

**Investigations géophysiques pour
le contrôle de la salinité de la nappe
phréatique d'Alsace (68)
au droit du bassin potassique**
Aval des terrils Amélie - campagne 2014

Rapport final
BRGM/RP-63532-FR
Juin 2014

Rapport final

BRGM/RP-63532-FR

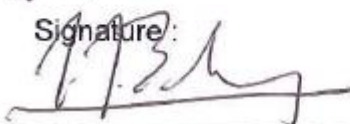
Juin 2014

**Investigations géophysiques pour
le contrôle de la salinité de la nappe
phréatique d'Alsace (68)
au droit du bassin potassique
Aval des terrils Amélie - campagne 2014**
Rapport final

BRGM/RP-63532-FR
Juin 2014

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 14RIS2104

F. Mathieu, R. Barbier

Vérificateur :
Nom : J.M. Baltassat
Date : 21/08/2014
Signature : 

Approbateur :
Nom : Gaël Bellenfant
Date : 25/07/2014
Signature : 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Avertissement

*Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur **GEODERIS**, en 3 exemplaires conformément au cahier des charges.*

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait, et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Mots-clés : Géophysique, méthodes électriques, salinité, nappe phréatique d'Alsace, bassin potassique, GÉODÉRIS, Alsace (68).

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Mathieu F., Barbier R. (2014) - Investigations géophysiques pour le contrôle de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace (68) au droit du bassin potassique. Aval des terrils Amélie - campagne 2014. Rapport final. BRGM/RP-63532-FR, 165 p., 58 ill., 3 tabl., 6 ann., 10 pl.h.t

Synthèse

LE GIP GEODERIS a été mandaté par la DREAL Alsace pour effectuer une étude relative à l'optimisation du réseau de dépollution et au suivi de la contamination par des chlorures de la nappe alluviale du Rhin dans le secteur des Mines de Potasse d'Alsace.

Dans le cadre de cette étude, GEODERIS a demandé au BRGM (unité DRP/RAI) de réaliser des investigations géophysiques par la méthode du panneau électrique en aval des terrils Amélie.

Les objectifs de cette étude géophysique sont les suivants :

- délimitation spatiale des zones polluées par les chlorures ;
- identification d'une éventuelle stratification des chlorures selon la profondeur ;
- essais de corrélation entre la résistivité électrique et la teneur en chlorure.

Pour répondre à ces différents objectifs, trois panneaux électriques situés sur un transect d'environ 4,6 km ont été réalisés avec deux configurations d'électrodes, dipôle-dipôle et Wenner-Schlumberger, permettant d'atteindre une profondeur d'investigation de l'ordre de 150 m. Ce transect recoupe, à environ 1,5 km en aval des terrils Amélie, la partie septentrionale de la langue salée est.

Les résultats de cette étude géophysique ont permis au niveau de la zone d'étude d'améliorer la connaissance tant d'un point de vue géologique et hydrogéologique que d'un point de vue pollution de la nappe.

D'un point de vue géologique et hydrogéologique, les résultats sont les suivants :

- confirmation de la présence de deux aquifères superposés, d'origine alluvionnaire, séparés par un horizon semi-perméable de faible épaisseur qui contrairement aux informations issues de BRAR, semble être relativement continu ;
- confirmation de la relative précision, au niveau du secteur d'étude, de la cote du toit du substratum issue des données BRAR sauf dans la partie nord du profil P3, où une certaine divergence entre la cote issue de l'interprétation géophysique et la cote provenant des données BRAR a été mise en évidence. La profondeur de cette interface au niveau du transect géophysique est comprise entre 25 et 35 m ;
- mise en évidence d'une structure de type diapir de sel présente dans l'axe d'un paléo-thalweg creusé dans le substratum marneux. Ce dôme de sel est également positionné dans l'axe de la langue salée issue des terrils Amélie mais à une profondeur plus importante. L'apex de ce diapir se situerait à une profondeur de l'ordre de 45 m et serait coiffé d'une nappe salée.

D'un point de vue pollution par les chlorures, les résultats de l'étude géophysique sont les suivants :

- aucune anomalie de conductivité de l'eau n'a été mise en évidence dans l'aquifère supérieur. La concentration moyenne en chlorure serait de l'ordre de 150 mg/l ce qui est quand même deux fois plus élevé que la concentration normale qui est, pour l'aquifère alluvial du Rhin, de l'ordre de 75 mg/l ;
- l'horizon semi-perméable qui sépare l'aquifère supérieur et l'aquifère inférieur est localement caractérisé par une résistivité très faible qui pourrait être en relation avec des imprégnations résiduelles de saumure piégée dans les argiles lors de son passage de l'aquifère supérieur vers l'aquifère inférieur ;
- mise en évidence d'une zone à forte concentration en chlorure (11 000 à 17 000 mg/l) dans l'aquifère inférieur. Les caractéristiques géométriques de cette langue salée sont : largeur 750 m, puissance maximale 15 m. D'après la carte du toit du substratum (données BRAR), cette langue salée occuperait le fond d'un paléo-chenal creusé dans le substratum. Ce paléo-chenal aurait une direction E-W et passerait à l'extrémité nord du terri Amélie ;
- mise en évidence, toujours dans l'aquifère inférieur, d'une deuxième langue salée dont la concentration en chlorure est moins importante (2 000 à 3 000 mg/l). Elle est située sur la bordure sud de la première langue salée (flanc sud du paléo-chenal). Ces caractéristiques géométriques sont les suivantes : largeur 250 m, puissance maximale 5 à 6 m ;
- dans l'aquifère inférieur et en dehors des deux langues salées, la concentration moyenne en chlorure serait de l'ordre de 150 mg/l c'est-à-dire du même ordre de grandeur que dans l'aquifère supérieur ;
- les variations de résistivité du substratum marneux (plus conducteur au sud qu'au nord) pourraient être en relation avec la présence actuelle ou historique de la branches méridionale (terril Joseph Else) et de la branche septentrionale (Terri Amélie) de la langue salée est. En effet, dans la partie sud, les eaux saumâtres présentent dans l'aquifère inférieur ont pu imprégner la partie sommitale du substratum caractérisée par une faible résistivité alors que dans la partie nord, où historiquement il n'y a jamais eu de pollution par les chlorures, la résistivité du substratum est plus élevée.

Les investigations géophysiques effectuées en aval des terrils Amélie ont permis de répondre sans ambiguïté au premier objectif de l'étude (délimitation spatiale). Par contre, en ce qui concerne les deux autres objectifs, les résultats sont plus globaux. Le manque de résolution de la méthode électrique compte tenu de la taille des cibles et de leur profondeur ainsi que le manque d'informations précises concernant les paramètres hydrogéologiques des aquifères concernés ne permettent pas d'aller plus avant dans le détail.

Les recommandations pour la réalisation d'éventuelles futures campagnes géophysiques pourraient être les suivantes :

- présence sur le profil électrique de un ou plusieurs sondages ayant atteint avec certitude le toit du substratum, afin de valider la carte de toit du substratum issue

des données BRAR sur l'ensemble du secteur d'étude. Cette connaissance indispensable pour l'interprétation en termes de pollution par les chlorures (discrimination entre les faibles résistivités du substratum et les faibles résistivités de l'aquifère pollué) permettra également de mieux fixer la profondeur d'investigation optimale des panneaux électriques ;

- mesures de la conductivité de l'eau et des formations intersectées dans les piézomètres situés à proximité des panneaux électriques en début d'intervention ;
- dans le cas d'une incertitude sur la localisation du toit du substratum (donnée indispensable pour l'interprétation des coupes de résistivité), la réalisation d'un profil sismique HR devrait permettre de lever l'indétermination ;
- la méthode RMP a été mise en œuvre à plusieurs reprises sur cette problématique de contamination de la nappe du Rhin par les chlorures en aval des terrils. L'objectif de cette méthode était la discrimination entre les anomalies conductrices dues à la présence de matériaux argileux et celles dues à une forte concentration en chlorure. Les résultats sont très mitigés pour au moins deux raisons :
 - dans le cas d'aquifères superposés, comme c'est le cas ici, seul la caractérisation de l'aquifère supérieur est fiable,
 - la zone d'extension des panaches de pollution est située dans une zone très urbanisée où les conditions de bruit électromagnétique sont très défavorables et limitent les possibilités d'application de la méthode.

