPLs: Profiles of Federally Funded Projects*, EPA 542-R-98-020, 26 pp
- US-EPA, 1998b, *Site characterization Library, Volume 1, Release 2.0*, EPA 600-C-98-001
- US-EPA, 2000, *Innovations In Site Characterization: Geophysical Investigation at Hazardous Waste Sites*, EPA 542-R-00-003, 197 pp.
- Vanhala, H., Soininen, H., Kukkonen, I, 1992, Detecting organic chemical contaminants by spectral-induced polarization method in glacial till environment, *Geophysics*, vol.57, no.8, pp.1014-1017

- Vaudelet P., M. Schmutz, M. Pessel, M. Franceschi, R. Guérin, O. Atteia , A. Blondel, C. Ngomseu, S. Galaup, F. Rejiba, P. Bégassat, 2011, Mapping of contaminant plumes with geoelectrical methods. A case study in urban context, *Journal of Applied Geophysics* 75, 738–751
- Vichabian, Y., P. Reppert, and F. D. Morgan, 1999, Self potential mapping of contaminants, *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*, March 14–18, SAGEEP.
- Vichabian, Y. , Morgan, F.D., 1999, Self potential monitoring of jet fuel air sparging; *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP)*, Environmental and Engineering Geophysical Society, Wheat Ridge, CO, United States (USA), United States (USA), 549-553,
- Ward, Stanley H, 1991, Resistivity and induced polarization methods, *Geotechnical and environmental geophysics; Volume I, Review and tutorial, Investigations in Geophysics*, vol.5, pp.147-189, 1991, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, United States (USA)
- Williams, K. H., D. Ntarlagiannis, L. Slater, A. Dohnalkova, S. S. Hubbard, and J. F. Banfield, 2005., *Geophysical imaging of stimulated microbial biomineralization*, *Environ. Sci. Technol.*, 39, 7592–7600.

**LA RESISTIVITE ELECTRIQUE ET LA POLARISATION
PROVOQUEE**

A. LA RESISTIVITE ELECTRIQUE

a. Définition

La résistivité électrique caractérise la propriété physique d'un matériau à transporter des charges électriques libres sous l'effet d'un champ électrique. Les charges libres peuvent être des électrons ou des ions. Comme les électrons ne peuvent être mobiles que dans les métaux, dans le cas de l'atténuation naturelle, et donc en l'absence de métaux, ce sont les ions contenus dans un matériau qui sont l'origine de la conduction d'un courant électrique.

Ces ions ont 2 origines :

- Ions de la phase diffuse contenus dans le fluide interstitiel
- Ions adsorbés à la surface de minéraux, et tout particulièrement à la surface de feuillets d'argiles.

Cela se traduit par l'équation générale de Johnson (Johnson et al., 1986):

$$\sigma_b = \frac{1}{F} \left(\sigma_F + \frac{2\Sigma_s}{\Lambda} \right) \quad (1)$$

où F est le facteur de formation, σ_F est la conductivité du fluide et Σ_s est la conductance de surface de grain. Le paramètre Λ est également inversement proportionnel à la surface effective de pore.

Le facteur de formation F s'écrit en première approximation :

$$F = a\phi^{-m}$$

Où ϕ est la porosité connectée du matériau et m est l'indice de cimentation, compris entre 1.5 et 2.5. a = facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0.6 et 2 (a < 1 pour les roches à porosité intergranulaires et a > 1 pour les roches à porosité de fracture) ; m = facteur de cimentation (Il dépend de la forme des pores, de la compaction et varie entre 1,3 pour les sables non consolidés à 2,2 pour les calcaires cimentés).

b. Mesure de la résistivité électrique

Le principe de base de la prospection électrique est d'injecter dans le sol un courant électrique d'intensité I entre deux électrodes A et B et de mesurer la différence de potentiel ΔV induite entre une autre paire d'électrodes M et N (Figure 22).

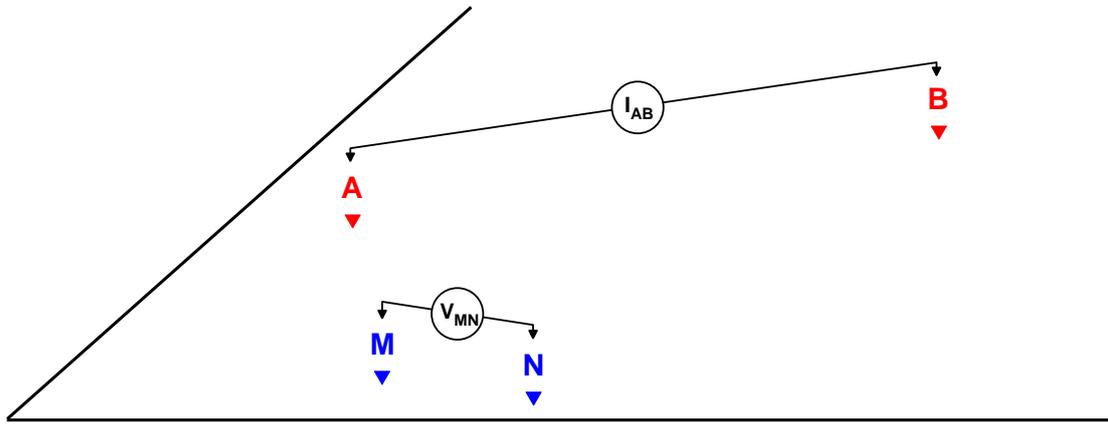


Figure 22 : Principe de la mesure en courant électrique continu

A partir de la valeur du courant injecté I , de la mesure de la différence de potentiel ΔV et de l'écartement entre les différentes électrodes, on peut déterminer la **résistivité électrique apparente** du sous-sol sur base de la loi d'Ohm :

$$\rho_{app} = K \times \frac{\Delta V}{I}$$

où K est un facteur dépendant de la géométrie du dispositif de mesure (Figure 23) :

$$K = 2\pi \times \left[\frac{1}{r_{11}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}} + \frac{1}{r_{22}} \right]^{-1}$$

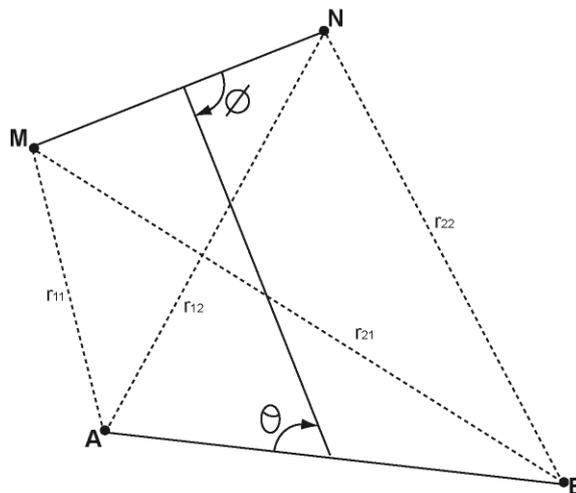


Figure 23 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \theta, \Phi < \pi$)

La résistivité apparente d'un terrain hétérogène correspond à la résistivité d'un terrain homogène qui, pour une configuration identique des électrodes et un même courant injecté, donnerait la même mesure ΔV . Elle est fonction de la résistivité, de la géométrie des diverses couches et de la disposition des électrodes. Il existe plusieurs dispositifs d'électrodes utilisés en pratique : Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle, pôle-pôle, etc.

Il existe également une technique de mesure n'utilisant pas les électrodes métalliques plantées (dites galvaniques), mais des électrodes capacitives qui sont posées au sol (cf. annexe 3). Cette technique permet de tirer un dispositif de mesure de résistivité électrique en continu.

B. LA POLARISATION PROVOQUEE

a. Définition

La polarisation provoquée est la propriété physique caractérisant la capacité d'un matériau à mouvoir des charges électriques liées sous l'effet d'un champ électrique variable dans le temps (par exemple alternatif ou carré). C'est la propriété du matériau à retenir et restituer des charges électriques, comme un condensateur.

Sous l'effet d'un champ électrique externe variable au cours du temps, les charges électriques libres et liées dans les phases liquides et solides vont créer des polarisations électriques de diverses natures et ayant des constantes de relaxation variables.

Les gammes de fréquence qui intéressent la polarisation provoquée vont de quelques milliHertz à quelques centaines d'Hertz.

On trouvera une définition complète dans Ward (1991).

b. Les processus à l'origine du phénomène de polarisation provoquée

L'ensemble des processus à l'origine de l'effet PP observé sont nombreux et pour la plupart encore mal connus et mal expliqués. Dans ce qui suit, nous allons passer en revue les principaux phénomènes.

L'origine de cet effet capacitif est principalement liée à des processus électrochimiques aux interfaces. En effet, les surfaces de la plupart des solides possèdent une charge nette (le plus souvent négative) liée à l'adsorption d'ions. Cette surface chargée modifie la distribution des charges libres présentes dans l'électrolyte, attirant les ions de charges opposée et repoussant les autres. Une couche diffuse se forme alors près de la surface chargée du solide. Ce phénomène crée ce que l'on appelle une double couche électrique qui présente des effets capacitifs lorsqu'un courant électrique la traverse. Ainsi, les propriétés de surface des grains et les phénomènes d'adsorption sont des effets importants sur l'effet de polarisation provoquée.

La polarisation d'électrode (réactions d'oxydo-réduction)

La polarisation d'électrode est le premier phénomène à avoir été mis en évidence. C'est ce phénomène qui permet de repérer les amas métalliques en exploration minière. C'est également ce phénomène qui est à l'origine de la petite surtension initiale lorsqu'on plante une électrode métallique dans le sol.

Le passage du courant dans le sol ou dans la roche se fait principalement par conduction ionique à travers les pores ou les fractures remplis d'électrolyte. Il arrive que certains pores soient bouchés par des particules métalliques. Ces particules ne peuvent pas transmettre les ions, il y a accumulation d'ions à la surface de la particule. Au niveau de ces interfaces, il se déroule des réactions d'oxydo-réduction (Olhoeft, 1985).

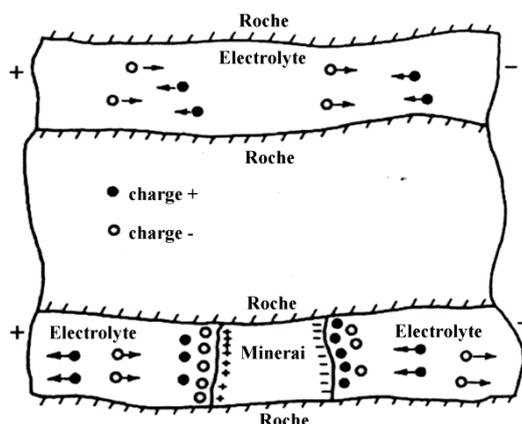


Figure 24 : La polarisation d'électrode (d'après Telford et al., 1990)

Sur la Figure 24 (partie inférieure), on peut observer une accumulation de charges positives à droite et une accumulation de charges négatives à gauche. Ces charges attirent ou repoussent des électrons dans la particule métallique. On obtient alors une « double-couche » électrisée et la particule est dite polarisée. Quand on coupe brusquement le courant, cette double couche va se décharger et se comporter un peu comme un condensateur moléculaire et par la même créer un courant transitoire mesurable (Sumner, 1976).

La polarisation d'électrode ne semble pas *a priori* pas être liée à la présence de polluants organiques. Cependant, comme nous l'avons vu précédemment en PS, les sites pollués en hydrocarbures peuvent être le siège de réactions d'oxydo-réduction. Ces réactions pourraient donc peut-être également produire un effet PP.

La polarisation de membrane (échange d'ions)

C'est un phénomène mal connu et mal expliqué. Il se déroule en présence de différents types de minéraux mais surtout avec les particules argileuses. Ce phénomène semble jouer un rôle important dans les réactions impliquant les polluants organiques.

Les argiles sont des minéraux qui possèdent une charge négative nette sur leur surface suite à la substitution d'un cation. Les cations sont donc électrostatiquement attirés par cette charge de surface négative, on observe une concentration en cations qui est d'autant plus importante que l'on s'approche de la surface de la particule. À l'inverse, les anions vont être repoussés par cette charge de surface négative et leur concentration va augmenter lorsqu'on va s'éloigner de la surface. Il se crée alors une double couche électrique.

Lorsqu'un courant traverse les argiles, l'équilibre de la double couche est rompu et une nouvelle forme d'équilibre s'établit sur une certaine période de temps. Lorsque le courant d'excitation est coupé, les charges se redistribuent selon leur état d'équilibre initial. Cette redistribution n'est pas immédiate, on observe un effet PP. Les concentrations en anions dans les pores de l'argile peuvent atteindre une épaisseur de l'ordre du micromètre. Si le pore a un diamètre de cet ordre de grandeur, le déplacement des anions sera empêché et va entraîner également, une polarisation et donc un effet PP (Figure 25).

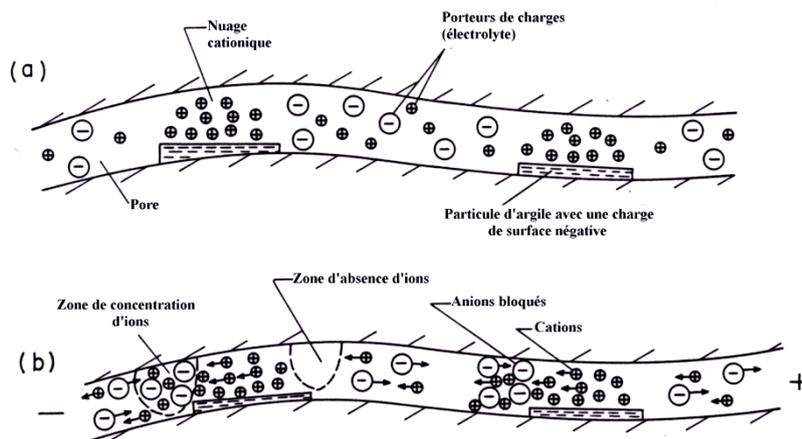


Figure 25 : Représentation de l'origine du phénomène de polarisation de membrane. (a) avant l'application d'un courant ; (b) après l'application d'un courant (d'après Sumner, 1976).

c. Mesure de la polarisation provoquée

Le dispositif de mesure de la polarisation provoquée est identique à celui de la résistivité électrique (voir chapitre b). Seul change la forme du courant électrique injectée dans le sol ainsi que décrit plus bas. D'autre part, comme l'effet PP est très faible car il se compte en % du signal principal, il est nécessaire de disposer d'un impédancemètre de haute performance.

Il existe deux manières de mesurer l'effet PP (effet capacitif) qui sont absolument équivalents, mais qui varient par la forme du courant électrique et sur la manière de mesurer le potentiel électrique :

- La polarisation provoquée temporelle
- La polarisation provoquée spectrale

La polarisation provoquée temporelle

La PP temporelle est une méthode utilisée depuis de nombreuses années dans l'exploration minière. On l'appelle encore parfois technique pulsée. Elle consiste à injecter un courant carré (Figure 26) dans le sol et d'observer après coupure du courant le comportement de la différence de potentiel aux bornes de deux électrodes. Ces courbes ressemblent aux courbes de décroissances d'un condensateur. La durée d'injection du courant est souvent égale à la durée de coupure et est fixée à 1 s, 2 s, 4 s ou 8 s. On caractérise alors ces courbes de décroissance du potentiel en calculant une quantité appelée chargeabilité M . La chargeabilité est définie comme étant le rapport entre le voltage secondaire (V_s) mesuré après la coupure du courant à un instant t et le voltage primaire (V_p) mesuré juste avant la coupure :

$$M = \frac{V_s}{V_p}$$

Le voltage secondaire peut être mesuré en un seul point après l'interruption du courant, mais il vaut mieux l'intégrer sur une certaine durée afin d'avoir une mesure beaucoup plus fiable. On calcule donc l'aire sous la courbe (Figure 27). La chargeabilité vaut alors :

$$M = \frac{1}{V_p} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t).dt$$

avec les notations de la Figure 27.