Sommaire

1. Introduction.....	11
2. Contexte et objectifs de l'étude géophysique	13
3. Acquisition et traitement des données	15
3.1. PROGRAMME TECHNIQUE	15
3.2. PERSONNEL ET CALENDRIER	15
3.3. ÉQUIPEMENT	15
3.4. TRAVAUX REALISES	16
3.5. TRAITEMENT DES DONNÉES	17
4. Résultats	19
4.1. INTERPRÉTATION EN TERMES DE GÉOLOGIE ET D'HYDROGÉOLOGIE.....	19
4.2. INTERPRÉTATION EN TERMES DE POLLUTION PAR LES CHLORURES	30
4.2.1. Procédure de mise en évidence et de caractérisation de la pollution par les chlorures.....	30
4.2.2. Concentration en NaCl dans la nappe de l'aquifère supérieur	35
4.2.3. Concentration en NaCl dans la nappe de l'aquifère inférieur	37
4.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	40
5. Conclusion et recommandations.....	43
6. Bibliographie.....	45

Liste des illustrations

Illustration 1 :	Localisation des investigations géophysiques dans le contexte de la contamination par des chlorures de la nappe du Rhin (aquifère inférieur) dans le secteur des Mines de Potasse d'Alsace en aval des terrils Amélie.	12
Illustration 2 :	Localisation des panneaux électriques sur fond IGN à 1/25 000.	14
Illustration 3 :	Panneau électrique : P1-coupe de résistivité inversée-profondeur d'investigation : 75 m.	20
Illustration 4 :	Panneau électrique : P2-coupe de résistivité inversée-profondeur d'investigation : 100 m.	21
Illustration 5 :	Panneau électrique : P3-coupe de résistivité inversée-profondeur d'investigation : 75 m.	22
Illustration 6 :	Signature géo-électrique du dôme de sel de Hettenschlag (figure extraite du rapport BRGM/RP-53907-FR).	25
Illustration 7 :	Schéma de mise en place d'un diapir de sel.	26
Illustration 8 :	Panneau électrique : P1-coupe de résistivité inversée dans la tranche de terrain 0-40 m.	27
Illustration 9 :	Panneau électrique : P2-coupe de résistivité inversée dans la tranche de terrain 0-40 m.	28
Illustration 10 :	Panneau électrique : P3-coupe de résistivité inversée dans la tranche de terrain 0-40 m.	29
Illustration 11 :	Carte du niveau piézométrique (données 2012) et des isohypses du substratum (données BRAR) en aval des terrils Amélie.	31
Illustration 12 :	Relation entre la résistivité (conductivité) de l'eau et la concentration en NaCl.	32
Illustration 13 :	Cartographie des concentrations en chlorures dans l'aquifère supérieur.	36
Illustration 14 :	Cartographie des concentrations en chlorures dans l'aquifère inférieur.	38
Illustration 15 :	Carte de synthèse des résultats.	41

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Caractéristiques des panneaux électriques.	16
Tableau 2 :	Concentration moyenne en NaCl depuis 2011 dans les aquifères inférieur et supérieur au niveau de la zone d'étude (mesures effectuées dans 17 piézomètres).	33
Tableau 3 :	Estimation de la porosité totale moyenne des aquifères inférieur et supérieur	34
Tableau 4 :	Détermination au niveau de la langue salée A de la concentration en NaCl en fonction de la résistivité de l'aquifère inférieur et de différentes hypothèses de porosité.	39
Tableau 5 :	Détermination au niveau de la langue salée B de la concentration en NaCl en fonction de la résistivité de l'aquifère inférieur et de différentes hypothèses de porosité.	39

Liste des annexes

Annexe 1 : Principe de la méthode du panneau électrique	47
Annexe 2 : Coordonnées X, Y, Z de certaines stations de mesure sur les profils P1, P2 et P3.	55
Annexe 3 : Paramètres d'inversion pour Res2Dinv	61
Annexe 4 : Coupes géologiques des piézomètres ayant servi de calages pour l'interprétation géophysique.....	67
Annexe 5 : Coupes géologiques des sondages profonds ayant servi de calages pour l'interprétation géophysique.....	77

1. Introduction

Le GIP GEODERIS a été mandaté par la DREAL Alsace pour effectuer une étude relative à l'optimisation du réseau de dépollution et au suivi de la contamination par des chlorures de la nappe de Rhin dans le secteur des Mines de Potasse d'Alsace. Cette étude est décrite dans la fiche n° ALS2.4.10 du programme de travail 2014 de GEODERIS.

Dans le cadre de cette étude, GEODERIS a demandé au BRGM (unité DRP/RAI) de réaliser des investigations géophysiques par la méthode du panneau électrique en aval des terrils Amélie (Illustration 1).

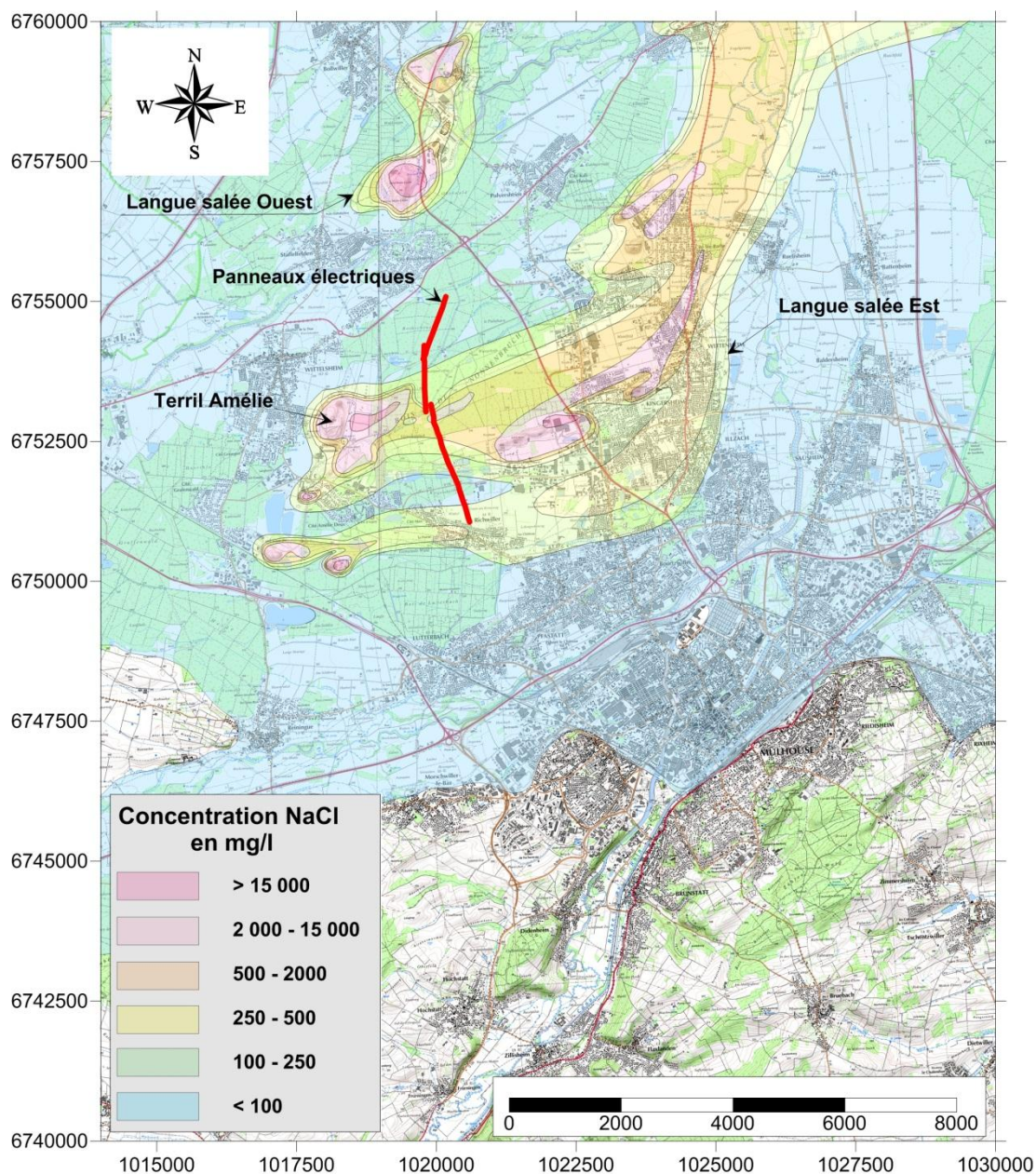


Illustration 1 : Localisation des investigations géophysiques dans le contexte de la contamination par des chlorures de la nappe du Rhin (aquifère inférieur) dans le secteur des Mines de Potasse d'Alsace en aval des terrils Amélie.

2. Contexte et objectifs de l'étude géophysique

La cartographie annuelle des langues salées et la modélisation hydrogéologique effectuée par le BRGM en 2004 ont soulevé plusieurs interrogations sur la trajectoire exacte de ces langues salées issues des terrils du bassin potassique d'Alsace, sur leur extension latérale ainsi que sur la répartition des chlorures avec la profondeur.

La présente étude géophysique est focalisée sur une zone située à environ 1,5 km en aval des terrils Amélie et à 2,5-3 km des terrils Joseph Else (Illustration 2). Elle comprend la réalisation de 3 panneaux électriques représentant un transect d'environ 4,6 km qui recoupe intégralement la partie septentrionale de la langue Est (cartographie présumée construite à partir des données de concentration en chlorure issues des piézomètres).

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- délimitation spatiale des zones polluées par les chlorures ;
- identification d'une éventuelle stratification des chlorures selon la profondeur ;
- essais de corrélation entre la résistivité électrique et la teneur en chlorure.

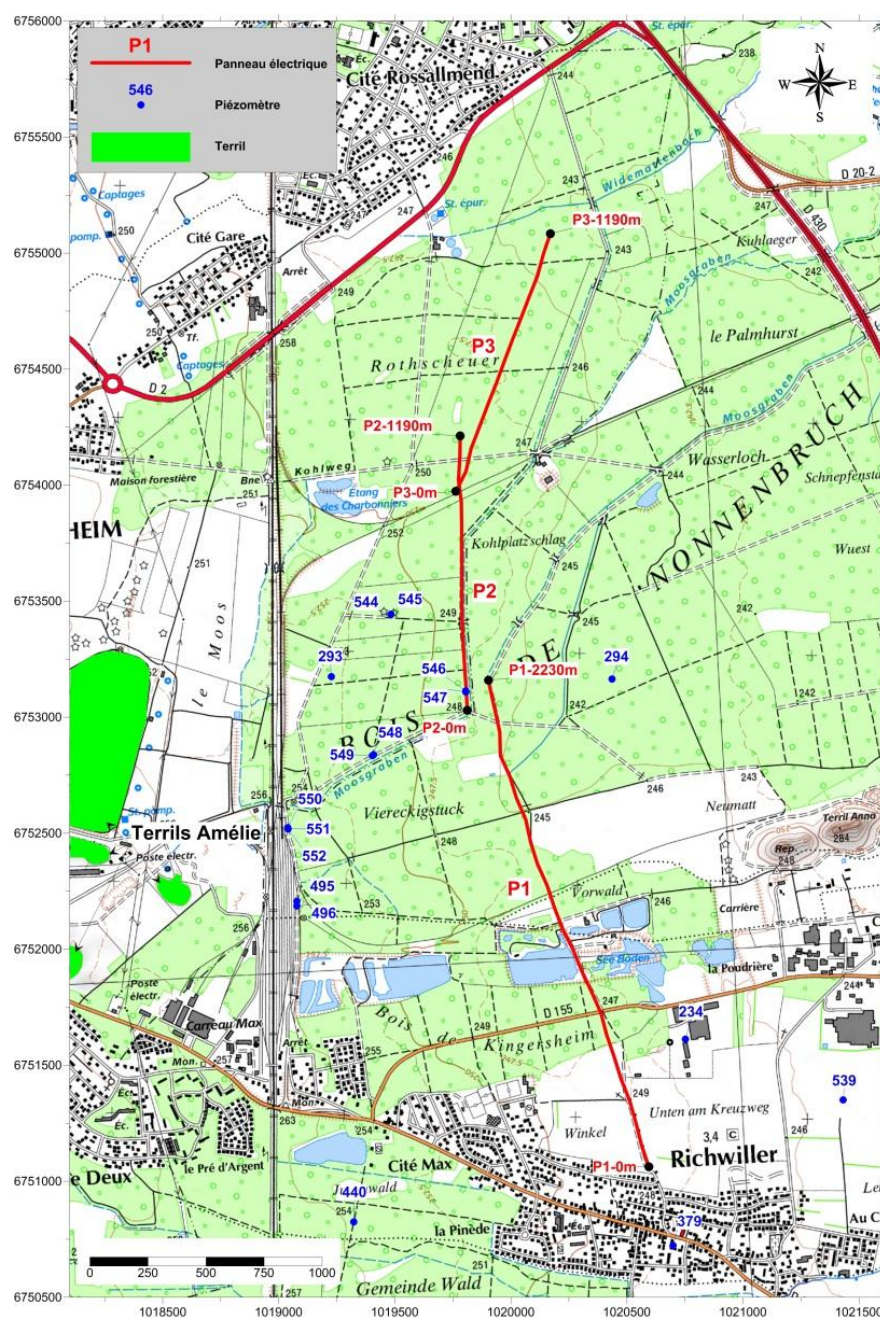


Illustration 2 : Localisation des panneaux électriques sur fond IGN à 1/25 000.

3. Acquisition et traitement des données

3.1. PROGRAMME TECHNIQUE

Le programme technique est le suivant :

- réalisation de panneaux électriques (annexe 1) implantés au mieux pour répondre aux différents objectifs assignés, tout en tenant compte des contraintes d'accessibilité dues à la présence de zones urbanisées, d'infrastructures industrielles et de zones de culture ;
- la longueur des panneaux est de 950m et la longueur des dipôles varie de 10 à 80 m permettant ainsi d'atteindre une profondeur d'investigation de l'ordre de 125 à 140 m. La profondeur demandée contractuellement était de 150 m ;
- deux configurations d'acquisition ont été mises en œuvre lors de la réalisation des panneaux électriques : un dispositif dipôle-dipôle pour la résolution des terrains de surface ainsi qu'un dispositif Wenner-Schlumberger pour la profondeur.

Le dispositif dipôle-dipôle donne une très bonne résolution des terrains de sub-surface et des discontinuités verticales. Il est moins sensible aux effets latéraux que le dispositif Wenner-Schlumberger. Par contre, le rapport signal/bruit décroît rapidement avec la profondeur d'investigation.

Le dispositif Wenner-Schlumberger est beaucoup plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. 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 150 m pour un dispositif de 950 m de long) grâce à un meilleur rapport signal/bruit.

3.2. PERSONNEL ET CALENDRIER

La campagne de mesures s'est déroulée du 19/03/2014 au 26/03/2014 (amené et replis compris) et a été effectuée par F. Mathieu, ingénieur géophysicien de l'unité DRP/RAI du BRGM, assisté de R. Barbier, technicien de la même unité.

L'intervention sur le terrain a été précédée d'une phase de permittage (communication, autorisations d'accès auprès de la population) réalisée par G. Reichart de GEODERIS.

La compilation des données et l'interprétation des résultats ont été réalisées par F. Mathieu en Avril 2014.

3.3. ÉQUIPEMENT

L'acquisition des panneaux électriques a été réalisée à l'aide d'un résistivimètre Syscal-Pro (Iris Instruments, France) connecté à 12 flûtes de 8 électrodes, soit 96 électrodes métalliques régulièrement espacées de 10 m sur 950 m. L'énergie provenait

d'une batterie externe. L'espacement inter-électrodes de 10 m a été choisi afin d'assurer à la fois une résolution acceptable des terrains de surface, et l'obtention d'une profondeur d'investigation maximale d'environ 150 m (profondeur contractuelle). Le matériel utilisé comprend :

- 1 Syscal Pro ;
- 12 flûtes de 8 traces avec un inter-trace de 10 m ;
- 96 électrodes ;
- 96 cordons ;
- 3 massettes ;
- 4 claies de portages ;
- 1 transporteur à chenilles ;
- 2 batteries de voiture 70 Ah ;
- 10 connecteurs de flûtes ;
- 1 GPS différentiel Trimble ;
- 1 micro-ordinateur portable ;
- 2 véhicules dont un 4X4.

3.4. TRAVAUX RÉALISÉS

Les mesures électriques ont été acquises en utilisant les recommandations du Code de Bonne Pratique édité par l'AGAP Qualité.

Dix panneaux électriques d'une longueur unitaire de 950 m ont été réalisés. Ils sont répartis sur trois profils (P1, P2 et P3).

Les caractéristiques des profils et des différents panneaux électriques sont données dans le Tableau 1.

Profil	Nombre de panneaux électriques	Date d'acquisition	Longueur (m)	Orientation	Configuration d'acquisition	Spacing (levels)		Nb mesures exploitables	Profondeur d'investigation max. atteinte (m)
						DD	WS		
P1	6	22, 24, 25/03/2014	2230	SSE-NNW	Dipôle-dipôle	10 m (5) 20 m (6) 40 m (6) 60 m (5) 80 m (6)	10 m (6) 20 m (7) 40 m (7) 60 m (7) 80 m (4)	3397	75
					Wenner-Schlumberger			4277	140
P2	2	21/03/2014	1190	S-N	Dipôle-dipôle			1810	100
					Wenner-Schlumberger			2044	125
P3	2	20/03/2014	1190	SSW-NNE	Dipôle-dipôle			1358	75
					Wenner-Schlumberger			2000	125
total	10	5 jours	4610					14 886	

Tableau 1 : Caractéristiques des panneaux électriques.

Le positionnement (X, Y) et l'altimétrie (Z) de toutes les stations de mesure (Annexe 2) ont été effectués avec un GPS Trimble GeoXH6000, en mode différentiel avec correction

en post-traitement à l'aide des éphémérides de l'IGN. La précision en X, Y, Z est de l'ordre du décimètre. Le système de référence géographique est le Lambert 93.

3.5. TRAITEMENT DES DONNÉES

Après filtrage des données de résistivité apparente (mesurées sur le terrain) sur la base de critère de qualité ($Q < 3 \%$), de courant émis ($I > 100 \text{ mA}$) ou de potentiel mesuré ($V > 0,3 \text{ mV}$), celles-ci sont ensuite traitées avec le logiciel X2IPI (Bobachev Alexey, Moscow University) pour corriger les artéfacts dus aux à-coups de prise, puis inversées avec le logiciel Res2DInv (Loke & Barker, 1996). Les profils de topographie sont inclus lors des inversions de chaque panneau électrique.

La section de résistivité « vraie » résultat de l'inversion, sera ensuite utilisée pour l'interprétation en termes de géologie, d'hydrogéologie et de salinité de l'eau. Elle fournit des informations quantitatives permettant de caractériser l'origine des différentes anomalies mises en évidence : résistivité, géométrie et profondeur, pendage. Les résultats de l'inversion sont présentés sous forme d'une coupe présentant la distribution des résistivités calculées le long du profil en fonction de la profondeur.