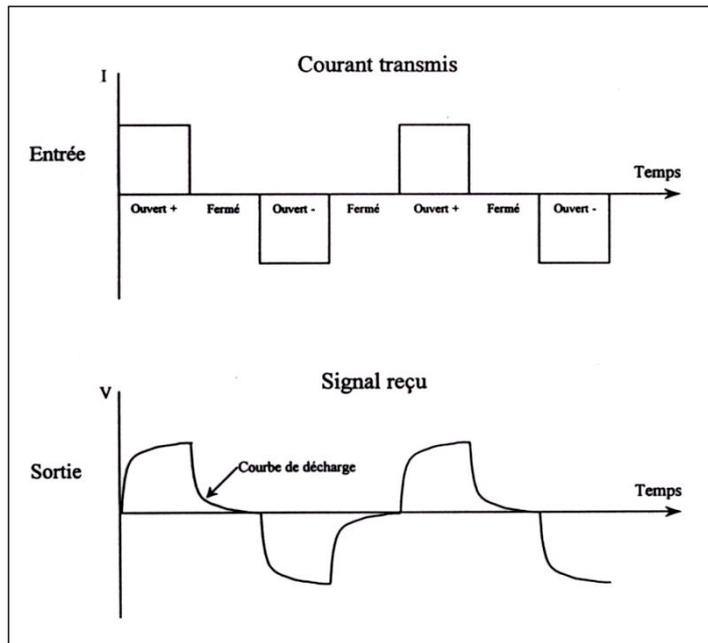


Figure 26 : Signaux transmis et reçus en domaine temporel.

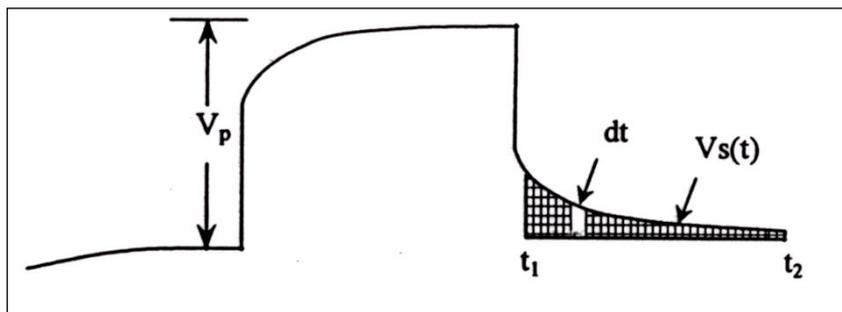


Figure 27 : Définition de la chargeabilité en domaine temporel.

Comme on peut le constater, cette valeur est indépendante du courant injecté dans le sol. Une normalisation par le temps est généralement opérée afin que les valeurs de chargeabilité puisse être comparables d'un instrument à l'autre. On a donc :

$$M = \frac{1}{V_p(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} V_s(t).dt$$

La chargeabilité est généralement exprimée en mV/V.

Les appareils actuels caractérisent la courbe de décharge par plusieurs chargeabilités mesurées en différents instants en intégrant sur différentes durées. L'ELREC Pro (Iris Instruments) par exemple mesure vingt fenêtres de chargeabilité pour chaque courbe. La distribution, ainsi que la longueur des fenêtres, peut varier : distribution linéaire, semi-logarithmique, logarithmique, etc.

La polarisation provoquée fréquentielle

Les mesures de PP spectrale se déroulent de la même manière que les mesures de PP temporelle. Un générateur de courant crée des signaux sinusoïdaux à une fréquence qui varie généralement entre 10^{-2} et 10^4 Hz. Pour chacune de ces fréquences, une unité mesure le déphasage entre le courant injecté et le voltage mesuré par les électrodes (la phase) ainsi que la résistivité apparente pour la fréquence donnée (le module) (Figure 28).

On calcule généralement la phase :

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\text{Im}(Z(\omega))}{\text{Re}(Z(\omega))}\right)$$

et le module :

$$\|Z(\omega)\| = \sqrt{(\text{Re}(Z(\omega)))^2 + (\text{Im}(Z(\omega)))^2}$$

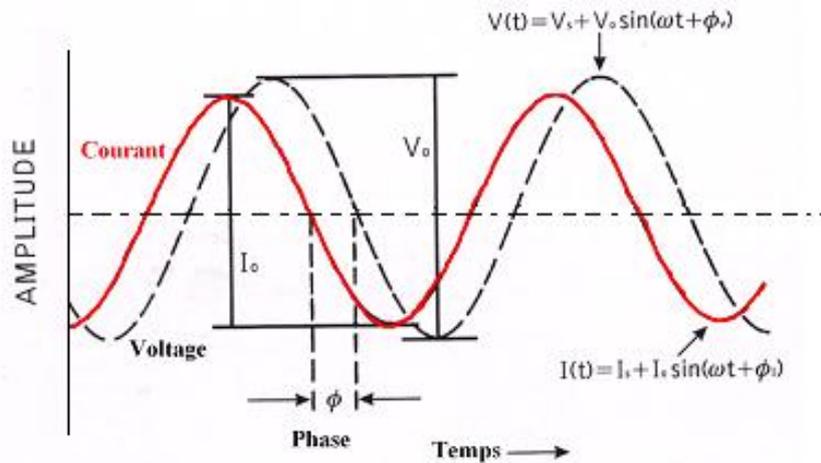


Figure 28 : Déphasage entre courant injecté et voltage mesuré.

Les mesures en domaine fréquentiel se font souvent en laboratoire, on parle alors généralement de résistivité complexe. L'avantage des mesures en domaine fréquentiel résulte dans le fait qu'on puisse observer plusieurs types de mécanismes étalés sur une large gamme de fréquence. Certains phénomènes opèrent rapidement et sont observés à des fréquences relativement élevées, d'autres sont plus lents et sont observés à des fréquences plus basses. Quoiqu'il en soit, la résistivité complexe et la PP temporelle conventionnelle quantifient le même phénomène, la première étant la transformée de Fourier inverse de l'autre. En temporel, le phénomène se traduit par un phénomène de relaxation, le potentiel prend un certain temps avant de s'annihiler complètement après coupure de l'injection « continue » ; en domaine fréquentiel, le phénomène se traduit par un déphasage entre courant injecté et voltage mesuré.

C. INFLUENCE DE PARAMETRES EXTERIEURS SUR LA RESISTIVITE ET LA POLARISATION PROVOQUEE

a. Saturation en eau de la zone non saturée

Pour un milieu faiblement argileux, la résistivité ρ d'un milieu minéral s'écrit :

$$\rho = a\rho_w\phi^{-m}S_w^{-n}$$

Où ϕ est la porosité connectée, m est le facteur de cimentation (entre 1.5 et 2.5)

ρ_w est la résistivité de l'eau porale

S_w est la saturation en eau

n est un exposant généralement égal à 2.

Pour un milieu donné, on voit donc que la saturation S_w et la résistivité de l'eau ρ_w sont les 2 principaux paramètres ayant une influence sur la résistivité et qui peuvent varier au cours du temps pendant la surveillance de l'atténuation naturelle.

Comme c'est la résistivité de l'eau qui change dans le cas d'une pollution, il faut donc connaître le plus précisément possible les évolutions de la saturation pour mieux suivre les variations de la résistivité de l'eau.

De récents travaux (Jougnot et al., 2010) ont établi la relation entre les paramètres de la polarisation provoquée (déphasage, chargeabilité) et la saturation pour des roches partiellement argileuses. Les relations sont complexes et ne seront pas exposés ici. C'est la fraction argileuse qui influence le plus la PP. L'influence est très marquée pour les faibles saturations (inférieure à 20%). D'autre part, cette influence est particulièrement marquée aux hautes fréquences (supérieures à 100 Hz) où l'interaction Maxwell-Wagner est dominante. Or les fréquences employées sur le terrain sont inférieures à 10 Hz. On peut donc considérer que, sur un milieu faiblement argileux, saturé à plus de 50% (c'est généralement le cas dans les climats tempérés), la saturation en eau aura plus d'influence sur les paramètres de PP pour des fréquences inférieures à 10 Hz.

b. Niveau piézométrique

Les méthodes électriques (résistivité et PP) sont intégratrices. Mise en œuvre depuis la surface du sol, la sensibilité des paramètres physiques mesurés va décroissant avec la profondeur d'investigation. Néanmoins, dès la profondeur d'investigation est supérieure à la profondeur du niveau piézométrique, le signal géoélectrique mesuré dépend de ce niveau piézométrique.

Pour établir une surveillance de l'atténuation naturelle, il est donc nécessaire de suivre le plus précisément possible les variations du niveau piézométrique qui peut fluctuer au gré des saisons.

c. Température

La température a une influence sur la résistivité (Llera et al., 1991, Grellier et al., 2006), principalement sur le coefficient de viscosité de l'eau porale.

En première approximation, c'est-à-dire pour des températures entre 5 et 25°C, la dépendance de la résistivité d'un milieu avec la température s'écrit :

$$\rho = \frac{\rho_{T_{ref}}}{1 + \alpha(T - T_{ref})}$$

Où T et T_{ref} sont respectivement la température du milieu et T_{ref} une température de référence (par exemple 15°C, qui est une température moyenne des aquifères)

ρ et $\rho_{T_{ref}}$ sont respectivement la résistivité à la température de mesure et la résistivité à la température de référence.

α est le coefficient de température, de l'ordre de 1.5 à 2.5%.

La résistivité diminue quand la température augmente. Par exemple la résistivité diminue de 10% si la température augmente de 4°C. Dans le cadre de l'atténuation naturelle où la dégradation des polluants est souvent exothermique, on voit que la simple augmentation de température peut avoir des effets mesurables sur la résistivité.

D. TECHNIQUES D'ACQUISITION DES METHODES ELECTRIQUES

a. Le panneau électrique

Une configuration d'acquisition est une manière d'agencer géométriquement les électrodes de courant (AB) et de potentiel (MN) (soit les quadripôles ABMN) en surface. Il en existe plusieurs, chacune présentant avantages et inconvénients. Les différences majeures entre ces configurations sont la distribution des lignes de courant électrique dans le sol et donc la forme des équipotentielles en surface ainsi que la valeur du coefficient géométrique K qui conditionnera les valeurs du courant minimal I à injecter pour mesurer un potentiel électrique minimal U fiable. Selon les équipements utilisés, certains dispositifs sont également plus rapides (dipôle-dipôle) à acquérir que d'autres (Schlumberger) grâce à des acquisitions multi-voies (plusieurs mesures de ΔV pour une injection de courant).

Pour la configuration Wenner, par exemple, la profondeur d'investigation est estimée égale à la moitié du plus grand écartement utilisé entre deux électrodes successives mais elle peut varier suivant la nature des terrains et leur résistivité. L'écartement entre électrodes détermine donc la profondeur d'investigation ainsi que les résolutions horizontale et verticale. Par rapport aux autres configurations, le dispositif Wenner rend les structures plus facilement reconnaissables sur la pseudo-section.

D'une manière générale, la mise en œuvre d'au moins deux configurations d'électrodes permet dans la plupart des contextes de mieux appréhender la géométrie des différents corps en présence. Ci-dessous sont présentées trois configurations souvent mises en œuvre avec les équipements automatisés actuels.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de subsurface et pour les discontinuités verticales. Dans cette configuration, le rapport signal/bruit décroît rapidement et la profondeur d'investigation se réduit également (Figure 29).

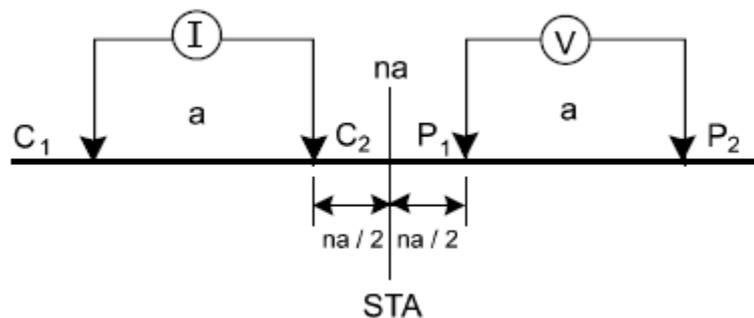


Figure 29 : Configuration dipôle-dipôle

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux par rapport au profil de mesure. La résolution au niveau des horizons de sub-surface est moins bonne et celle des structures plus globale. Son intérêt majeur est la profondeur d'investigation atteinte (de l'ordre de 80m pour un dispositif de 500 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit (Figure 30).

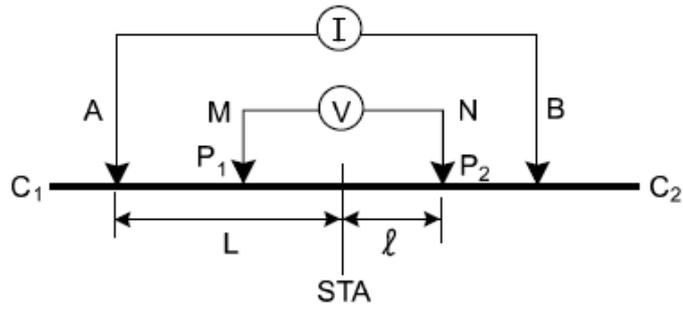


Figure 30 : Configuration de Schlumberger

Le dispositif Wenner est un dispositif présentant la particularité d'avoir trois espacements identiques entre les quatre électrodes. Avec ce dispositif, les résistivités apparentes sont moins affectées par les variations latérales superficielles (Figure 31).

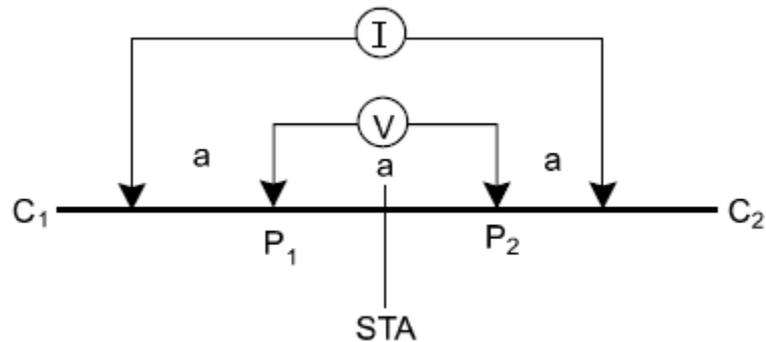


Figure 31 : Configuration de Wenner

Construction d'une pseudo-section de résistivité apparente

Après filtrage des données brutes de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité, de courant émis ou de potentiel mesuré (logiciels Iris Instruments et X2ipi), celles-ci sont agencées de manière à obtenir une coupe (pseudo-section) de résistivité apparente du sous-sol. Cette dernière est construite (automatiquement) en reportant la valeur de la résistivité apparente mesurée au centre du dispositif et à une pseudo-profondeur dépendant de l'écartement entre les électrodes. Cette représentation conduit à une image pour laquelle les valeurs de résistivité (puisqu'apparentes) et celles de profondeur ne sont pas correctes (Figure 32).

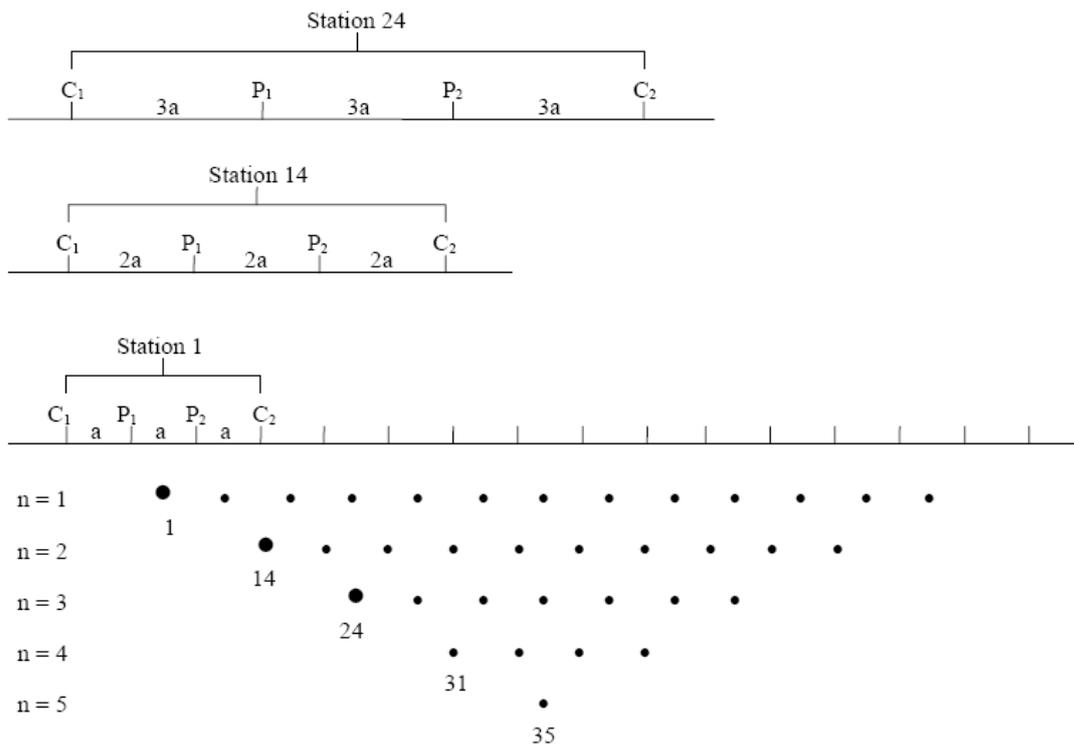


Figure 32 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner

Traitement et inversion des données

Afin d'obtenir une image quantitative représentant les variations de résistivité réelle (et non apparente) en fonction de la vraie profondeur, il est nécessaire d'inverser la pseudo-section (Figure 33). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker, 1996). Cette inversion des données est réalisée suivant un processus itératif qui tente de minimiser l'écart entre la pseudo-section de résistivités apparentes mesurées et une pseudo-section recalculée à partir d'un modèle de résistivité électrique. Ce modèle est modifié à chaque itération jusqu'à ce que les données mesurées et calculées atteignent une concordance acceptable ou jusqu'à ce qu'aucune nouvelle amélioration ne soit possible. Afin de prendre en compte les morphologies rencontrées, la topographie de chaque profil est incluse lors de l'inversion (Figure 34).

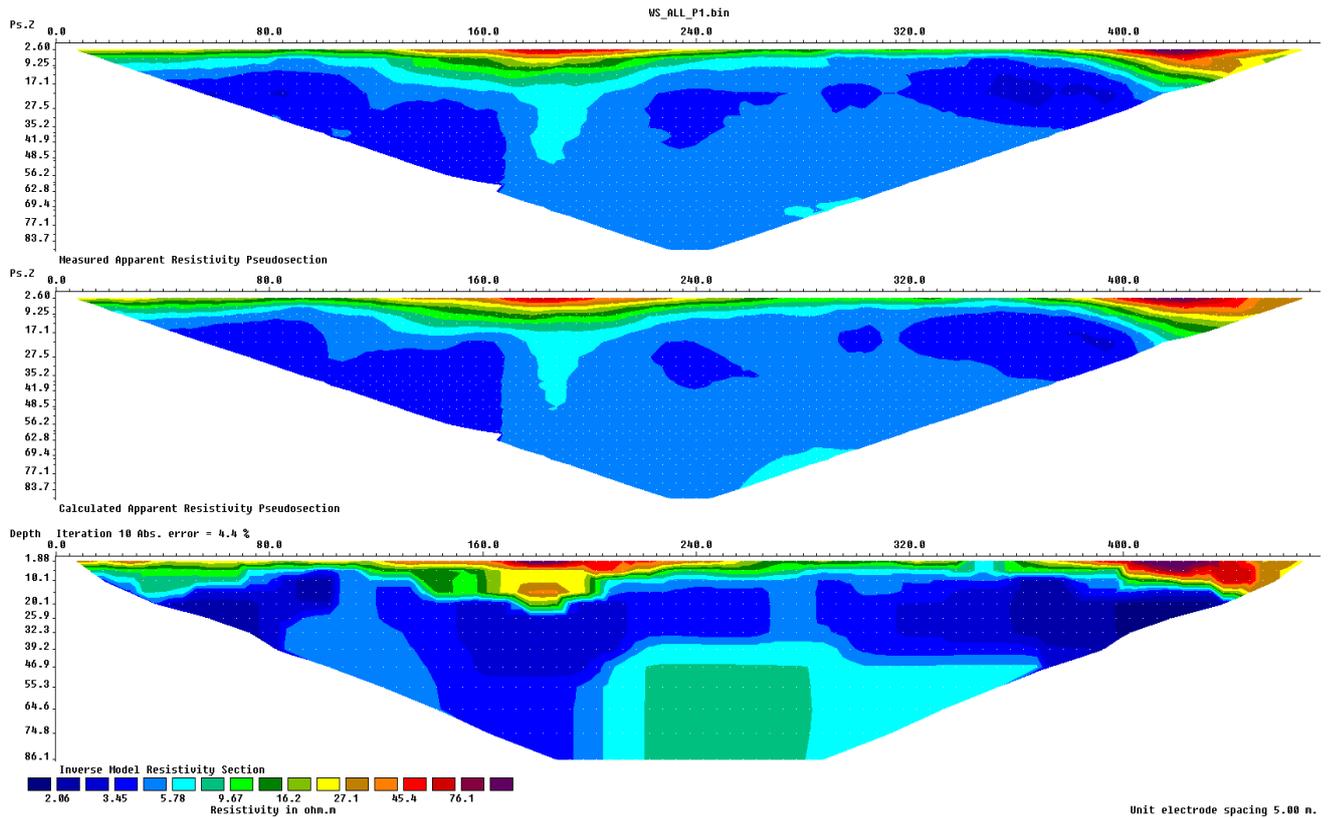


Figure 33 : Résultats complets (en images) d'une inversion. En haut la pseudo-section de résistivité apparente mesurées. En bas, le modèle de résistivité issu de l'inversion. Au centre, la pseudo-section de résistivité calculée sur la base du modèle de résistivité. L'erreur (RMS) constitue la différence entre les deux premières pseudo-sections (ici 4.4%).

La pseudosection de résistivité « vraie » (illustration du bas de la Figure 33), résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie des horizons, profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe (section) semblable à celle de résistivité apparente présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur. Cela pour les différentes configurations d'acquisition choisies.

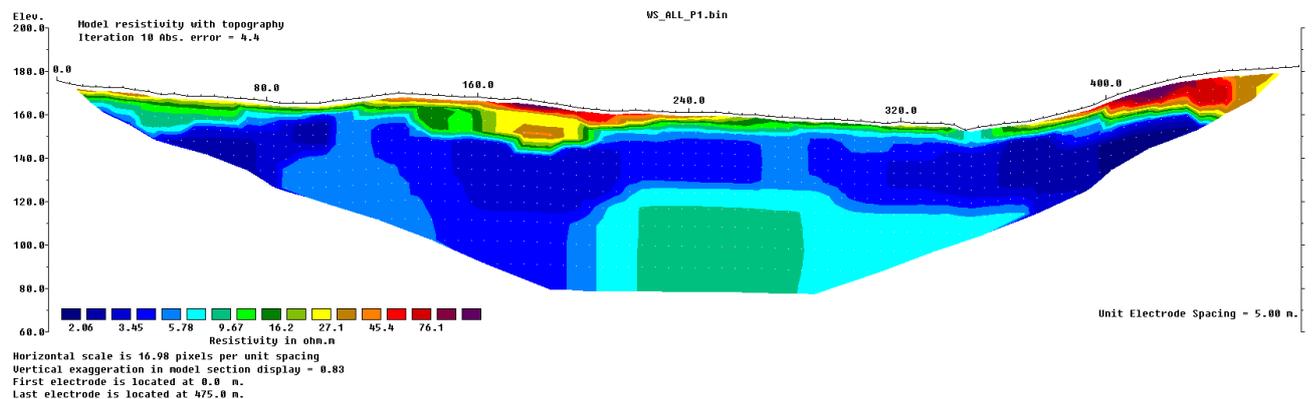


Figure 34 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion sont choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information « à priori ».

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géoélectriques) les paramètres fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données) et sont soumis à des principes d'équivalence. Cette indétermination ne peut être évaluée qu'en testant différentes solutions ou en contraignant l'inversion au moyen de paramètres (résistivités, épaisseurs, profondeurs) obtenus par d'autres moyens (autre méthode géophysique, diagraphies, forages, observations de terrain).

b. La méthode rectangle ou gradient

Le dispositif rectangle, encore appelé gradient et un dispositif électrique utilisé très souvent en exploration minière. Il permet d'obtenir efficacement une carte de chargeabilité et de résistivité de la zone étudiée.

Les deux électrodes d'injection sont placées à l'extérieur du terrain d'étude de part et d'autre de celui-ci à au moins trois fois la demi-longueur du terrain (Figure 35).

On mesure alors sur la zone centrale la chargeabilité et la résistivité apparente avec un dipôle de longueur déterminée orienté dans la direction des deux électrodes d'injection.

Concernant le site Y, nous avons utilisé un AB égale à 200 m et un dipôle de mesure MN égal à 5 m. Les câbles d'injection ne traversaient pas la zone d'étude afin de s'affranchir au maximum des effets de couplage électromagnétique. Chaque point d'injection était constitué d'une grappe d'électrodes en acier reliées entre elles et arrosées par de l'eau saturée en sel afin de diminuer la résistance de prise et de faciliter l'injection du courant.

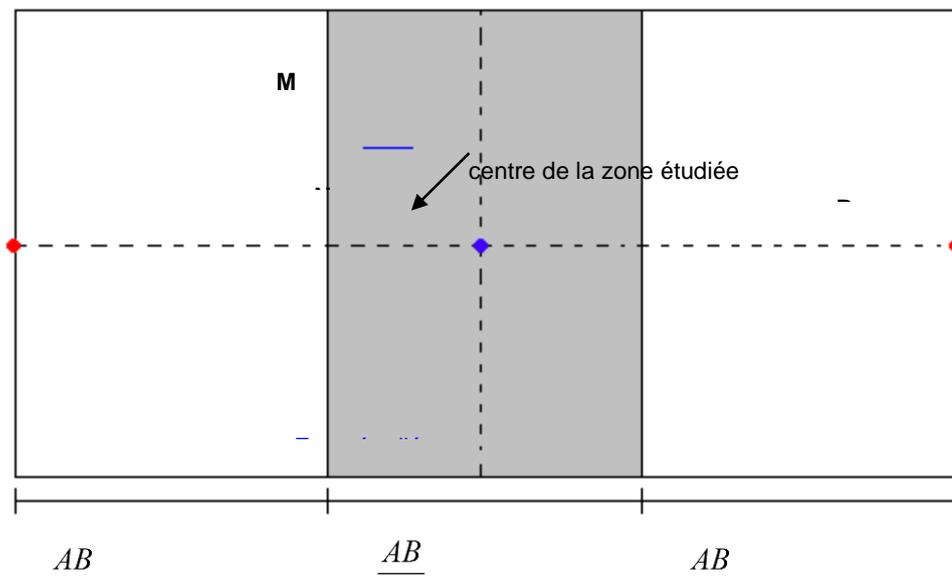


Figure 35 : Géométrie du dispositif rectangle. A et B sont les électrodes d'injection. M et N sont les électrodes de mesure.

La résistivité apparente de la configuration rectangle est donnée par :

$$\rho_a = 2\pi \frac{L^2}{a} \frac{1}{G} \frac{\Delta V}{I}$$

avec $L = \frac{AB}{2}$

$$G = \frac{1 - X}{(Y^2 + (1 - X)^2)^{3/2}} + \frac{1 + X}{(Y^2 + (1 + X)^2)^{3/2}}$$

et $X = \frac{x}{L}$

$$Y = \frac{y}{L}$$

(x, y) coordonnées du point de mesure dans le repère ayant pour origine le milieu de AB ,

a est la longueur du dipôle de mesure,

I est le courant injecté,

ΔV est la différence de potentiel mesurée.

c. Les techniques de forage : la mise à la masse et l'électrode enterrée

Mise à la masse

La mise-à-la-masse est une méthode électrique utilisée lorsqu'une zone conductrice est déjà repérée. Une électrode de courant est placée directement dans la zone, soit en surface (si la zone est affleurante), soit dans un forage, l'autre électrode de courant est rejetée à l'infini. Toute la zone conductrice sert d'électrode d'injection. On mesure ensuite le potentiel électrique autour de la zone (de la même manière que pour la PS) par rapport à une électrode de référence (Figure 36). On obtient une carte d'équipotentiels qui permet de délimiter avec une assez bonne précision la zone conductrice. Cette technique permet également d'avoir une idée :

- du pendage éventuel (en observant le gradient du potentiel, c'est-à-dire le resserrement plus ou moins fort des équipotentiels) ;
- de la direction d'extension ;
- de la continuité et de la connexion de la zone étudiée avec un autre corps conducteur.

Cette technique est très souvent utilisée en prospection minière, afin de délimiter un amas métallique par exemple et connaître les différentes connexions entre les filons.

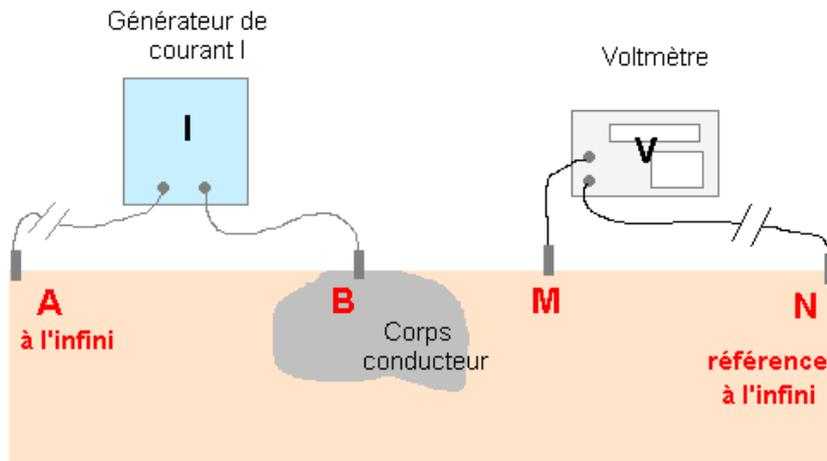


Figure 36 : Principe de la mise-à-la-masse : l'électrode d'injection B se trouve en surface (cas présenté) ou dans un forage si le corps conducteur se situe en profondeur.

À partir des potentiels mesurés, il est possible de déduire une carte de résistivité apparente.

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I}$$

avec V le potentiel mesuré lors de la mise-à-la-masse ;

I le courant injecté ;

r la distance entre l'électrode d'injection (B) et l'électrode de potentiel (M) (fig. 31).

Principe de l'Électrode enterrée

La méthode électrique dite « électrode enterrée » est une technique souvent utilisée dans le domaine minier. À la place d'injecter du courant uniquement en surface, une électrode est placée dans un forage, l'autre électrode d'injection est rejetée à l'infini. À la différence de la « mise-à-la-masse », l'électrode d'injection ne doit pas nécessairement se trouver dans un corps conducteur. Les mesures se font en surface en utilisant des dipôles de réception suivant deux directions perpendiculaires (Figure 37). En outre, si cette méthode est utilisée avec un équipement de polarisation provoquée, elle fournit simultanément la mesure de l'effet P.P. La mesure dans les deux directions permet d'obtenir une carte du champ électrique (**E**).

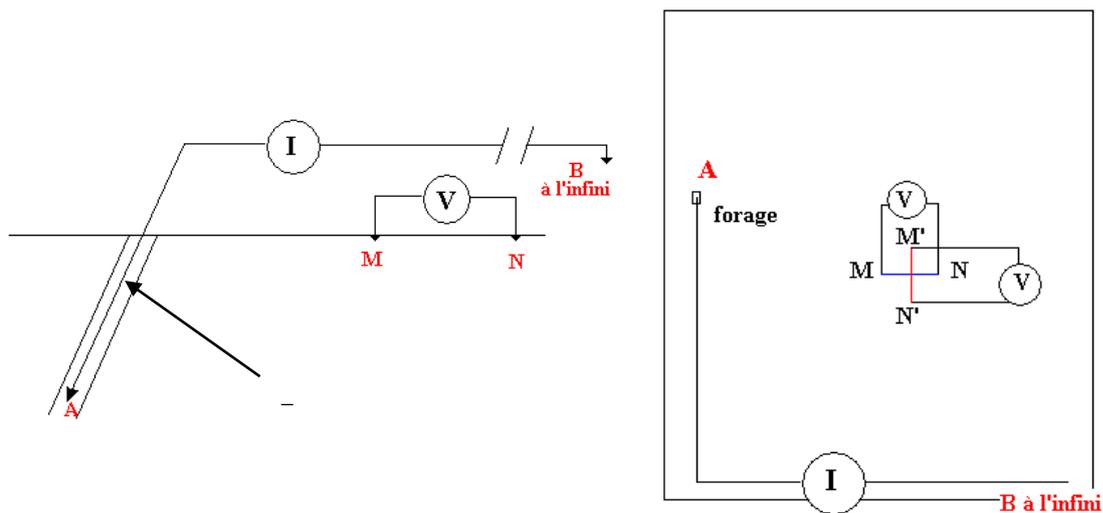


Figure 37 : Principe de la méthode électrique d'électrode enterrée. Vue de profil (gauche), vue de dessus (droite). L'électrode d'injection A est située dans le forage. Les mesures se font suivant deux directions perpendiculaires (dipôles MN et M'N').