Pour chaque cas, des paramètres d'inversion (Annexe 3) ont été choisis de manière à optimiser la réponse du modèle en incluant une information géologique « *a priori* ».

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géo-électriques) les résultats fournis par l'inversion ne sont pas définis de manière univoque (il y a plusieurs solutions satisfaisant au même jeu de données). 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 des affleurements...).

4. Résultats

4.1. INTERPRÉTATION EN TERMES DE GÉOLOGIE ET D'HYDROGÉOLOGIE

Les panneaux électriques effectués au niveau des profils P1, P2 et P3 ont une profondeur d'investigation de l'ordre de 75 à 100 m avec le dispositif dipôle-dipôle et une profondeur de l'ordre de 150 m (profondeur demandée contractuellement) avec le dispositif Wenner-Schlumberger. Pour l'interprétation en termes de géologie et d'hydrogéologie une profondeur d'investigation de 75 à 100 m (dispositif dipôle-dipôle) est suffisante car les objectifs de la présente étude se situent dans la tranche de terrain 0-35 m qui correspond aux dépôts alluvionnaires. Au-delà de 35 m de profondeur, les coupes géo-électrique permettent de caractériser le substratum tertiaire.

Les coupes de résistivité inversée (illustrations 3, 4, 5), après calage sur les différentes informations géologiques fournies par les sondages présents sur ou à proximité de la zone d'étude ainsi que sur les différentes données (carte du toit substratum, carte piézométrique) provenant de la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan (BRAR), ont permis de dresser un schéma géo-électrique qui serait de haut en bas le suivant :

- un premier horizon géo-électrique résistant (R0) dont la résistivité est comprise entre 20 et plus de 1 000 ohm.m. Son épaisseur est relativement constante : 25 à 30 m. Il est attribué aux dépôts alluvionnaires. L'interface matérialisant la base de cet horizon est d'ailleurs relativement bien corrélée avec la cote du toit du substratum tertiaire issue des données BRAR.

Au sein de cette couche résistante, les inversions effectuées dans la tranche de terrain 0-40 m (illustrations 8, 9 et 10) qui permettent d'avoir une meilleure résolution au niveau des terrains de sub-surface, montrent qu'en fait cette couche est constituée de 4 horizons dont les caractéristiques géo-électriques sont différentes :

- le terrain le plus superficiel est très résistant (résistivité comprise entre 300 et plus de 1 000 ohm.m) et son épaisseur varie de 5 à 10 m. Il correspondrait à la zone non-saturée des alluvions. La base de cet horizon est d'ailleurs en parfaite corrélation avec le niveau piézométrique issu des données BRAR. Les écarts entre le niveau d'eau issu de l'interprétation des coupes de résistivité et celui issu des données BRAR sont inférieurs à 3 m. Cette imprécision est due d'une part à un manque de résolution de la méthode électrique (spacing 10 m) et d'autre part aux incertitudes liées à l'interpolation des données BRAR,
- le terrain sous-jacent est également résistant mais sa résistivité est plus faible et relativement constante. Elle s'établit aux environs de 300 ohm.m. Son épaisseur serait de l'ordre de 3 à 7 m. Il est attribué aux alluvions saturées qui constituent l'aquifère supérieur. Compte tenu de sa résistivité (300 ohm.m) et d'une porosité moyenne (donnée bibliographique) de l'aquifère supérieur de l'ordre de 20 %, la conductivité de l'eau serait de l'ordre de 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (correspondant à une concentration en NaCl de 108 mg/l). Les aspects pollution de la nappe seront traités plus en détail au niveau de la section 4.2.,

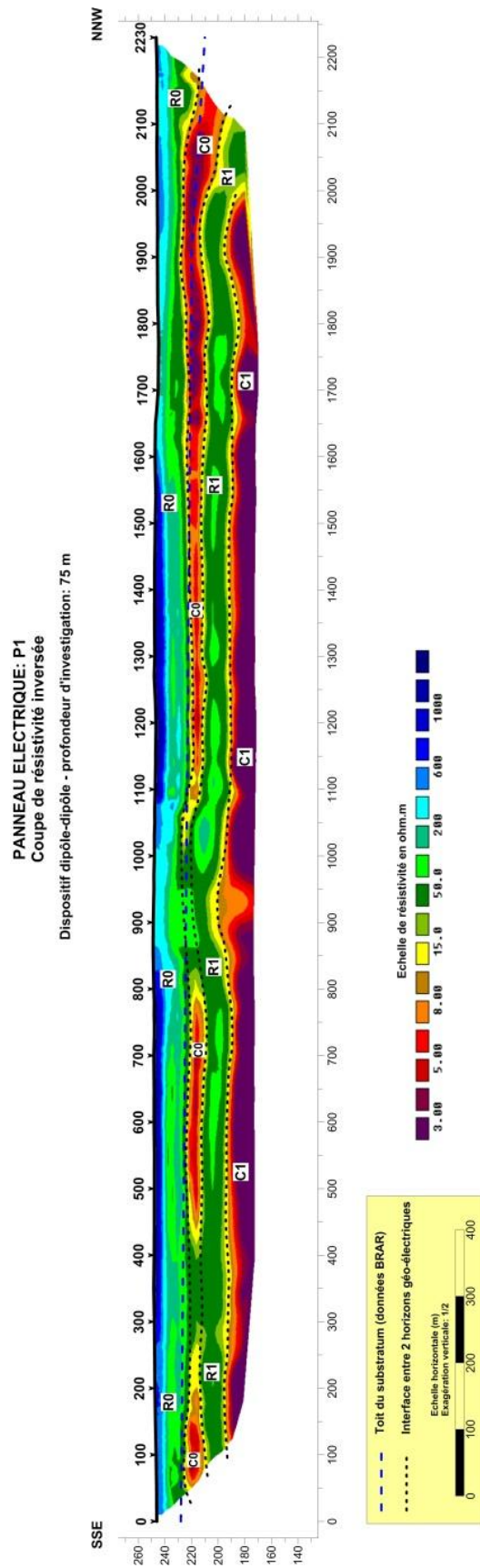


Illustration 3 : Panneau électrique : P1-coupe de résistivité inversée-profondeur d'investigation : 75 m.

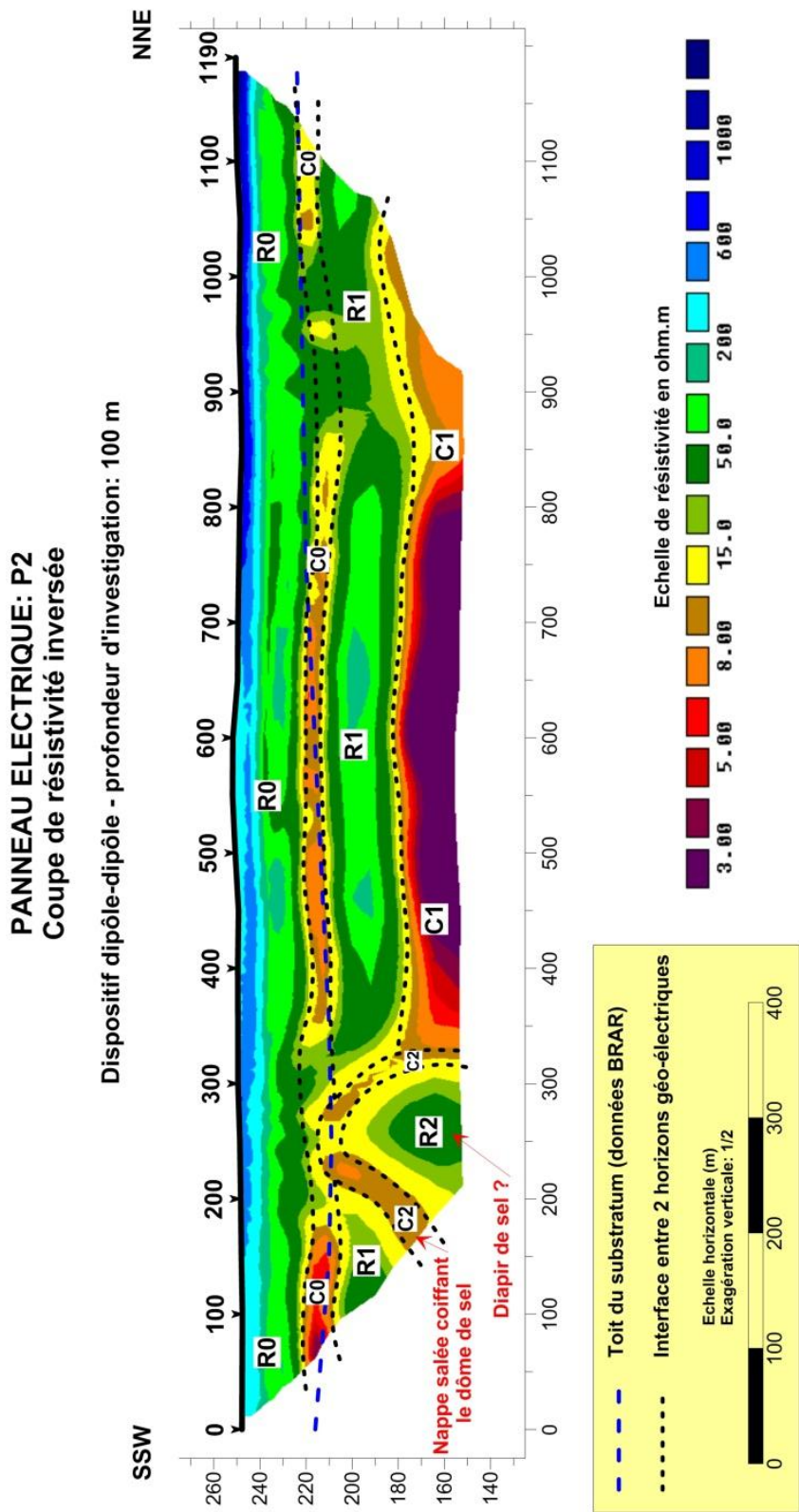


Illustration 4 : Panneau électrique : P2-coupe de résistivité inversée-profondeur d'investigation : 100 m.