En chaque point d'une grille prédéfinie, on mesure la différence de potentiels suivant les deux directions (x et y) à l'aide d'un résistivimètre et de deux électrodes impolarisables.

Si on considère un terrain homogène de résistivité ρ , deux électrodes d'injection A et B de coordonnées respectives (x_1, y_1, z_1) et (x_2, y_2, z_2) , on peut écrire que le potentiel en un point de la surface ayant pour coordonnées (x, y, z) est donnée par :

$$V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

avec $R_1 = PA = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}$

$$R_2 = PB = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}$$

Les composantes du champ électrique E_x et E_y en un point de la surface sont données par :

$$E_x = -\frac{dV}{dx} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{x - x_1}{R_1^3} - \frac{x - x_2}{R_2^3} \right)$$

$$E_y = -\frac{dV}{dy} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{y - y_1}{R_1^3} - \frac{y - y_2}{R_2^3} \right)$$

Le champ résultant E sera égal à

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \frac{\rho I}{K}$$

avec
$$K = \frac{2\pi}{\left(\left(\frac{(x-x_1)}{R_1^3} - \frac{(x-x_2)}{R_2^3} \right)^2 + \left(\frac{(y-y_1)}{R_1^3} - \frac{(y-y_2)}{R_2^3} \right)^2 \right)^{1/2}}$$

La carte de résistivité apparente générale (Figure 38) fait apparaître à nouveau les deux corps anomaux conducteurs R_1 et R_2 déjà observés lors de la mise-à-la-masse.

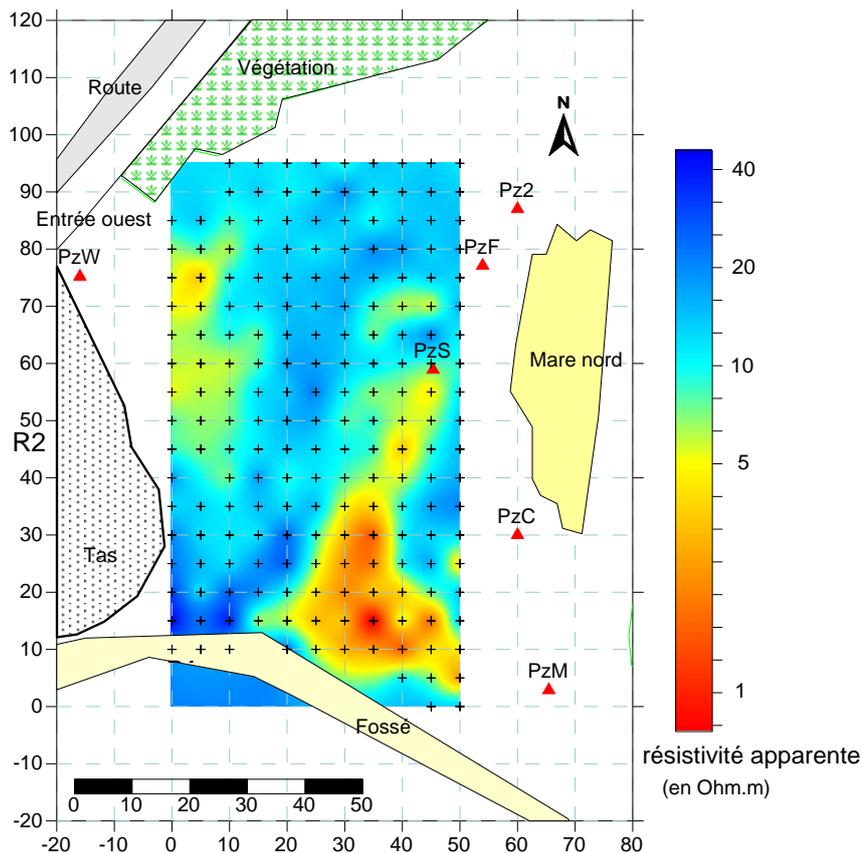


Figure 38 : Carte de résistivité apparente du site 2 réalisée par la méthode de l'électrode enterrée.

E. LES TECHNIQUES D'ACQUISITION 3D

Les méthodes électriques et la polarisation provoquée peuvent être mise en œuvre sur le terrain. Il existe désormais des logiciels de traitement et inversion de ces mesures afin de calculer la distribution 3D de résistivité, de chargeabilité ou effet de phase. Parmi les plus connus, on citera le logiciel Res3DInv de Geoelectrical (Malaisie, www.geoelectrical.com), ERTLAB de Geostrudi (It) et Multiplase Inc (USA) – www.ertlab.com et SensInv3D de geotomographie (www.geotomographie.de).

La mise en œuvre peut se faire sous différentes formes :

- Installation de panneaux (tomographies 2D) électriques suivant un maillage plus ou moins régulier, et acquisition « profil par profil » (Figure 39a),
- Installation d'un réseau régulier et mesures entre câbles, dites câbles croisés ou cross-cable (Figure 39b).
- Acquisition en C ou en L (Figure 39c).

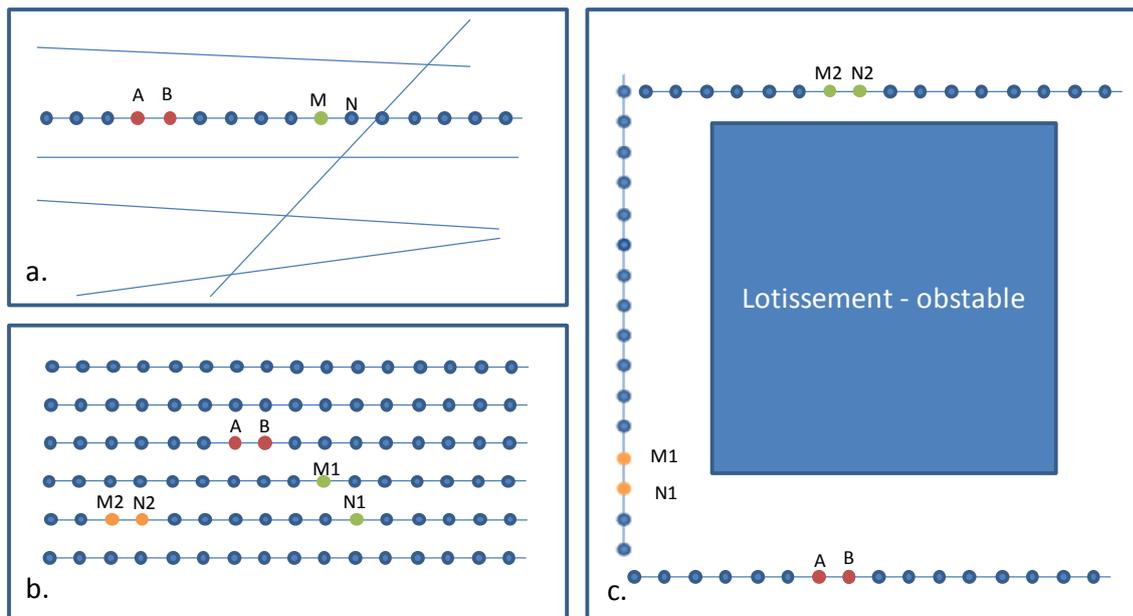


Figure 39 : techniques d'acquisition 3D

La configuration de mesure « câbles croisés » est la vraie acquisition 3D qui donnera le résultat prenant en compte les effets 3D. C'est donc la configuration idéale qu'il s'agit de mettre en œuvre autant que possible. Mais cette configuration est très coûteuse en équipement car il faut disposer de nombreuses flutes (câbles de mesure) et électrodes. Le multiplexeur du résistivimètre doit accepter un grand nombre d'entrée : typiquement il faut 8 profils de 48 m électrodes, soit 384 entrées sur le multiplexeur. A titre d'exemple, les résistivimètres modernes acceptent 96 voies ; il faut ensuite acheter autant d'extensions de multiplexeurs que nécessaires, soit 3 extensions ici. Les frais d'équipement sont quasiment triplés par rapport à une acquisition « profil par profil ». C'est pour cette raison que cette configuration n'a pas été utilisée dans le projet ATTENA.

L'acquisition « profil par profil » est la plus classique : on déploie une ligne d'électrodes le long d'un profil et on réalise une acquisition classique 2D. Puis on déplace la ligne d'électrodes suivant plusieurs profils afin de couvrir une surface. On traite alors les données de 2 manières possibles :

- Inversion 3D de l'ensemble des mesures réalisées en 2D. Cette inversion va tenir des effets 3D et permettra de mieux « focaliser » certains objets ponctuels. Néanmoins l'acquisition n'étant pas vraiment 3D, une partie des anomalies pourront être mal résolues. Mais cette méthode d'inversion 3D est rapidement coûteuse en place mémoire car le maillage grandit au cube de la taille de la surface couverte. Le temps de calcul devient aussi souvent inacceptable.
- Inversion 2D séparée de chaque tomographie, puis intégration de l'ensemble des données en 3D afin de reconstruire un bloc 3D. Cette méthode ne tient pas compte des effets 3D dus au mode d'acquisition. Mais elle présente l'avantage de permettre une intégration de nombreux profils sans avoir à réaliser une inversion 3D qui est très coûteuse en place mémoire et en temps d'inversion.

L'acquisition « profil à profil » a été mis en œuvre sur le site 1, le site 1bis et le site 2 (chapitre 5.3).

Enfin, de nouveaux concepts d'acquisition ont vu le jour récemment grâce à la mise au point de logiciels d'inversion 3D, tel ERTLAB, où le réseau d'électrodes n'est pas régulier. Ce type de configuration est adapté quand on travaille dans un environnement où il existe des obstacles ne permettant pas de disposer des profils réguliers, ou parce que les sources ou le panache de pollution se situe sous cet obstacle (par exemple des bâtiments). On peut alors disposer autour de l'obstacle en L ou en C, voire en O (tout autour de l'obstacle). L'acquisition se fait le long d'un même câble, et en câbles croisés afin d'ausculter sous l'obstacle. La résolution de l'inversion 3D n'est pas aussi bonne que si le réseau d'électrode était situé au-dessus de la zone à ausculter. Il y a une zone aveugle en surface jusqu'à une certaine profondeur qui dépend de la géométrie des câbles, de l'espacement entre les câbles et de l'espacement entre électrodes.

La profondeur de cette zone aveugle est plus faible dans les coins de jonction entre câbles qu'au coin opposé. Il faut donc que le panache ou la source se situe dans la gamme de profondeur accessible. A titre d'exemple, la zone aveugle est de l'ordre de 10 m pour un dispositif de 300 m de côté. Malgré la résolution plus faible et la zone aveugle, cette technique de mise en œuvre est la seule alternative quand on souhaite prospecter sous un secteur habité.

Cette technique d'acquisition a été mise en œuvre sur le site 2 autour d'un lotissement sous lequel se propage actuellement le panache de pollution HAP (chapitre 5.3).

F. LES METHODES ELECTRIQUES CAPACITIVES

Il existe une technique de mesure de la résistivité électrique qui n'utilisent pas d'électrodes métalliques pour l'injection du courant ou pour la mesure du potentiel : ce sont les méthodes électriques capacitives. C'est une technique entre la méthode électrique et la méthode électromagnétique mais qui est très utilisées sur les sites industriels car elle permet de mesurer la résistivité électrique sans percer le goudron et en ayant un effet faible des objets métalliques aériens. Plusieurs outils ont été développés pour la mesure de la résistivité par électrodes capacitives. Nous décrivons ici le principe du OhmMapper de Geometric.

La technique de mesure par électrode capacitive est basée sur le principe du rayonnement d'un champ électrique alternatif (ici à 14 kHz) par des antennes dipolaires composées de 2 câbles connectés à un boîtier émetteur ou récepteur (les tubes sur la photo ci-dessous). Exprimé autrement, les câbles des dipôles émetteur et récepteur forment l'armature d'un condensateur dont le sol représente l'autre armature. Le caoutchouc enrobant les câbles et l'air représentent le diélectrique du condensateur. En régime alternatif, le signal se propage d'une armature à l'autre et inversement : l'énergie électrique passe du câble émetteur au sol et du sol au câble récepteur.

L'émetteur situé à l'arrière est connecté aux récepteurs par une corde électriquement isolante. La valeur de l'intensité du courant injecté par l'émetteur est transmise aux récepteurs par liaison Bluetooth. Chaque récepteur mesure un potentiel électrique dont la valeur est envoyée au datalogger en même temps que l'intensité du courant électrique. Le datalogger stocke les données à une fréquence fixée par l'utilisateur (par exemple 1 mesure par seconde).

Pour chaque position d'émetteur, on a enregistré simultanément le signal électrique sur 4 positions de récepteur. Les dipôles récepteurs sont connectés les uns aux autres et transmettent le potentiel mesuré à l'enregistreur porté par l'opérateur. La distance entre l'émetteur et le récepteur, ainsi que la longueur des dipôles émetteur et récepteur détermine la profondeur d'investigation. Aussi en fonction de la cible recherchée, nous avons adapté la distance entre l'émetteur et les récepteurs et la longueur des dipôles. La longueur des dipôles a été de 5 m (2 x 2.5 m) ou de 10 m (2 x 5 m). La longueur de la corde séparant émetteur et récepteur était respectivement de 2.5 m et 5 m.



Figure 40 : Photos du OhmMapper en action, tiré par un quad ou par un opérateur. Le récepteur est situé en queue du dispositif et les 4 récepteurs en tête.

On désigne par n l'ordre du dispositif de mesure OhmMapper, qui est en configuration dipôle-dipôle (récepteur aligné sur l'émetteur, récepteur à une distance d de l'émetteur, la longueur a de l'émetteur égal à la longueur du récepteur). Si la corde qui sépare le dipôle émetteur du dipôle récepteur est de longueur l , la distance $d=l+a$ (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Le facteur $n = d/a = 1+l/a$. Pour $n=1$, c'est-à-dire pour une corde de longueur nulle, on sait que la profondeur d'investigation atteint $0.416 a$ (soit 2 m pour les dipôles de 5 m et 4 m pour les dipôles de 10 m). Pour $n=3$, la profondeur d'investigation est égale à a , soit 5 ou 10 m sur le dispositif.

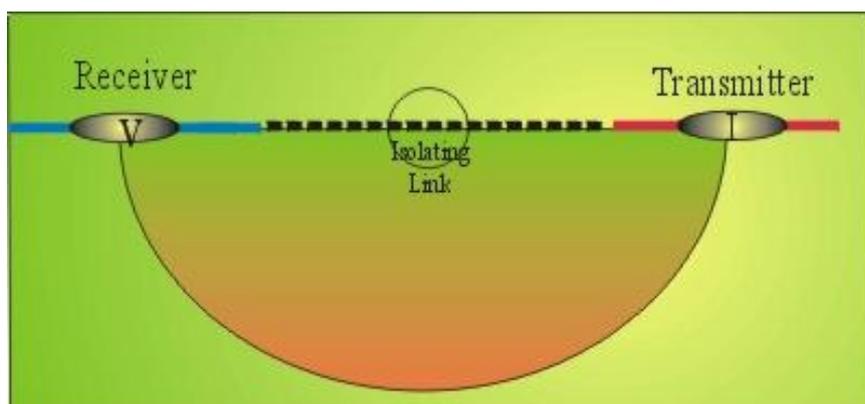


Figure 41 : Géométrie du ohmmapper. Le dipôle émetteur (en rouge) est de même longueur a que le dipôle récepteur (en bleu). La corde qui relie les 2 dipôles est de longueur l .

Le système OhmMapper permet de mesurer la résistivité électrique sur des terrains nus, herbeux ou béton et asphalte à condition que les dipôles ne soient pas décollés du sol de plus de 20 cm environ. Les mesures aberrantes (résistivités très élevées, par exemple supérieures à 5000 ohm.m ou trop faibles, par exemple inférieures à 5 ohm.m) ou présentant des contrastes locaux trop forts (supérieurs à 100 ohm.m /m) ont été systématiquement éliminés.

Le système peut être tiré par l'opérateur à une vitesse de 3 à 4 km/h (environ 1 m/s), permettant une acquisition d'une mesure par mètre environ.

Après filtrage, les données acquises peuvent être traitées de différentes manières :

- soit en représentation en coupe après inversion des mesures brutes afin de reconstruire la section verticale de résistivité vraie,
- soit sous forme de carte de résistivité établie pour un écartement fixe émetteur - récepteur:

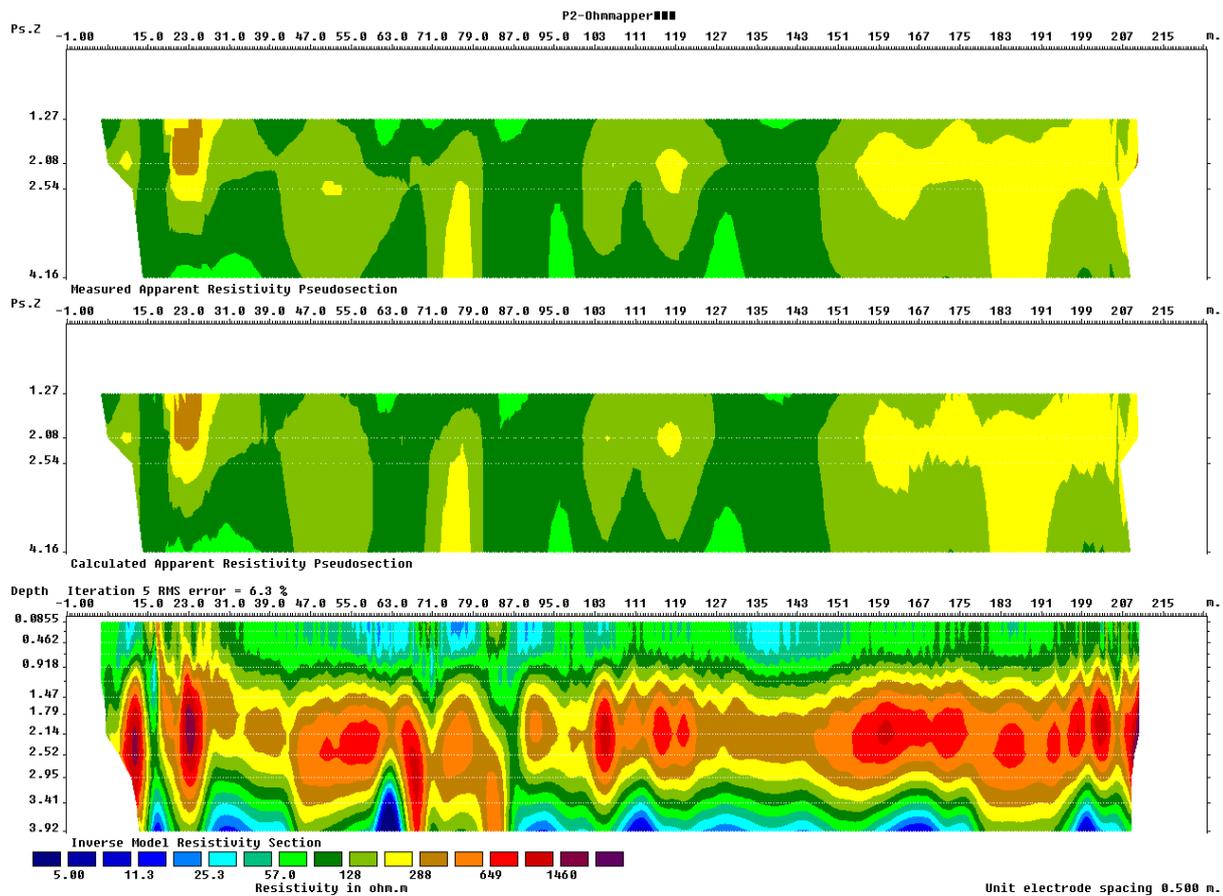


Figure 42 : exemple de levé géoelectrique avec un ohmmapper

Annexe 2

Le potentiel spontané

A. ORIGINE DU POTENTIEL SPONTANE

Le potentiel spontané (PS), aussi appelée polarisation spontanée, est une méthode géophysique passive, c'est à dire ne nécessitant pas de source artificielle. On mesure le potentiel électrique à l'aide d'un voltmètre à haute impédance d'entrée entre deux électrodes dites impolarisables, c'est à dire ne générant pas de courant parasite (Figure 1). L'une des électrodes est généralement fixe, et est considérée comme l'électrode de référence. La seconde électrode, dite mobile, est déplacée suivant une grille préétablie sur le terrain.

Les mesures peuvent être effectuées soit pour obtenir une cartographie statique de la distribution de potentiel électrique à un instant donné dans le sous-sol (utilisation de deux électrodes), soit ou pour effectuer un monitoring dans le temps des variations de ce potentiel en des points donnés (utilisation d'un réseau d'électrodes). L'amplitude des signaux électriques mesurés à la surface du sol varie de quelques mV à quelques V en valeur absolue, selon la nature du phénomène, sa profondeur et le contexte géologique.

L'origine de ces potentiels naturels est très variée mais sont tous le résultat de couplages entre des courants électriques et des forces dans le sous-sol. En fonction de leurs principes physiques d'origine, on les organise en 3 classes :

- les potentiels électrocinétiques,
- les potentiels électrochimiques
- les potentiels thermoélectriques

Le potentiel électrocinétique est lié à un couplage entre le flux hydraulique et le flux électrique. C'est-à-dire qu'une circulation de fluide dans un milieu poreux génère un signal électrique mesurable en surface. La différence de potentiel ΔV_c (potentiel électrocinétique) entre deux points présentant une différence de potentiel hydraulique ΔP d'un fluide de conductivité σ , de permittivité ε et de viscosité η dans une matrice de potentiel zêta ζ est tel que :

$$\Delta V_c = \frac{\zeta \varepsilon}{4\pi \eta \sigma} \Delta P$$

Les potentiels électrochimiques sont principalement des potentiels liés à des réactions d'oxydoréduction (électro-redox, Figure 44) ou à des phénomènes de diffusion ionique (électrodifusion). Les potentiels électro-redox ΔV_r apparaissent dans des zones où on observe des contrastes dans les réactions d'oxydation ou de réduction (zones créatrices ou demandeuses d'électrons, par exemple dégradation de polluants ou altération de sulfures), créant ainsi des dipôles électriques dont on mesure le potentiel en surface. Les potentiels d'électrodifusion ΔV_d s'observent dans des secteurs où il existe de forts contrastes de conductivité électrique du fluide interstitiel lié à des gradients de concentrations C_f de certaines espèces ioniques.

$$\Delta V_r = C_r \Delta E_h$$

$$\Delta V_d = C_d \Delta \ln(C_f)$$

Le coefficient de couplage électro-redox C_r est de l'ordre de 0.5 V/V, le coefficient de couplage d'électrodifusion C_d est de 14 mV par décade de concentration ionique.

Le potentiel électrothermique ΔV_T correspond à l'apparition d'un gradient de potentiel électrique dans une roche lorsque celle-ci est soumise à un gradient de température ΔT . C'est la diffusion thermique d'ions qui est responsable de l'apparition de cette différence de potentiel.

$$\Delta V_T = C_T \Delta T$$

En général, le coefficient de couplage électrothermique C_T se situe entre 0.1 et 1.5 mV/°C.

On voit que le potentiel spontané mesuré en surface est une somme de plusieurs phénomènes, d'origine hydrogéologique (écoulement des eaux), d'origine chimique ou d'origine thermique.



Figure 43 : Equipement de potentiel spontané : les électrodes, le multimètre, les câbles, eau, sel et bentonite pour améliorer le contact électrique des électrodes si nécessaire

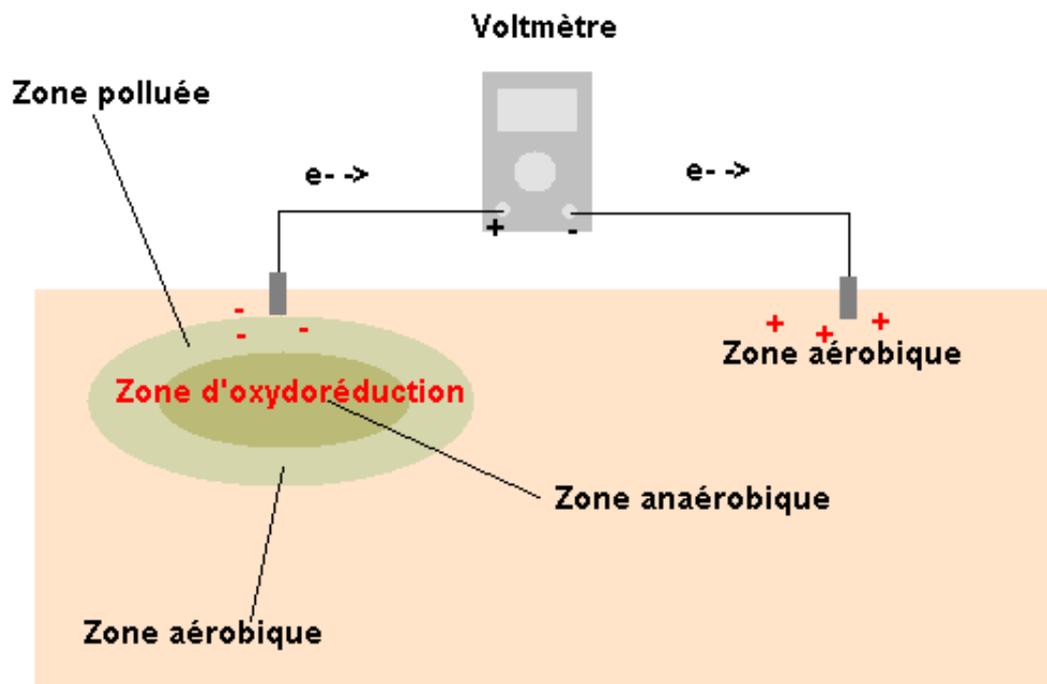


Figure 44 : Schéma présentant la méthode du potentiel spontané et l'effet électro-redox.

La mesure du potentiel électrique spontané est donc particulièrement intéressante car le champ électrique présent naturellement dans le sous-sol a une origine dynamique, correspondant à un déséquilibre hydraulique (i.e. écoulement) ou chimique (i.e. diffusion et/ou réactions chimiques) des eaux de subsurface. Ainsi, à toute variation de la vitesse d'écoulement, de la chimie ou de la thermodynamique des eaux souterraines, doit correspondre un changement du potentiel spontané (i.e. effet électrocinétique, électrodifusif, électrothermique, ...)

B. METHODE DE MESURE

Les mesures PS sont faciles et rapides à réaliser. Elles nécessitent au minimum une paire d'électrodes, un voltmètre et des câbles de préférence blindés. Cependant, afin de s'assurer d'une bonne qualité des données, il faut compter sur un matériel approprié et prendre certaines précautions lors des mesures.

Les électrodes employées doivent être non-polarisables pour éviter l'accumulation de charges à la surface de l'électrode métallique. Dans ce type d'électrode, le contact avec le sol ne s'effectue pas directement avec le métal mais par l'intermédiaire d'un électrolyte via une céramique ou un bois poreux. Ceci a l'avantage de réduire le contraste de résistivité électrique entre le sol et l'électrode, enlevant ainsi les problèmes de polarisation de l'électrode, gênant pour des mesures passives de PS. Afin de s'affranchir des potentiels parasites liés aux possibles fortes impédances de contact électrode/sol, il faut utiliser des voltmètres à forte impédance d'entrée. Cette impédance doit être d'au moins un ordre de grandeur supérieur à l'impédance du sous-sol entre les deux électrodes de mesure (M Ω).

La mesure est effectuée en plaçant les électrodes dans des trous de quelques dizaines de centimètres de profondeur afin de les rendre moins sensibles au bruit électromagnétique ambiant qui diminue rapidement avec la profondeur. Une boue de bentonite salée peut être ajoutée dans le trou afin d'améliorer le contact entre le sol et l'électrode, surtout sur un terrain très hétérogène en surface. Sur ces types de terrain, une mesure à un endroit donné n'est pas forcément représentative de la valeur du potentiel aux alentours. Il est préférable de multiplier les mesures et de calculer une moyenne et un écart-type. La prise de mesure doit durer environ 2 minutes le temps de laisser la mesure se stabiliser.

Avant de réaliser les mesures sur le site d'étude, il est nécessaire de mesurer le potentiel propre à chaque électrode. Pour cela, les deux électrodes sont placées dans le même trou de mesure, de préférence la station de base. La différence de potentiel est mesurée et sera retranchée aux mesures lors du traitement des données.

Une dernière précaution consiste à estimer la dérive temporelle des électrodes au cours de la prospection. Pour cela, il est recommandé d'effectuer plusieurs retours à la base qui consiste à mesurer la différence de potentiel entre l'électrode de mesure et l'électrode de référence à la station de base. Une correction linéaire de dérive temporelle sera ensuite réalisée sur les mesures.

Les mesures peuvent être effectuées pour obtenir une cartographie statique de la distribution de potentiel électrique dans le sous-sol (utilisation de deux électrodes), ou pour effectuer un monitoring dans le temps des variations de ce potentiel (utilisation d'un réseau d'électrodes, Figure 45). Pour réaliser une cartographie on utilise surtout la méthode dite de « base fixe » qui consiste à déplacer une électrode de mesure en gardant l'autre électrode dite électrode de base fixe à un endroit donné, si possible à l'extérieur de la zone d'étude. L'électrode mobile qui est déplacée mesure ainsi la distribution de potentiel électrique sur toute la surface d'investigation. Les mesures étant faites avec la même base, la lecture du potentiel est directe. Lorsque l'on arrive en bout du câble de mesure ou que les mesures deviennent instables, l'on peut alors déplacer la base fixe en la positionnant sur la dernière station de mesure de la ligne. Elle devient alors la nouvelle station de référence pour les mesures suivantes.

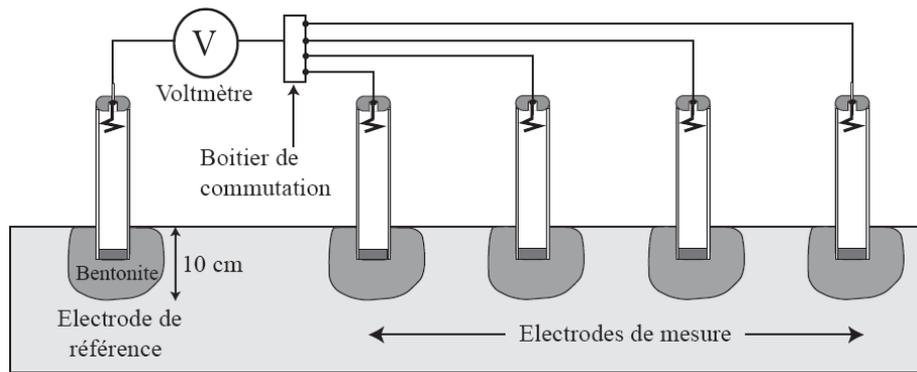


Figure 45. Illustration du principe de monitoring PS

Lors de la mise en place d'un réseau de suivi temporel des PS, les électrodes sont enterrées plus profondément (environ 50 cm de profondeur) afin de diminuer le bruit électromagnétique, de réduire le risque de dessiccation et de diminuer l'influence des variations de température. Chaque électrode est ensuite testée en mesurant sa résistance de contact par rapport à une autre (avec un voltmètre alternatif) puis elle est reliée à un réseau de câbles électriques relié à une centrale d'acquisition autonome.

Annexe 3

Les méthodes sismiques

A. METHODES SISMIQUES

- Sismique réfraction : La sismique réfraction utilise la propagation des ondes le long des interfaces entre les niveaux géologiques (Illustration 1a). Cette méthode convient en particulier à certaines applications de génie civil et d'hydrologie, notamment pour la détermination et la caractérisation du substratum en profondeur (Illustration 1b). Elle permet d'estimer les caractéristiques mécaniques des formations géologiques, la géométrie et le pendage des couches, la rippabilité des terrains.