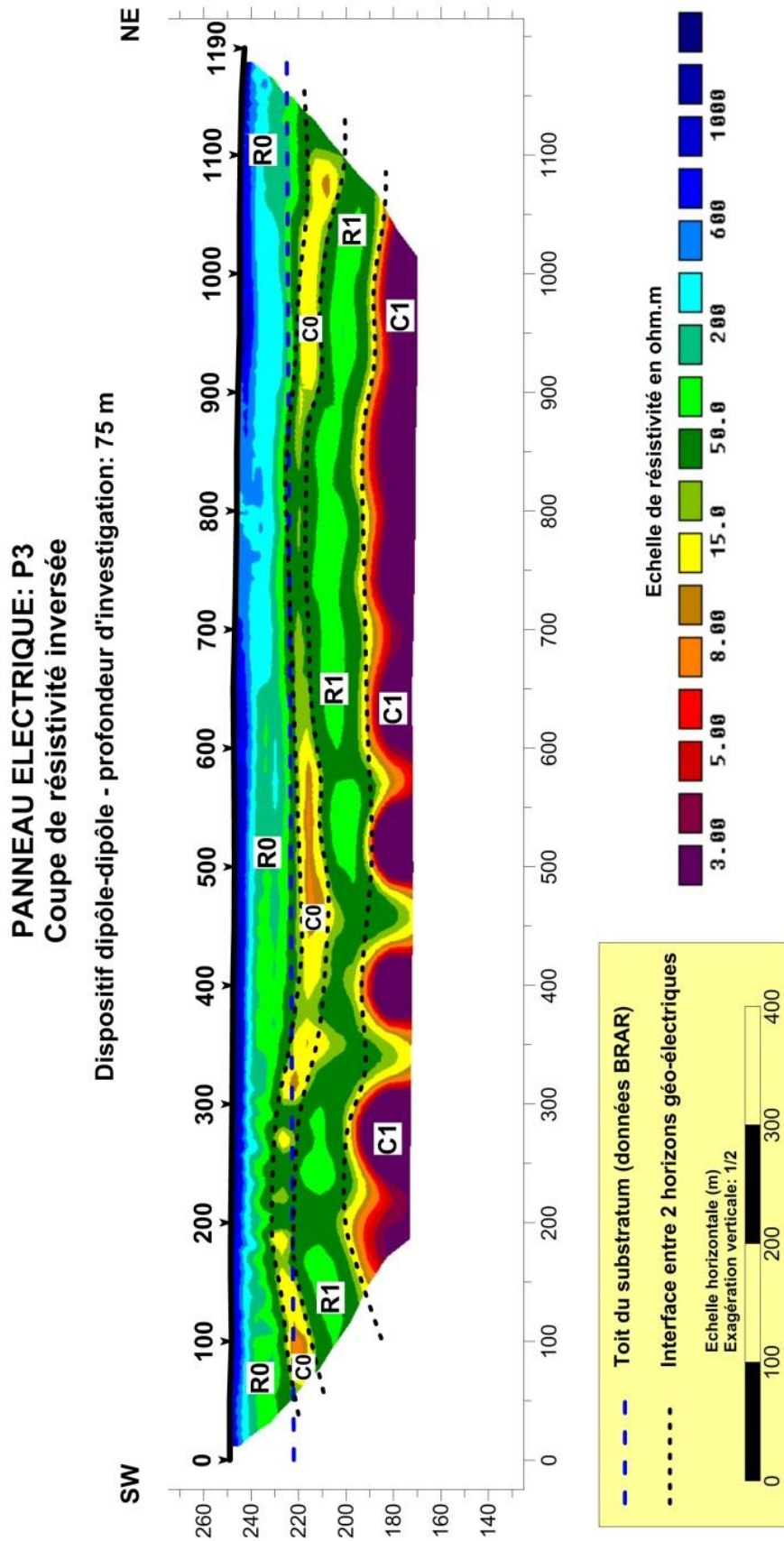


Illustration 5 : Panneau électrique : P3-coupe de résistivité inversée-profondeur d'investigation : 75 m.

- un horizon conducteur dont la résistivité est généralement comprise entre 15 et 50 ohm.m. Son épaisseur moyenne est difficilement estimable, elle fluctue entre une valeur minimale de 1 à 2 m et une valeur maximale de 7 à 8 m. Par contre, il présente un caractère relativement continu. Il est attribué, d'après les sondages présents sur la zone d'étude, à une couche de sédiments fins argilo-sableux. Cet horizon, d'après ces caractéristiques électriques et lithologiques, peut être considéré comme un semi-perméable constituant le mur de l'aquifère supérieur. Les variations d'épaisseur de cet horizon géo-électrique pourraient être dues à une faible résolution de la méthode électrique en présence d'une couche de faible épaisseur à une profondeur de l'ordre de 10 à 15 m.

Localement, ce niveau semi-perméable est caractérisé par une résistivité très faible (<10 ohm.m) comme c'est le cas entre les abscisses 1 820 et 1 960 m de P1 et les abscisses 260 et 660 m de P2. Comme nous le verrons en section 4.2.3., ces deux secteurs sont situés à l'aplomb des langues salées A et B. Cette faible résistivité pourrait donc être due à des imprégnations résiduelles de saumure piégée, lors de son passage de l'aquifère supérieur vers l'aquifère inférieur, dans les argiles qui constituent cet horizon semi-perméable,

- un dernier horizon résistant dont la résistivité est comprise entre 75 et 350 ohm.m. Son épaisseur, relativement constante, est de l'ordre de 10 m. Il correspond aux alluvions sablo-graveleuses qui constituent l'aquifère inférieur ;
- un deuxième horizon géo-électrique conducteur (C0) dont la résistivité est comprise entre 4 et 50 ohm.m. Son épaisseur fluctue entre 10 et 15 m. Les différents calages effectués à partir des sondages situés à proximité des profils électriques montrent que cet horizon conducteur correspond à la partie sommitale du substratum tertiaire qui est constitué d'argiles d'altération (zone de transition) et de marnes (série grise de Pechelbronn-Rupélien). Le toit de cet horizon C0 est relativement bien corrélé avec le toit du substratum cartographié d'après les données BRAR. Sur la zone d'étude la cartographie BRAR du substratum peut donc être considérée comme fiable et relativement précise.

La résistivité minimale de l'horizon C0 augmente de façon significative du sud (5 ohm.m) vers le nord (15 ohm.m). Cette augmentation est peut être en relation avec la présence actuelle ou historique de la branches méridionale (terril Joseph Else) et de la branche septentrionale (Terril Amélie) de la langue salée est. En effet, dans la partie sud, les eaux saumâtres présentent dans l'aquifère inférieur ont pu imprégner la partie sommitale du substratum (faible résistivité de l'horizon C0) alors que dans la partie nord, historiquement il n'y a jamais eu de pollution par les chlorures (résistivité plus élevée au niveau du profil P3) ;

- un troisième terrain résistant R1 dont la résistivité est comprise entre 20 et 200 ohm.m. Son épaisseur est de 20 à 30 m. Il correspondrait à une couche géologique appartenant à la série grise de Pechelbronn-Rupélien, mais les forages profonds (Annexe 5) présents sur la zone d'étude ne donnent pas de précisions sur la lithologie de cette couche. Compte tenu de sa résistivité, qui est plus élevée que celle des horizons C0 et C1, on peut imaginer que la fraction argileuse, au niveau de cette couche, soit moins importante qu'au niveau de C0 et C1.

L'interface matérialisant le toit de cet horizon caractérise localement des remontées de substratum comme c'est le cas entre les abscisses 800 et 1 100 m du P1, entre les abscisses 0 et 400 m du P3 et entre 150 et 320 m sur le P2. Pour les secteurs P1 et P3, l'origine de cette ondulation reste indéterminée par contre au niveau du secteur P2, l'origine est probablement structurale et sera commentée plus en détail ci-après ;

- un quatrième terrain conducteur C1 dont la résistivité est globalement inférieure à 4 ohm.m. Son épaisseur n'a pu être appréhendée du fait d'une profondeur d'investigation insuffisante. Même les inversions réalisées à partir des dispositifs Wenner Schlumberger, dont la profondeur d'investigation est de l'ordre de 150 m n'ont pas atteint la base de cet horizon conducteur. Son épaisseur serait donc supérieure à 100 m. Ce qui n'est pas surprenant compte tenu de la puissance de la série de Pechelbronn qui, d'après les sondages réalisés dans le secteur, serait de l'ordre de 400 m.

À l'extrémité sud du panneau électrique P2 (illustration 4), une structure résistante R2 a été mise en évidence. Elle est intrusive dans le substratum marneux représenté par les horizons géo-électriques C1, R1 et C0. La coupe de résistivité inversée avec une profondeur d'investigation de 40 m (illustration 9) montre que cette structure ne traverse pas intégralement l'horizon géo-électrique C0 et n'atteint donc pas la base de l'aquifère inférieur. Les caractéristiques de cette structure résistante sont les suivantes :

- résistivité de l'ordre de 50 ohm.m ;
- puissance de 125 à 150 m ;
- morphologie sub-verticale ;
- Apex situé à environ 45 m de profondeur.

Cette structure résistante R2 est coiffée par un horizon conducteur C2 dont la résistivité est de l'ordre de 10 ohm.m et dont la puissance serait comprise entre 15 et 20 m.

Ce type de signature géo-électrique suggère la présence d'un diapir de sel coiffé par un horizon de dissolution. Cette interprétation s'inspire des travaux géophysiques effectués en 1999 dans le cadre du projet INTERREG II¹ et en 2004².

Comme le montre l'illustration 6, extraite du rapport BRGM/RP-53907, le panneau électrique réalisé sur le secteur d'Hettenschlag a partiellement recoupé un diapir de sel (connu grâce aux sondages d'exploration de la potasse effectués entre les deux guerres). La signature géo-électrique de ce dôme de sel est caractérisée par une structure conductrice qui coiffe un ensemble résistant. Cette signature géophysique est en tout point identique à celle mise en évidence à l'extrémité sud du panneau électrique P2, on peut donc en conclure que l'origine est la même, c'est-à-dire une remontée d'un dôme de sel.

¹ ELSASS P. en collaboration avec WIRSING G. (1999) – INTERREG II. Inventaire de la qualité des eaux souterraine dans la vallée du Rhin supérieure. Études géophysiques et piézomètres profonds. Rapport R40585.

² Dupont F., MIECHE J.M. (2005) – Contrôle de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace en aval du bassin Potassique. Campagne d'automne 2004 BRGM, RP-53907-FR.

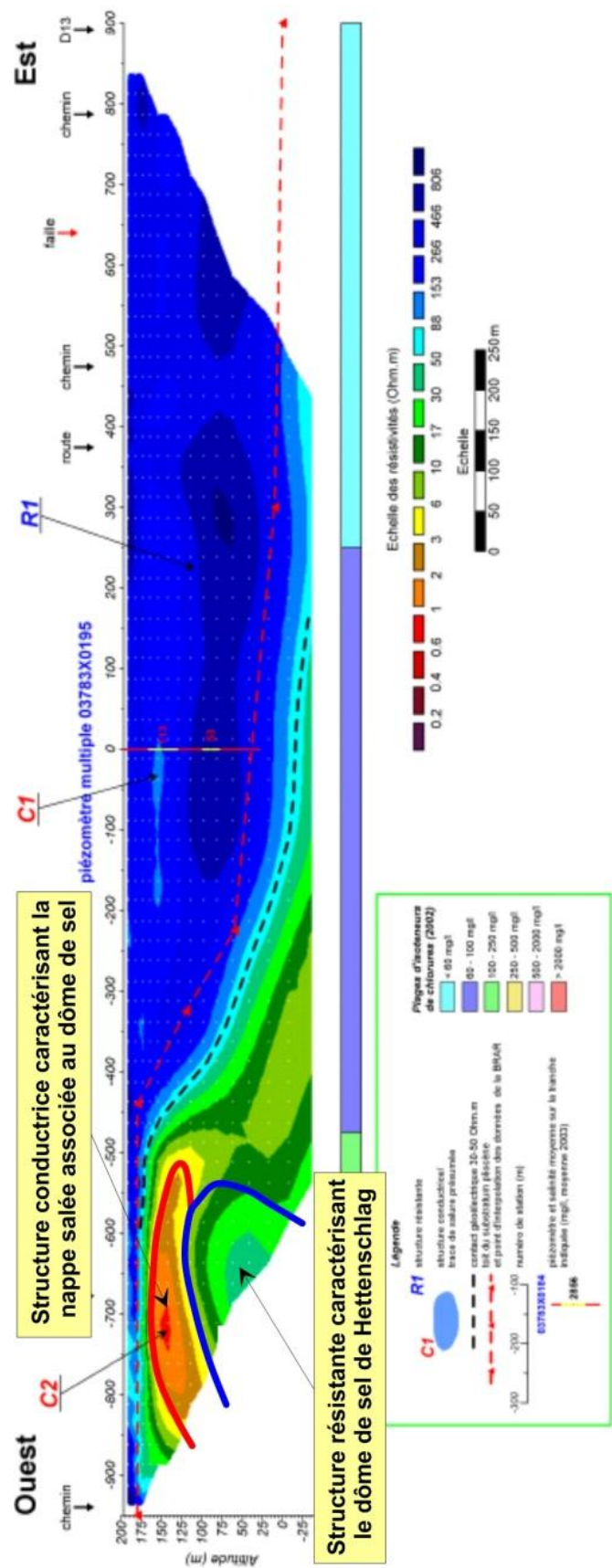


Illustration 6 : Signature géo-électrique du dôme de sel de Hettenschlag (figure extraite du rapport BRGM/RP-53907-FR).

Les phénomènes diapiriques sont bien connus dans le bassin potassique. Le moteur de ces mouvements ascensionnels est la différence de densité entre le sel et son encaissant marneux. Dès qu'il se produit une rupture du toit d'une couche sédimentaire de sel (à la faveur d'une faille ou d'un tassement différentiel) et que la pression due au poids des sédiments sus-jacents est suffisante pour que le sel puisse fluer, le sel migre vers le haut en repoussant les couches de couverture. Ce mouvement ascensionnel ne s'arrête que lorsque la couche de sel ne peut plus « nourrir » le diapir (illustration 7, extraite du rapport R40585).

Comme le montre la comparaison entre la coupe de résistivité inversée avec une profondeur d'investigation de 40 m (illustration 9) et celle avec une profondeur de 100 m (illustration 4) il n'y a pas de connexion avérée entre la langue salée A (origine anthropique) et la nappe salée (C2) coiffant le diapir de sel (origine naturelle).

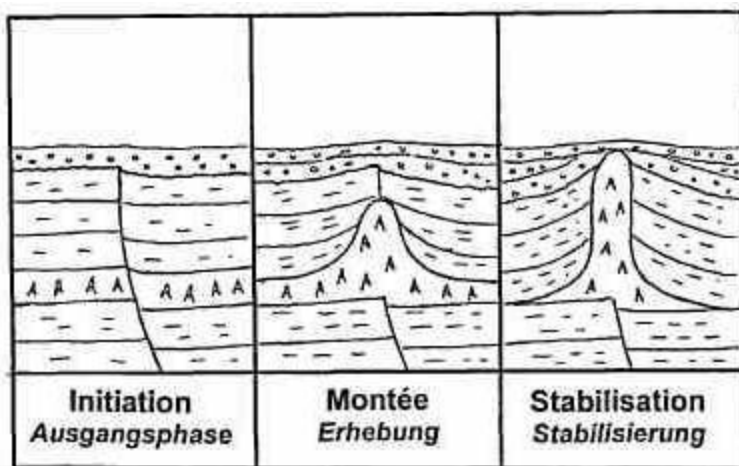


Illustration 7 : Schéma de mise en place d'un diapir de sel.