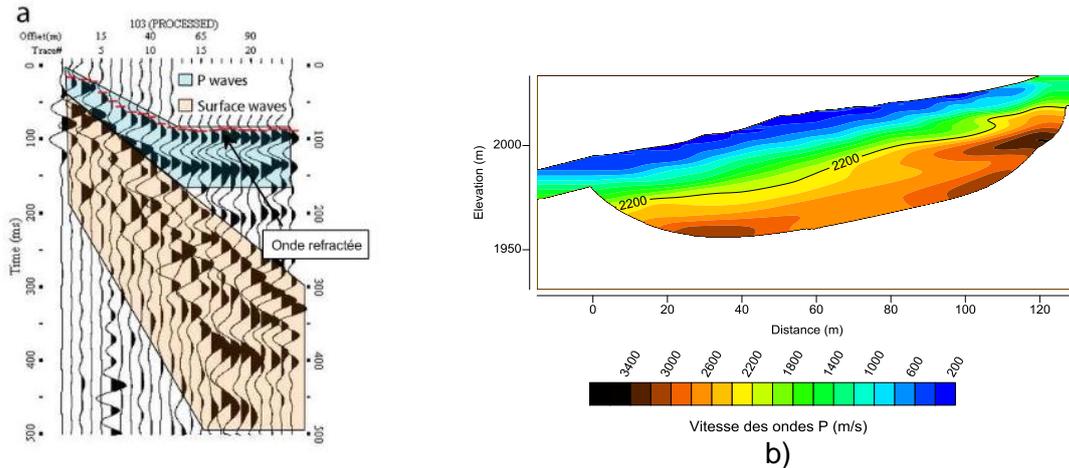


Figure 46: a) Exemple de tir sismique avec repérage de l'onde réfractée sur le substratum, b) Exemple de tomogramme onde P où l'on distingue le toit du substratum ($V_p=2200$ m/s).

- SHR : La sismique réflexion utilise la réflexion des ondes sismiques sur les interfaces entre plusieurs niveaux géologiques (contraste d'impédance entre deux formations géologiques différentes). Les ondes émises se propagent et sont en partie réfléchies à chaque limite de couche (Illustration. 2a). Le temps d'arrivée de la réflexion permet de situer la position d'une telle transition dans l'espace. Bénéficiant d'une résolution incomparable en profondeur, cette méthode s'applique à imager en détail les successions stratigraphiques, à caractériser des géométries et structures complexes (Illustration. 2b) (failles et fractures, graben, plis, diapir, failles actives).

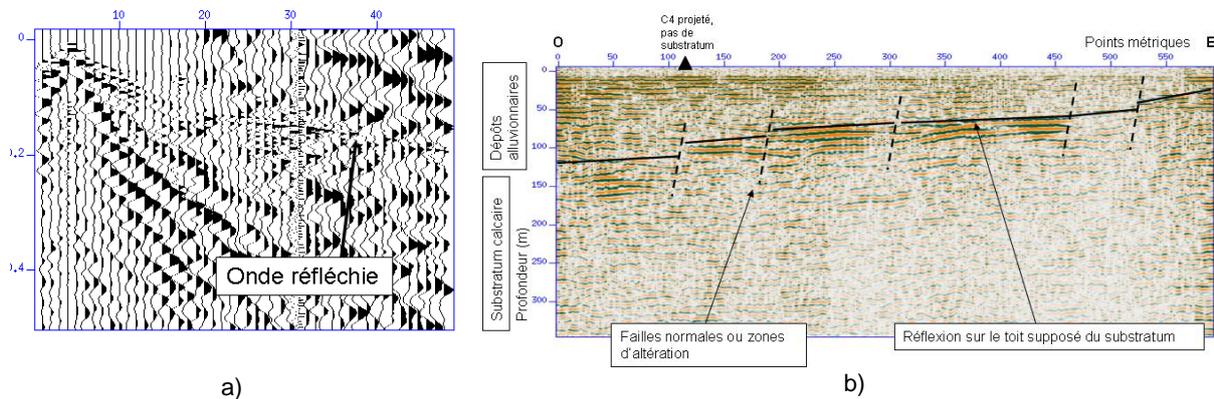


Figure 47 : a) Exemple de tir sismique avec repérage de l'onde réfléchie sur le substratum, b) Exemple de coupe sismique haute résolution (HR) et son interprétation où l'on distingue la succession des réflecteurs en profondeur et le toit du substratum.

- Multichannel Analysis of surface waves (MASW) : L'analyse de la dispersion des ondes de surface permet de déterminer le profil vertical des vitesses des ondes de cisaillement (Illustration 3a). La MASW est largement utilisée dans le domaine du génie civil pour estimer les caractéristiques mécaniques des sols et des terrains (Illustration 3b). La profondeur d'investigation moyenne est de 30m mais varie en fonction des paramètres mécaniques des terrains rencontrés.

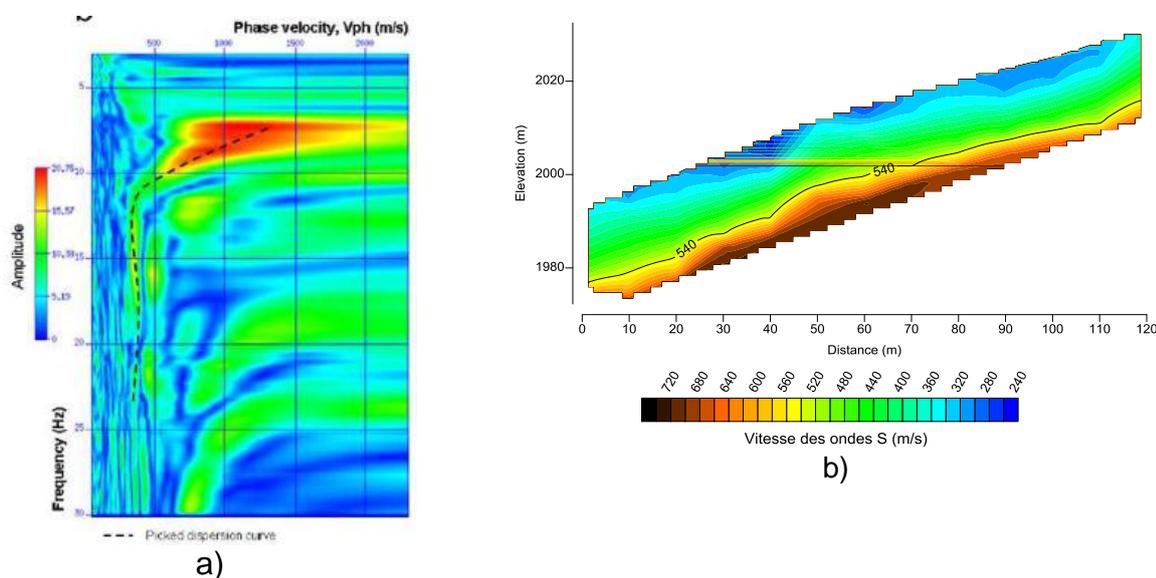


Figure 48 : a) Exemple de diagramme de dispersion des ondes de surface, b) Exemple de coupe MASW où l'on distingue le toit du substratum ($V_s=540$ m/s).

Simulation sismique

D'après la théorie de la réfraction des ondes sismique, l'offset minimal à partir duquel l'onde réfractée est identifiable sur les sismogrammes est donné par la relation :

$$X_{cross} = 2z \left[\frac{V_2 + V_1}{V_2 - V_1} \right]^{1/2} \quad (1)$$

Avec z la profondeur de l'interface et V_1 et V_2 les vitesses des ondes P dans les deux couches. Pour une profondeur de $z=35$ m et des vitesses d'onde P pour les latérites et le socle estimées à partir de données de la littérature, l'offset minimal calculé à partir de la relation (1) est de 100 m environ. Notre dispositif de 240 m est donc approprié à cette situation.

Afin de tester l'applicabilité de la méthode sismique réfraction dans un environnement similaire à celui des zones d'étude des sismogrammes synthétiques ont été calculés à partir d'un modèle à deux couches (Illustration 4a) représentant la succession des couches latéritiques et du socle sain à 35 m de profondeur :

Vitesse dans le profil d'altération

Latérites 600 - 800m/s

Saprolites (même rocheuses) vitesses intermédiaires 800 – 1000m/s

Roche saine >3000 - 5000m/s

Le sismogramme synthétique montre l'apparition de l'onde P réfractée sur le substratum à partir de l'offset 100 m (Illustration 4b). La configuration du dispositif choisi permet de pointer le réfracteur sur toute la longueur du dispositif avec une couverture suffisante et donc de répondre à la problématique posée.

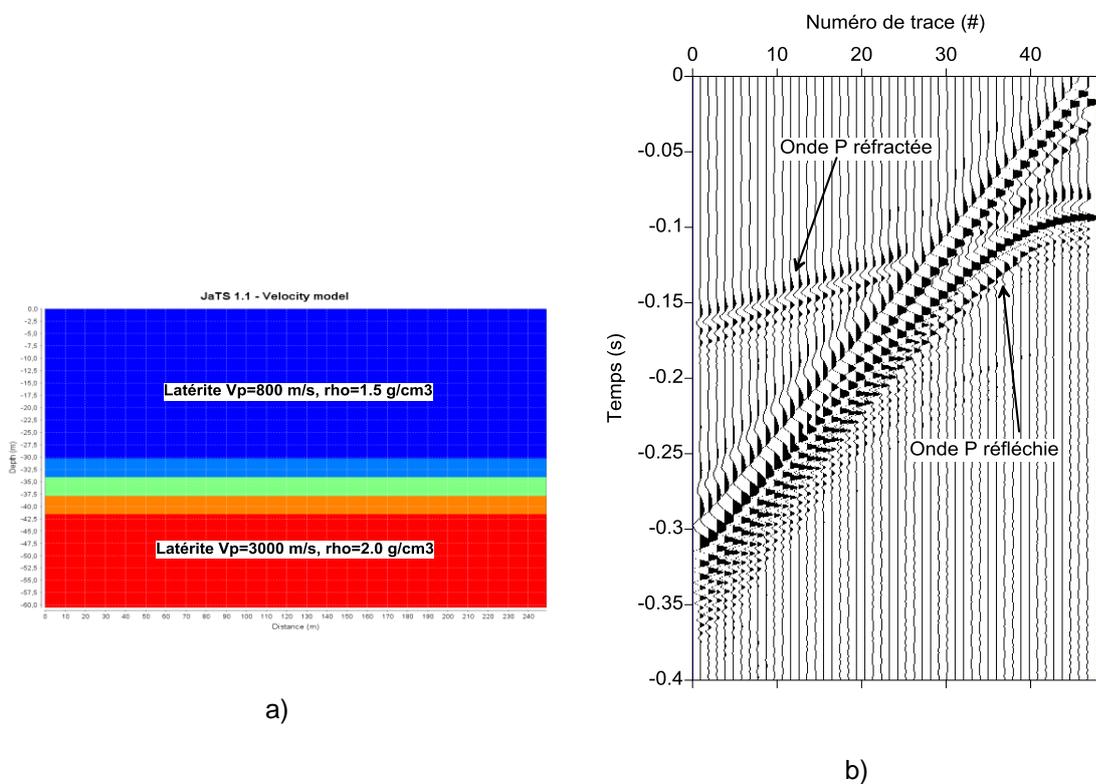


Figure 49 : a) modèle synthétique de vitesse des ondes P, b) Exemple de sismogramme obtenu pour la source 48 par simulation numérique

B. TRAITEMENT SISMIQUE

Les trois méthodes sismiques mentionnées précédemment seront traitées à partir du même jeu de données.

a. Traitement sismique réfraction

Les premiers temps d'arrivée de l'onde P sont mesurés à l'aide d'un algorithme de pointé automatique de manière à limiter l'erreur sur le pointé (mesure à +/- 5 ms). En résulte les courbes dromochroniques.

Lors de l'inversion des premiers temps d'arrivée de l'onde P, le misfit (en ms) entre les temps d'arrivée mesurés et les temps d'arrivée calculés est évalué.

On détermine ainsi les vitesses de l'onde P et les épaisseurs de couches sur une coupe en 2D.

Pour que ce modèle soit admis comme bon modèle, l'erreur d'ajustement (misfit) sur les temps d'arrivée doit être inférieure à l'erreur sur le pointé des temps d'arrivée.

Le traitement de la sismique réfraction se fera par inversion tomographique des temps de première arrivée de l'onde P à l'aide d'un algorithme WET (Wavepath Eikonal Traveltime Tomography ; Schuster et al., 1993, Geophysics). Le logiciel utilisé est RAYFRACT® Seismic Refraction & Borehole Tomography.

b. Traitement sismique réflexion HR

Si des réflexions des ondes apparaissent sur les sismogrammes, le traitement de la sismique HR se fera à l'aide du programme Seismic Unix (Center for Wave Phenomena CWP) selon les étapes présentées dans le tableau suivant :

Séquences de traitement	Descriptif de l'opération
Edition des traces	L'édition consiste à analyser chaque tir sismique de façon à juger de sa qualité et écarter les enregistrements trop bruités. Le bilan permet de savoir si l'opération de l'acquisition a rempli sa mission et si des cibles sont déjà visibles.
correction des amplitudes	Même en milieu homogène et élastique, le mouvement des particules s'atténue au cours de la propagation à cause de l'expansion des fronts d'ondes. C'est l'atténuation géométrique ou atténuation par divergence qu'il faut donc corriger.
Mise à jour de la géométrie	Cette séquence permet d'implémenter les positions de la source et des récepteurs dans les headers des fichiers de données sismiques.
Corrections statiques	Il s'agit des corrections de topographie ou de différence de temps de déclenchement de l'enregistrement.
Filtrage fréquentiel	Il permet de filtrer des fréquences "inutiles" dans la bande fréquentielle du tir sismique
Déconvolution	La déconvolution permet d'augmenter la résolution des sismogrammes et d'atténuer les réflexions multiples par

	une compression de l'ondelette de base
Mise en collection de point milieux communs	Le point milieu est le point situé au milieu du segment source-récepteur et correspond à l'endroit où l'onde réfléchiée enregistrée sur le tir sismique, rebondit à l'interface entre deux couches géologiques.
Correction dynamiques (NMO)	Les corrections dynamiques consistent à « horizontaliser » les hyperboles de réflexion sur les CMP afin de pouvoir effectuer la sommation à temps constant
Sommation en points milieux communs (stack)	Cette étape permet d'additionner l'énergie des différentes traces d'un même CMP pour faire ressortir la cible. La collection CMP devient donc une trace sommée.
Déconvolution FX	Cette déconvolution permet d'atténuer le bruit incohérent sur les sections stack
Migration temps	Cette opération permet de positionner les réflexions observées sur la coupe somme dans la position des réflecteurs qui leur ont donné naissance. Sur une coupe somme, on suppose que la source est confondue avec le récepteur.
Conversion temps profondeur	Cette opération permet de convertir la coupe somme en temps en une coupe sommes en profondeur à partir de la vitesse des ondes sismiques dans le milieu.

On détermine ainsi la succession des couches lithologique en profondeur sur une coupe en 2D.

c. Traitement MASW

Le traitement de la MASW sera fait à partir du schéma d'inversion de la dispersion des ondes de surface (SURF) décrit par Hermann, 1987.

Le programme « Dispsgy » calcule le diagramme de dispersion (variation de la vitesse de phase en fonction de la fréquence) dans le domaine c-f (vitesse-fréquence) (figure ci-dessous). Celui-ci est visualisé à l'aide des fonctions « suximage » ou « suximagedisp » du programme Seismic Unix (SU). C'est sur le diagramme de dispersion obtenu que la courbe de dispersion est saisie par l'opérateur par un pointage manuel des maxima d'amplitude. L'inversion des courbes de dispersion se fait à l'aide du programme SURF. Le résultat de l'inversion est un modèle de vitesse de cisaillement en 1D en fonction de la profondeur (Figure 50). Une coupe de vitesse de cisaillement en 2D est ainsi obtenue par interpolation de tous les modèles 1D le long du profil.

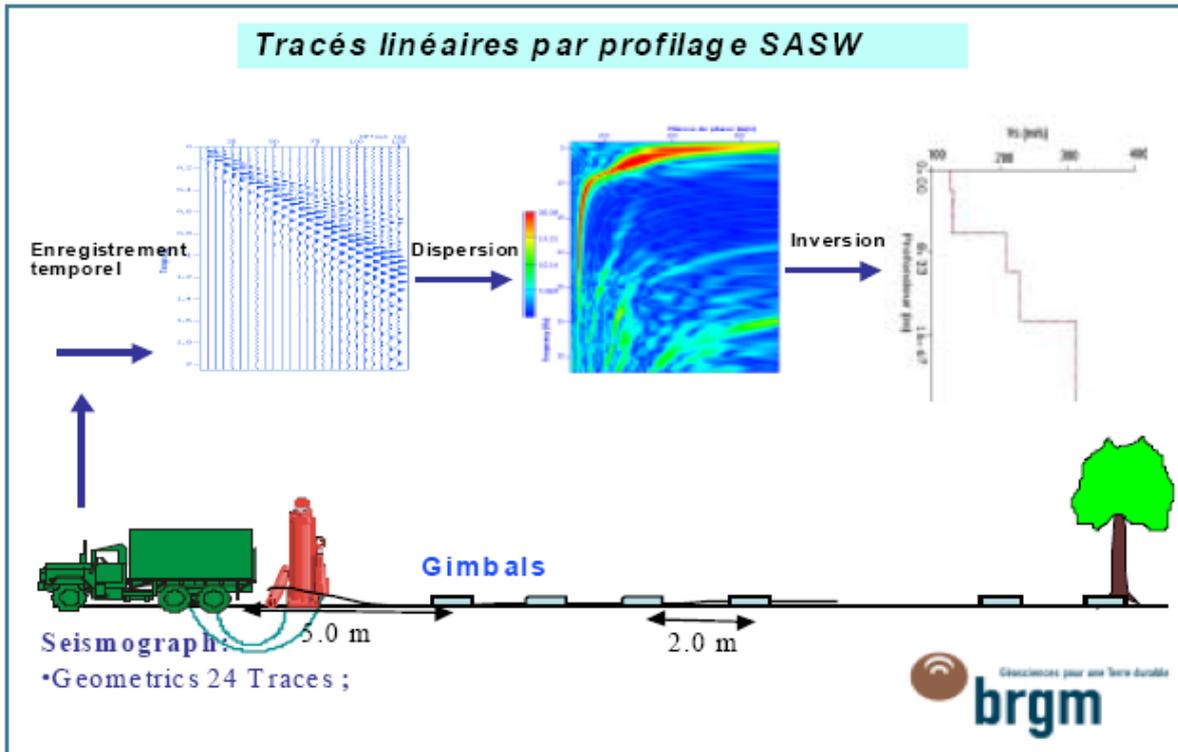


Figure 50 : schéma décrivant la méthodologie d'acquisition et traitement des données MASW (ou SASW)

Annexe 4

Résonance Magnétique Protonique

Les méthodes géophysiques traditionnelles d'exploration se fondent sur l'analyse d'anomalies de structure ou de paramètres physiques dépendant de différents facteurs qui ne sont pas eux-mêmes nécessairement liés de façon unique à la présence ou à l'absence d'eau dans le milieu étudié. Ainsi, par exemple, la conductivité électrique (inverse de la résistivité) des roches est proportionnelle à la conductivité électrique du fluide contenu et à une certaine puissance de la porosité (Archie, 1942), mais elle dépend également largement de la composition minéralogique et en particulier de la teneur en argile.

À la différence de ces méthodes géophysiques, l'information déduite d'un sondage de résonance magnétique protonique (RMP) est directement liée à l'eau contenue dans le sous-sol.

Dans le cadre d'un accord de collaboration entre ICKC (Russie) et le BRGM, un équipement, nommé « NUMIS », fondé sur ce principe a été développé par IRIS Instruments et commercialisé début 1997.

A. PRINCIPE DE LA METHODE

Schématiquement, le principe physique de la RMP repose sur le fait que les protons qui constituent les noyaux d'hydrogène des molécules d'eau, placés dans un champ magnétique H_0 (tel que celui de la terre ou artificiel), possèdent des moments magnétiques qui, à l'équilibre, sont alignés dans la direction de ce champ principal H_0 (Figure 51).

L'émission d'un champ magnétique perturbateur à une fréquence spécifique (dite fréquence de Larmor) modifie cet état d'équilibre naturel et provoque une précession de ces moments autour de la direction du champ magnétique naturel.

Après coupure du champ excitateur, et en retour à l'état d'équilibre initial, un champ magnétique de relaxation est émis par les protons et mesuré en surface, constituant ainsi la réponse RMP. L'amplitude de ce champ est d'autant plus intense que le nombre de protons entrés en résonance est grand, et donc que la teneur en eau est importante.

La fréquence spécifique à laquelle les protons sont excités est caractéristique de l'atome d'hydrogène et assure ainsi que la méthode est sélective. La très grande majorité des noyaux d'hydrogène présents dans le proche sous-sol sont ceux des molécules d'eau. Ceci implique que la méthode RMP renseigne spécifiquement et directement sur la présence ou l'absence d'eau dans le milieu étudié ainsi que sur les caractéristiques hydrodynamiques du milieu.

La constante de temps de relaxation longitudinale, T_1 , caractérise la relation entre les protons et leur environnement (spin-lattice relaxation time). Sa valeur reflète comment l'énergie magnétique des protons est échangée avec son environnement. Des valeurs élevées de T_1 correspondent à un faible couplage et un retour lent à l'équilibre. Des valeurs faibles de T_1 indiquent un couplage fort et un rapide retour à l'équilibre.

La constante de temps de relaxation transversale, T_2 , caractérise les échanges d'énergie entre les protons (spin-spin relaxation time) qui se manifestent dans un plan orthogonal à la direction du champ H_0 alors que T_1 correspond à la relaxation longitudinale, le long du champ H_0 . Dans un champ magnétique non parfaitement homogène, les protons subissent un déphasage qui diminue le temps de relaxation transversale qui est alors défini par une constante T_2^* .

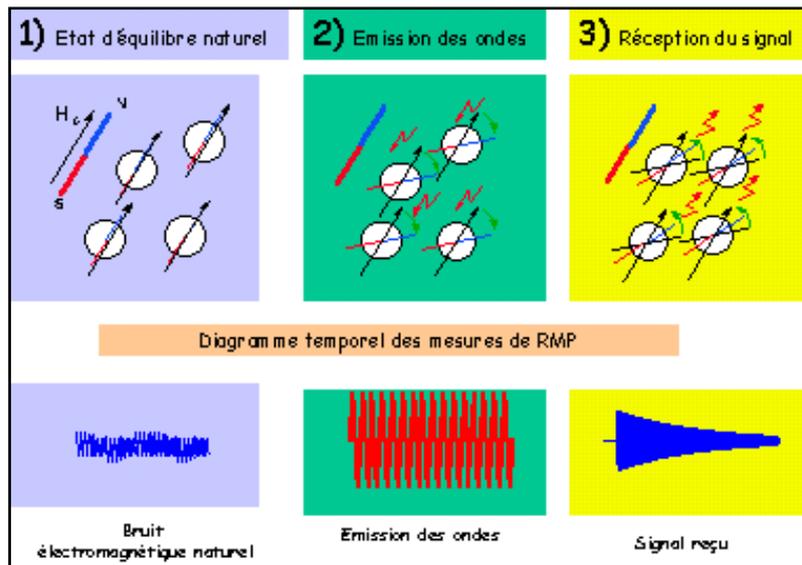


Figure 51 - Principe de mesure RMP.

Ces phénomènes de relaxation sont liés à la taille moyenne des pores contenant les molécules d'eau. Dans différents environnements géologiques impliquant différentes conditions de susceptibilité magnétique et de champ magnétique rémanent, l'effet de l'inhomogénéité du champ magnétique est différent. Ainsi T_2^* est en outre lié aux conditions géophysiques du réservoir.

B. L'EQUIPEMENT « NUMIS+ »

L'équipement NUMIS⁺ se compose d'un générateur de courant alternatif, une unité réceptrice, un détecteur de signal RMP, une antenne et un microprocesseur (Figure 52).

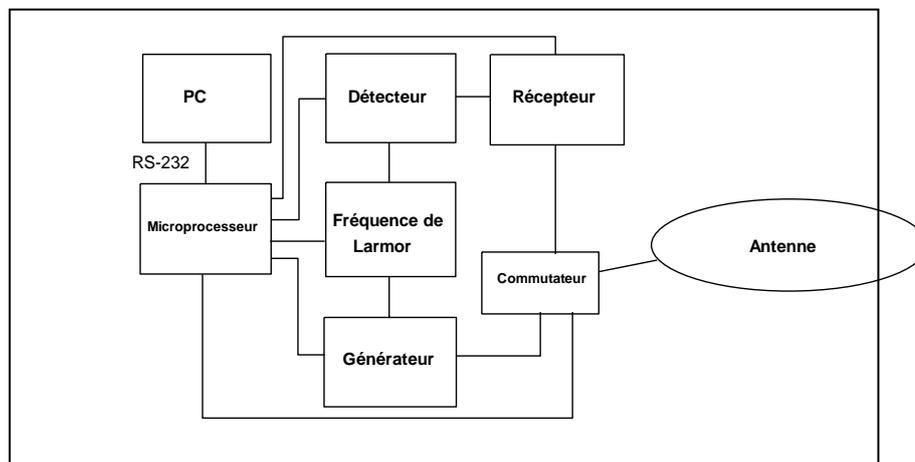


Figure 52 - Schéma fonctionnel du dispositif instrumental.

Le microprocesseur pilote la commutation de l'antenne du mode émission au mode réception. Il contrôle également la génération de la fréquence de référence égale à la fréquence de Larmor. Une enveloppe du signal provenant du détecteur synchrone est enregistrée par le microprocesseur sous forme digitale sur une durée programmable de 2 s au maximum. Un PC portable est utilisé pour le stockage sur disque et le traitement des données. Le poids total de l'ensemble est d'environ 100 kg (Figure 53).



Figure 53 - Équipement de Résonance Magnétique Protonique « NUMIS⁺ » sur site.

C. LE SONDAGE RMP

Pour réaliser un sondage RMP, une antenne est déployée sur le sol, généralement selon un cercle ayant un diamètre compris entre 20 et 150 m selon la profondeur des couches aquifères que l'on désire investiguer (par commodité d'installation, une antenne carrée est souvent utilisée à la place du cercle). Différentes géométries d'antennes sont prévues dans le logiciel d'acquisition de NUMIS, en particulier, l'antenne peut être déployée sous la forme d'un chiffre « huit » (composé de deux boucles de polarité opposée) afin d'améliorer le rapport signal/bruit (Trushkin *et al.*, 1994). Une impulsion $i(t)$ d'un courant alternatif est émise dans la boucle

$$I(t) = I_o \cos(\omega_o t), 0 < t \leq \tau \quad (1)$$

I_o et τ caractérisent respectivement l'amplitude et la durée de l'impulsion. La pulsation du courant émis ω_o correspond à la fréquence de Larmor, caractéristique des protons placés dans le champ géomagnétique $f_o = \gamma H_o / 2\pi$ avec H_o l'amplitude du champ géomagnétique et γ le facteur gyromagnétique des protons (constante physique caractéristique). La valeur de cette fréquence est déduite de l'amplitude du champ géomagnétique du lieu considéré.

L'impulsion de courant entraîne une précession des protons autour du champ géomagnétique, qui crée à son tour un champ magnétique alternatif qui est détecté, après coupure de l'injection de courant, par la même antenne que celle qui est utilisée pour l'émission. En pratique, l'enregistrement de la réponse RMP n'est possible qu'après un délai instrumental (dit « temps mort ») de 40 ms dans le cas de la version actuelle de NUMIS. Le processus d'acquisition d'une mesure est schématisé dans la figure 4.

En oscillant à la fréquence de Larmor, le signal RMP $e(t, q)$ (appelé aussi free induction decay, FID) a une enveloppe de forme exponentielle décroissante qui dépend du paramètre d'excitation $q = I_o \tau$:

$$e(t, q) = e_o(q) \exp(-t/T_2^*) \sin(\omega_o t + \varphi_o) \quad (2)$$

avec $e_o(q)$ l'amplitude initiale RMP, T_2^* le temps de relaxation spin-spin, et φ_o la phase du signal RMP.

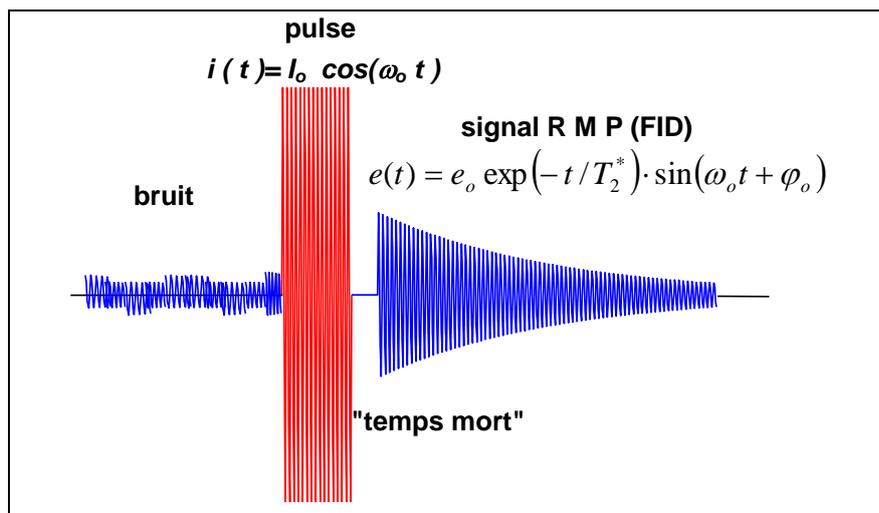


Figure 54 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception.

L'augmentation du paramètre q permet d'augmenter le volume investigué et un ensemble de mesures $e(t, q)$ pour des q croissants constitue un sondage RMP en profondeur.

Pour la mesure de T_1 une adaptation de la technique d'« inversion recovery » (Farrar *et al.*, 1971) a été développée. En injectant deux pulsations consécutives séparées par un délai ($\Delta t < T_1$) et mesurant la réponse RMP après chaque pulsation, il est possible de déduire la constante de relaxation T_1 à partir de la différence de réponse entre FID1 et FID2 (figure 5) tel que :

$$e_{0-FID2} / e_{0-FID1} = 1 - \exp(-\Delta t / T_1) \quad (3)$$

Avec e_{0-FID1} et e_{0-FID2} , les amplitudes à l'origine des signaux FID1 et FID2 respectivement et Δt le délai séparant les deux pulsations.

Les paramètres $e(q)$, $T_2^*(q)$, $T_1(q)$ et $\varphi_0(q)$ sont les paramètres significatifs qui renseignent sur l'eau contenue dans le sous-sol.

Les valeurs d'amplitudes peuvent varier de quelques dizaines de nanovolts à quelques microvolts suivant la teneur en eau du milieu considéré ; le seuil de détectabilité de NUMIS se situant à environ 5 nV. Différents facteurs influencent l'amplitude des signaux RMP tels que par exemple, la magnitude et l'inclinaison du champ géomagnétique, la conductivité électrique des terrains, la taille et la géométrie de l'antenne utilisée (Legchenko *et al.*, 1997).

Le volume investigué lors d'un sondage est défini comme un cylindre vertical de diamètre égal à environ 1,5 fois le diamètre de la boucle, centré sur celle-ci et de hauteur égale à ce diamètre.

La profondeur d'investigation maximale est de l'ordre de 150 m dans les conditions les plus favorables. Elle est diminuée lorsque la conductivité des terrains augmente et de manière significative pour des résistivités inférieures à 10 ohm.m.

La durée de réalisation d'un sondage RMP varie entre 2 h et 12 h selon les conditions de bruits électromagnétiques parasites d'origine naturelle ou anthropique.

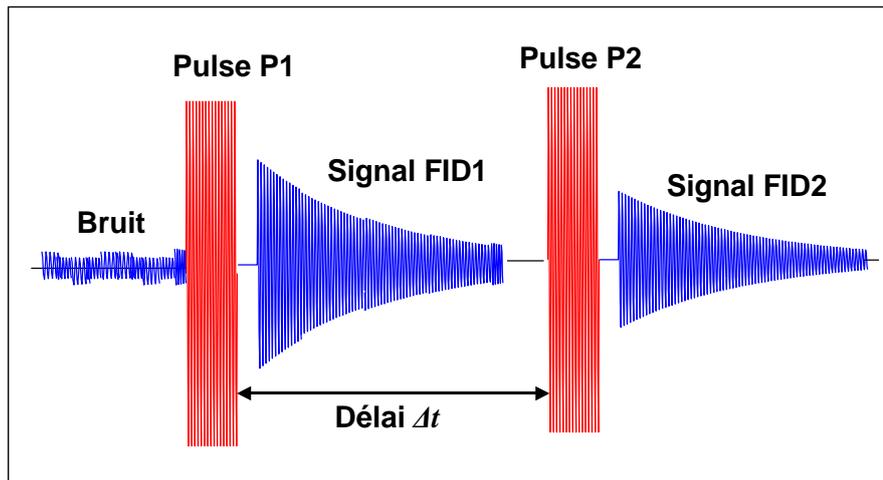


Figure 55 - Schéma en fonction du temps d'une séquence émission/réception à deux pulses pour la mesure de T_1 .