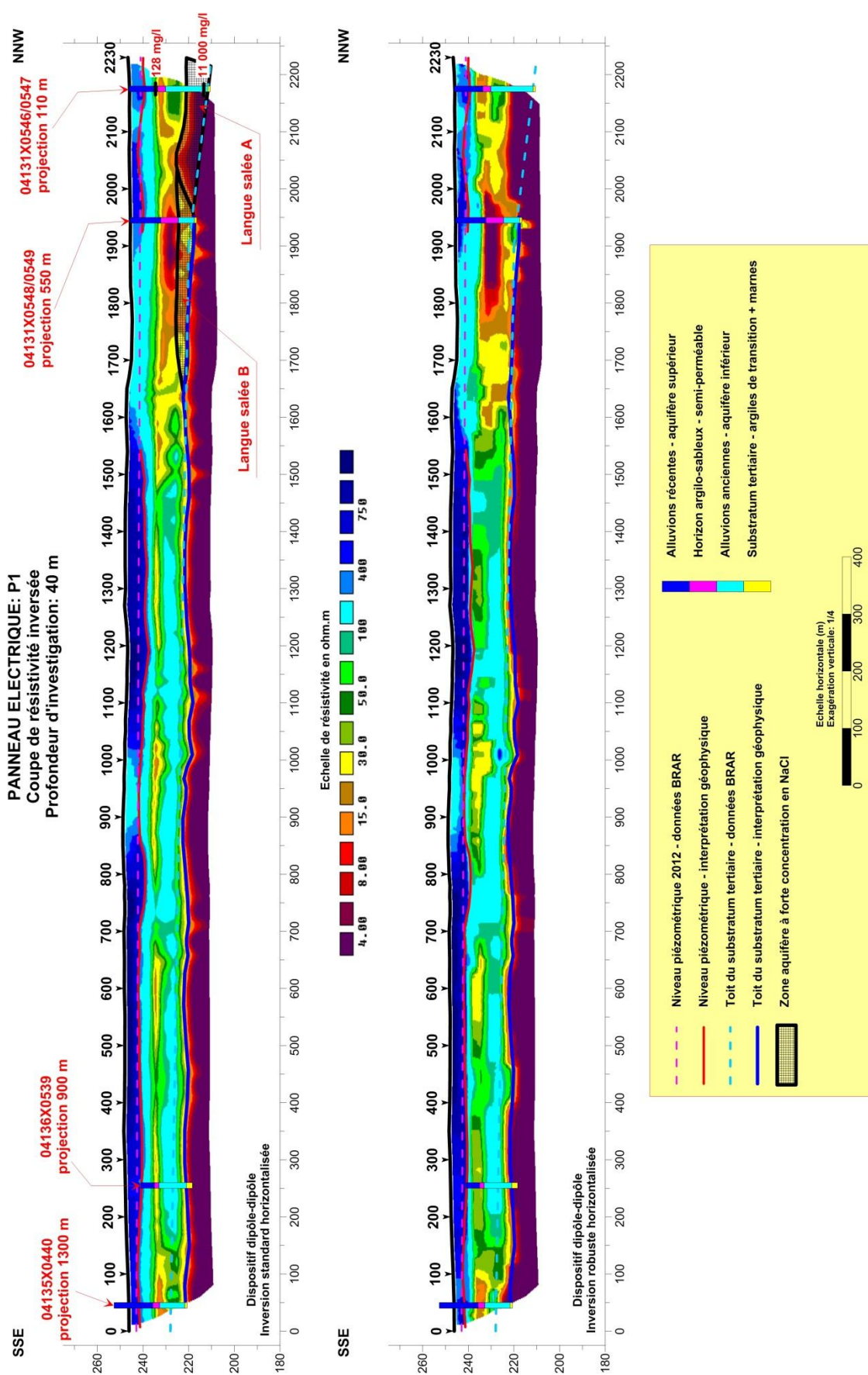


Illustration 8 : Panneau électrique : P1-coupe de résistivité inversée dans la tranche de terrain 0-40 m.

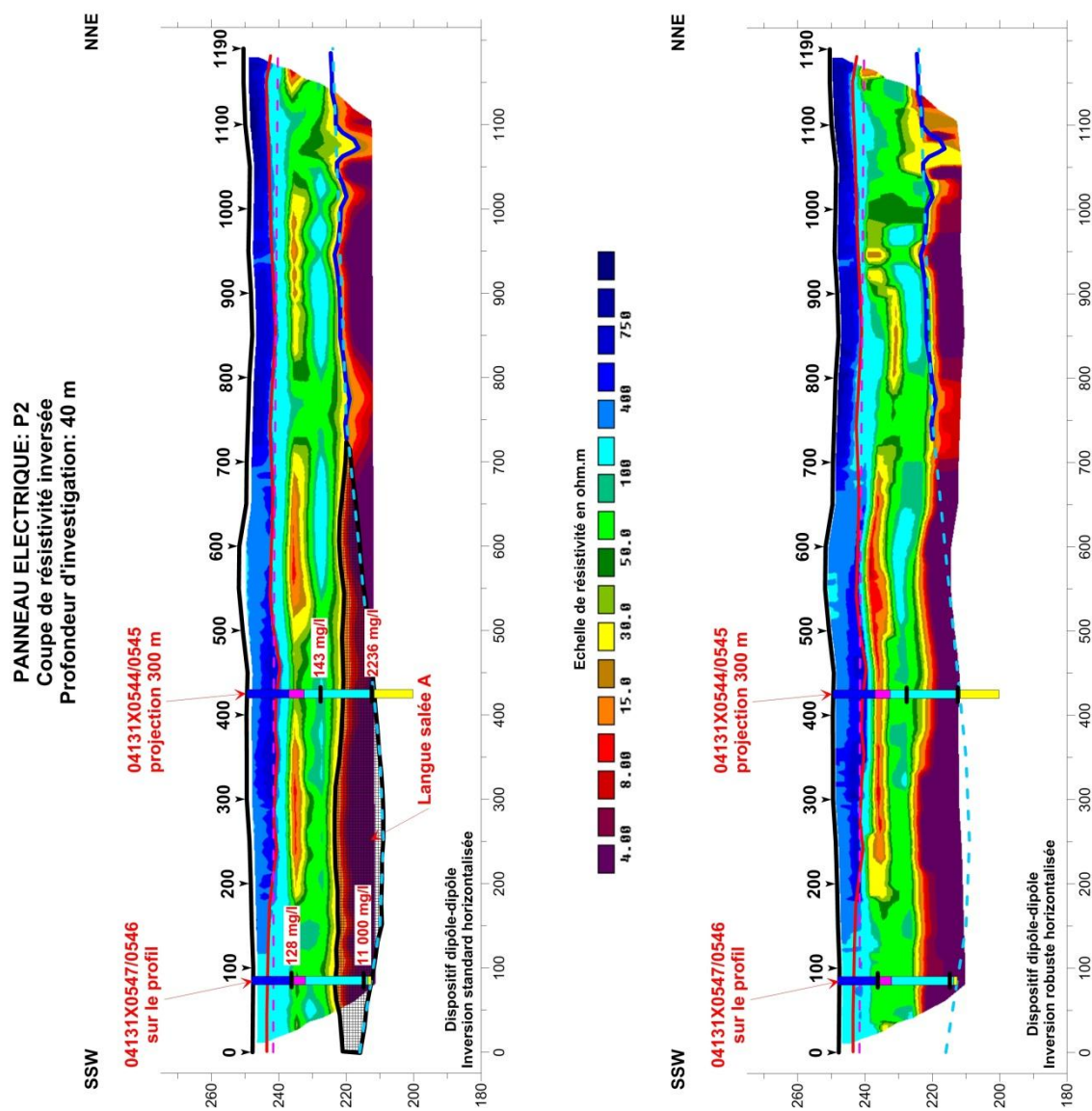


Illustration 9 : Panneau électrique : P2-coupe de résistivité inversée dans la tranche de terrain 0-40 m.