D. INTERPRÉTATION DES DONNÉES

a. Inversion des sondages RMP

Les algorithmes d'inversion des paramètres RMP sont décrits dans Legchenko *et al.* (1998). Ainsi, un signal RMP non nul est directement lié à la présence d'eau dans le sous-sol. De plus, des informations complémentaires peuvent être obtenues à partir des courbes brutes enregistrées :

- l'inversion des données **d'amplitude** $e_o(q)$ fournit la profondeur, l'épaisseur et la teneur en eau de chaque couche saturée en eau.

Le sous-sol est subdivisé en N couches homogènes dont la réponse est pondérée par la teneur en eau RMP W_{RMP} qui varie de 0 à 100%. C'est une teneur en eau volumique, $W=100\%$ correspond à un lac (par ex. sondage RMP sur lac gelé en surface) et $W=0\%$ correspond à un niveau sec.

Mais cette définition ne tient pas compte de la relaxation pendant le temps mort instrumental et une partie de l'eau dont les constantes de temps de relaxation sont faibles n'est pas prise en compte dans la mesure RMP.

L'expérience d'application des sondages RMP (Schirov, *et al.*, 1991) a montré que dans bien des cas le temps de décroissance, T_2^* de l'eau liée est inférieur à 20-30 ms et que celui de l'eau libre est compris entre 30 et 1 000 ms. Comme les caractéristiques des équipements de mesures actuels ne permettent pas de mesurer des temps inférieurs à 30 ms, il est généralement admis que la teneur en eau RMP correspond à la teneur volumique en eau libre. Selon ces considérations, si l'eau dans les pores non connectés et dans les pores en cul de sac peut être négligée, la teneur en eau RMP serait une estimation de la porosité cinématique. Si la capacité de rétention est négligeable, la teneur en eau RMP serait une bonne estimation de la teneur en eau gravitaire.

La constante T_2^* dépend du contexte géologique et dans certains milieux particulièrement peu magnétiques, tel que la craie ou les calcaires, les temps de décroissance T_2^* de l'eau capillaire peuvent être proches voire supérieurs à 40 ms. Dans la zone non saturée, la teneur en eau RMP correspondrait à l'eau gravitaire et à tout ou partie de l'eau capillaire. L'eau de la zone non saturée pourrait ainsi être observée par RMP.

Il faut aussi ajouter que dans des conditions de milieux, au contraire, très magnétiques, le temps de décroissance T_2^* de l'eau libre peut être réduit de telle manière qu'une partie seulement de l'eau libre est observée par RMP voire pas du tout. La méthode est alors mise en défaut.

- les **constantes de temps de relaxation** (T_1 ou T_2 représentées ici par T) sont reliées à la distance moyenne entre une molécule d'eau et la phase solide (Shirov *et al.*, 1991 ; Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997) et peuvent être décrites en fonction des caractéristiques des pores (en milieu saturé) tel que :

$$1/T = (1/T_a) + (\rho S / V) \quad (4)$$

avec T_a la constante de temps décrivant la décroissance en milieu liquide, V et S le volume et la surface des pores et ρ la capacité de la surface à induire la relaxation des protons autrement appelée indice de relaxation.

Mais T_2^* dépend aussi des hétérogénéités du champ géomagnétique ΔH_0 tel que :

$$1/T_2^* = (1/T_{2a}) + (\rho S / V) + \gamma(\Delta H_0 / 2) \quad (5)$$

avec T_{2a} la constante de temps transversale en milieu liquide et γ le facteur gyromagnétique des protons.

Comme les hétérogénéités du champ géomagnétique dépendent des conditions géologiques, le temps de relaxation T_2^* est moins fiable que T_1 pour caractériser la taille moyenne des pores dans différents milieux. T_1 lui est généralement préféré pour l'estimation des caractéristiques hydrodynamiques des aquifères.

- la **phase** $\phi_0(q)$ renseigne sur la distribution des conductivités électriques du sous-sol. Pour une estimation précise des profondeurs des différents aquifères, cette information doit être prise en compte lors de l'étape d'inversion des données RMP, quand les résistivités sont inférieures à 10 ohm-m.

Le problème inverse des sondages RMP est mal conditionné. Il n'a pas de solution unique. La capacité de résolution de la méthode est discutée par Legchenko et Shushakov (1998). Un exemple d'inversion de données théoriques est présenté à la figure 6.

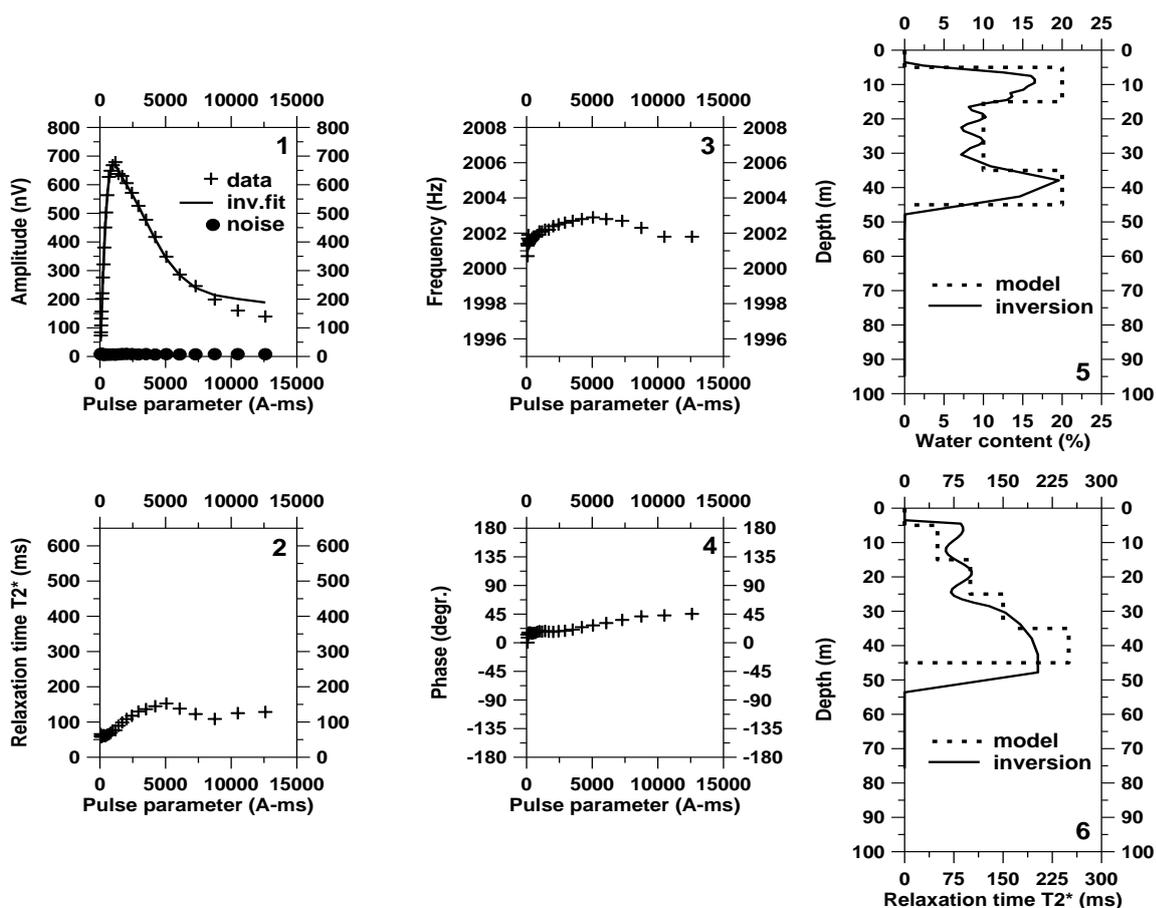


Figure 56 - Résultats d'inversion des données théoriques.

Le signal théorique a été calculé à partir du modèle du tableau 1 :

Profondeur		Teneur en eau	T_2^*
de (m)	à (m)	(%)	(ms)
5	15	20	50
15	25	10	100
25	35	10	150
35	45	20	250

Tableau 3 - Paramètres du modèle.

b. Caractérisation hydrodynamique des aquifères par RMP

En référence à l'expérience acquise en diagraphies de Résonance Magnétique Nucléaire (Chang *et al.*, 1997 ; Kenyon, 1997), la perméabilité peut être liée aux paramètres RMP en utilisant une relation empirique telle que :

$$K = C_k W^a T_I^b \quad (6)$$

où K est la perméabilité, W est la teneur en eau RMP, T_I est la constante de temps de décroissance, C_k et a , b sont des constantes définies empiriquement. En diagraphies RMN, différentes valeurs a , b sont utilisées. Sur la base de mesures réalisées avec l'équipement NUMIS au droit de forages de caractéristiques hydrogéologiques connues réalisés dans différents milieux, les valeurs $a = 1$, $b = 2$ ont été retenues.

Pour des roches différentes, les constantes empiriques doivent être modifiées et des relations mieux adaptées peuvent être définies.

La définition des paramètres empiriques adaptés aux différents environnements est un travail de longue haleine mais déjà dans cette phase initiale de développement, NUMIS peut être utilisé efficacement pour définir les perméabilités des aquifères au moins en valeurs relatives.

Le résultat d'un sondage RMP mesuré avec l'équipement NUMIS est présenté généralement avec les informations suivantes :

- 1) distribution verticale de la teneur en eau ;
- 2) distribution verticale du temps de décroissance T_2^* ;
- 3) distribution verticale du temps de décroissance T_I ;
- 4) distribution verticale de la perméabilité K .

Le BRGM et ses partenaires ont développés dans le bassin parisien d'abord puis dans différents environnements hydrogéologiques une méthodologie empirique basée sur la comparaison des résultats RMP avec les pompages d'essais, visant à définir les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères sur la base des résultats RMP. Des fonctions de transferts sont ainsi établies entre la transmissivité obtenue en résultat des pompages d'essai et une transmissivité RMP calculée comme la combinaison des paramètres RMP teneur en eau, W et temps de décroissance T_n (figure 6 et 7). Les transmissivités RMP sont d'autant plus fiables que des étalonnages auront été établis localement avec des pompages d'essais réalisés dans le réservoir hydrogéologique d'intérêt. En l'absence de calage local, les fonctions transferts définies dans des formations hydrogéologiques similaires peuvent être utilisées avec une incertitude acceptable.

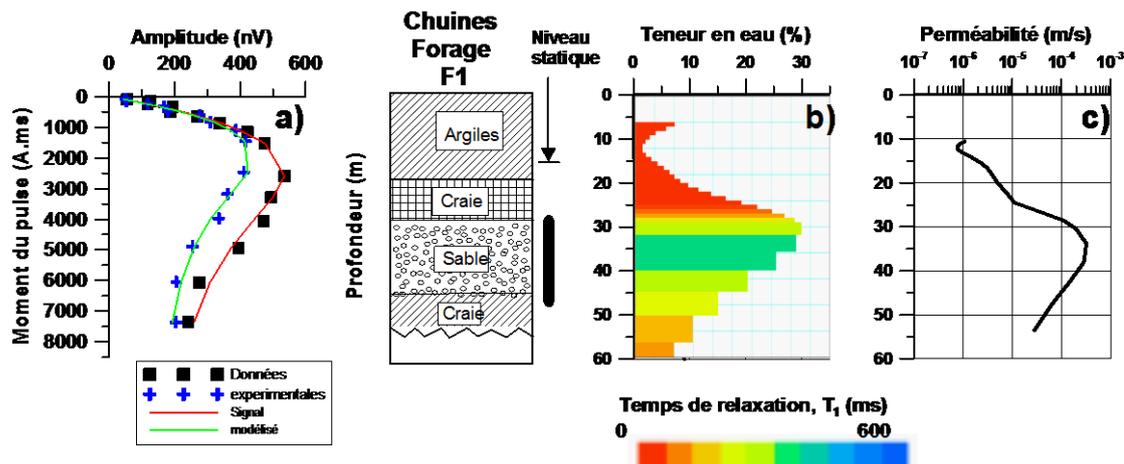


Figure 57 : Exemple de Sondage RMP en milieu sédimentaire. a) courbes de sondage ; b) log vertical de teneur en eau, W et de temps de décroissance, T_1 obtenu par inversion du sondage RMP; c) log de perméabilité RMP obtenue par combinaison des paramètres RMP W et T_1 .

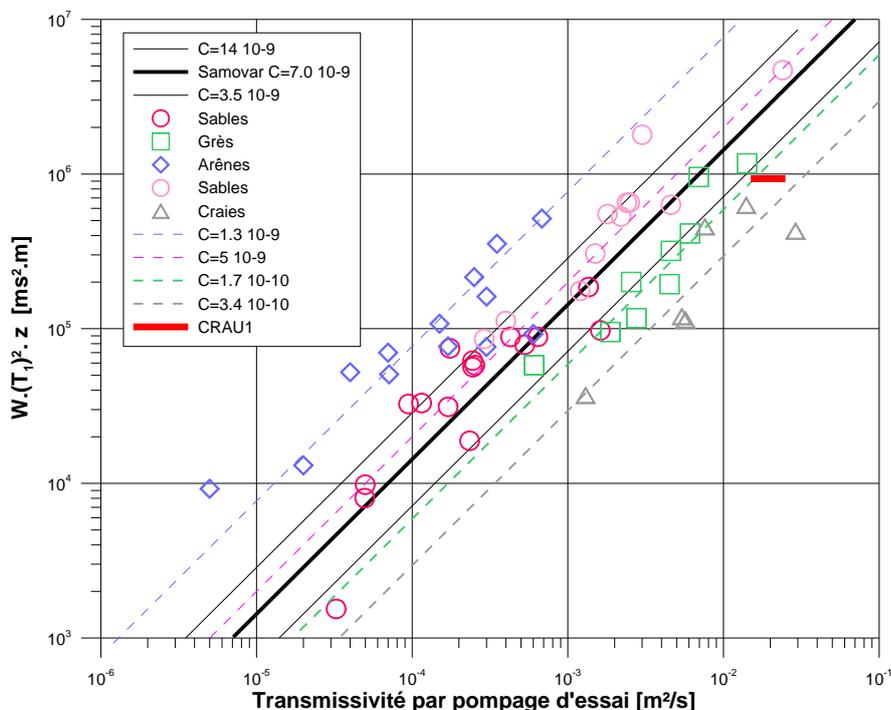


Figure 58 : Fonctions de transfert entre résultats RMP et transmissivité par pompage obtenues dans différents environnements géologiques (modifié d'après Boucher 2007, Estimation des propriétés hydrodynamique des aquifères par RMP, Thèse de l'Université d'Orléans).

E. CONDITIONS ET LIMITES D'APPLICATION DE LA METHODE RMP

Les sondages RMP sont souvent utilisés en complément des mesures électriques et électromagnétiques, pour estimer les propriétés hydrodynamiques sur les zones d'intérêt révélées par ces méthodes à plus grand rendement. Les sondages RMP permettent généralement de lever les ambiguïtés de l'interprétation des résistivités électriques : distinguer, par exemple, les anomalies conductrices causées par une teneur en argile élevées et généralement non aquifères de celles causées par une teneur eau de formation conductrice potentiellement aquifères.

La méthode RMP mesure de très faibles signaux (de l'ordre du nV) et est sensible à toutes les sources de bruit électromagnétique. En conséquence, il convient de limiter les zones d'investigation aux zones rurales, à plus de 750 m des lignes électriques Haute Tension et plus de 300 m des lignes Moyenne Tension, à l'écart des clôtures électriques, des transformateurs et des pompes en fonctionnement.

Dans le contexte de nappes superposées, la réponse RMP de la nappe supérieure peut interférer avec les signaux de la nappe inférieure et augmenter l'incertitude sur les résultats.

L'ADEME EN BREF

L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) est un établissement public sous la triple tutelle du ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie. Elle participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable.

Afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale, l'agence met à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, ses capacités d'expertise et de conseil. Elle aide en outre au financement de projets, de la recherche à la mise en œuvre et ce, dans les domaines suivants : la gestion des déchets, la préservation des sols, l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, la qualité de l'air et la lutte contre le bruit.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr

ABOUT ADEME

The French Environment and Energy Management Agency (ADEME) is a public agency under the joint authority of the Ministry for Ecology, Sustainable Development, Transport and Housing, the Ministry for Higher Education and Research, and the Ministry for Economy, Finance and Industry. The agency is active in the implementation of public policy in the areas of the environment, energy and sustainable development.

ADEME provides expertise and advisory services to businesses, local authorities and communities, government bodies and the public at large, to enable them to establish and consolidate their environmental action. As part of this work the agency helps finance projects, from research to implementation, in the areas of waste management, soil conservation, energy efficiency and renewable energy, air quality and noise abatement.

www.ademe.fr.



ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406 | 49004 Angers Cedex 01

www.ademe.fr