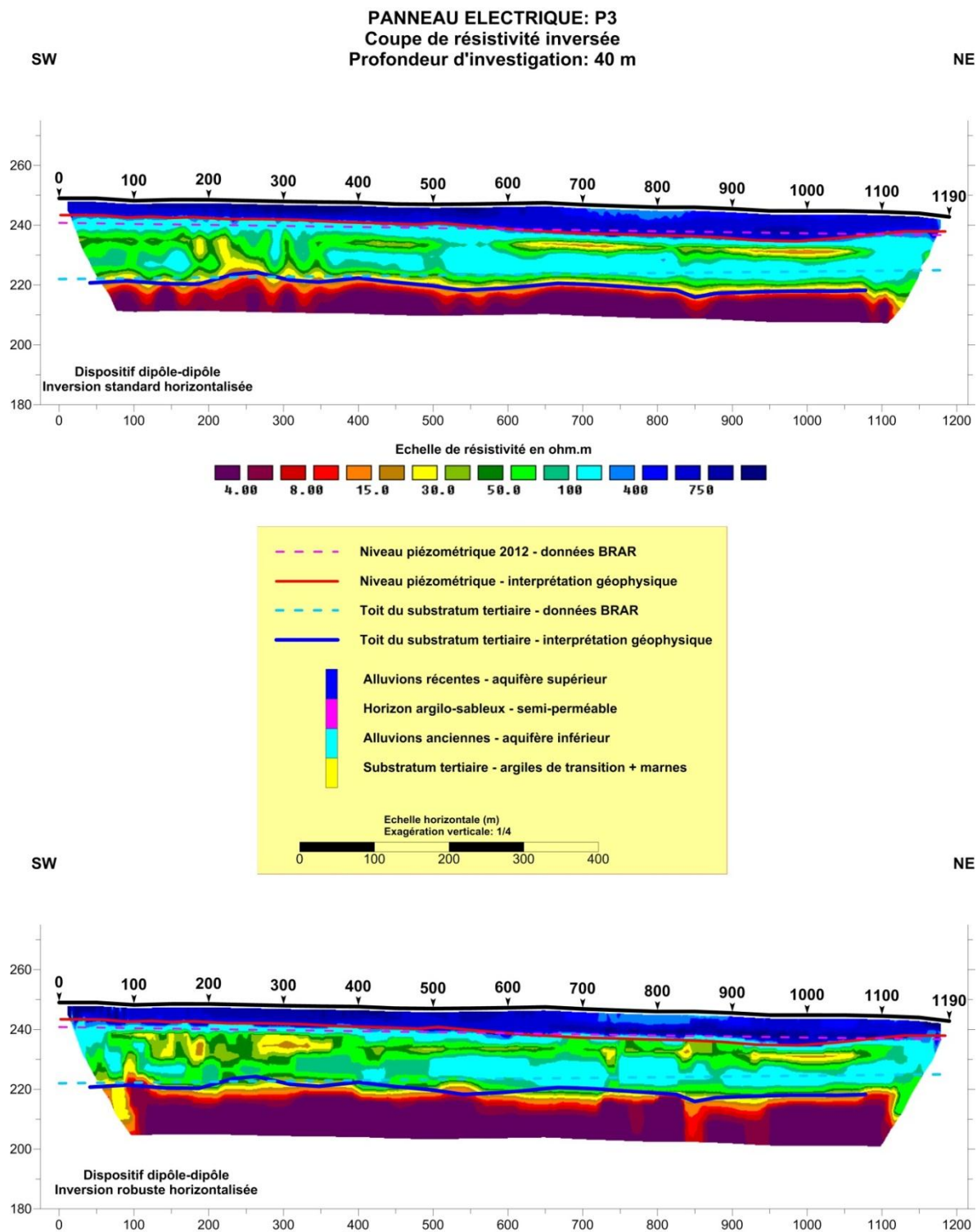


Illustration 10 : Panneau électrique : P3-coupe de résistivité inversée dans la tranche de terrain 0-40 m.

4.2. INTERPRÉTATION EN TERMES DE POLLUTION PAR LES CHLORURES

4.2.1. Procédure de mise en évidence et de caractérisation de la pollution par les chlorures

Le calage des coupes de résistivité inversée (illustrations 8, 9 et 10) sur les données disponibles a permis de bien individualiser l'aquifère inférieur et l'aquifère supérieur. Ces données sont les suivantes :

- la carte piézométrique (illustration 11) ;
- la carte des isohypses du substratum (illustration 11) ;
- les logs des piézomètres (annexe 4).

Sur cette base, il a été possible de déterminer la résistivité de chacun des aquifères qui serait comprise entre **75 et 350 ohm.m** en dehors des zones polluées par les chlorures.

Les mesures de salinité effectuées dans les piézomètres situés sur la zone d'étude, mais en dehors de la zone polluée, montre que la concentration moyenne est de l'ordre de **150 mg/l de NaCl** (Tableau 2). Cette moyenne repose sur onze valeurs mesurées (valeurs surlignées en jaune dans le tableau 2), soit dans l'aquifère supérieur, soit dans l'aquifère inférieur. La concentration normale de la nappe du Rhin est plutôt de l'ordre de 75 mg/l (communication orale de GEODERIS) ce qui laisse supposer que sur l'ensemble de la zone d'étude, il subsiste un fond de pollution même dans les secteurs considérés comme non pollués.

L'illustration 12 montre la relation qui lie la résistivité de l'eau (ou sa conductivité) et sa concentration en NaCl.

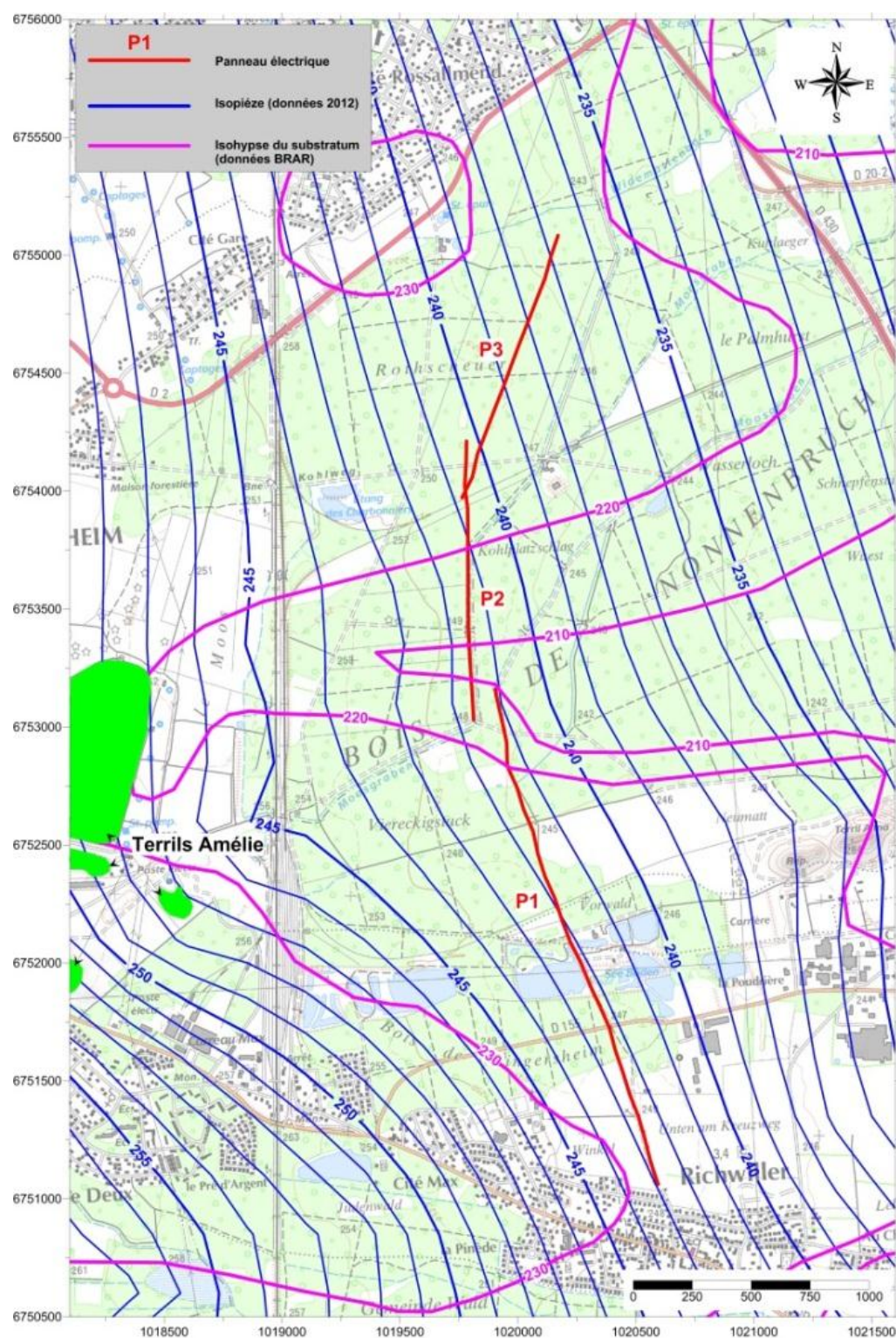


Illustration 11 : Carte du niveau piézométrique (données 2012) et des isohypses du substratum (données BRAR) en aval des terrils Amélie.

CALCUL DE LA SALINITE A PARTIR DE LA CONDUCTIVITE ET DE LA TEMPERATURE

Références :

Aminot A., Kérouel R. (2004), Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. Cf pages 74-78

Formule

$$S = a_0 + a_1 R_t^{0.5} + a_2 R_t + a_3 R_t^{1.5} + a_4 R_t^2 + a_5 R_t^{2.5} + ((t - 15)[1 + k(t-15)]) \times (b_0 + b_1 R_t^{0.5} + b_2 R_t + b_3 R_t^{1.5} + b_4 R_t^2 + b_5 R_t^{2.5})$$

avec

$$R_t = R / (R_p \cdot r_t) = C_{S,1,p} / (42,914 \cdot r_t)$$

$$R = C_{S,1,p} / 42,914$$

$R_p = 1$ (pour les mesures à faible profondeur)

$$r_t = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3 + c_4 t^4$$

Données "test" : si $t = 15^\circ\text{C}$ et $C = 42,914 \text{ mS/cm}$, la salinité est égale à 35,000

avec

$$a_0 = 0.0080$$

$$a_1 = -0.1692$$

$$a_2 = 25.3851$$

$$a_3 = 14.0941$$

$$a_4 = -7.0261$$

$$a_5 = 2.7081$$

$$\Sigma a_i = 35.0000$$

$$b_0 = 0.0005$$

$$b_1 = -0.0056$$

$$b_2 = -0.0066$$

$$b_3 = -0.0375$$

$$b_4 = 0.0636$$

$$b_5 = -0.0144$$

$$\Sigma b_i = 0.0000$$

$$c_0 = 0.6766097$$

$$c_1 = 0.0200564$$

$$c_2 = 0.00011043$$

$$c_3 = -6.9698E-07$$

$$c_4 = 1.0031E-09$$

$$k = 0.0162$$

	Température °C	Conductivité mS/cm	Salinité
TEST DE LA FORMULE	15	42.914	35.000
	10	0.001	0.005
	10	0.004	0.007
	10	0.01	0.010
	10	0.04	0.028
	10	0.1	0.067
	10	0.4	0.273
	10	1	0.706
	10	4	3.045
	10	10	8.122
	10	40	36.968
	10	100	107.657

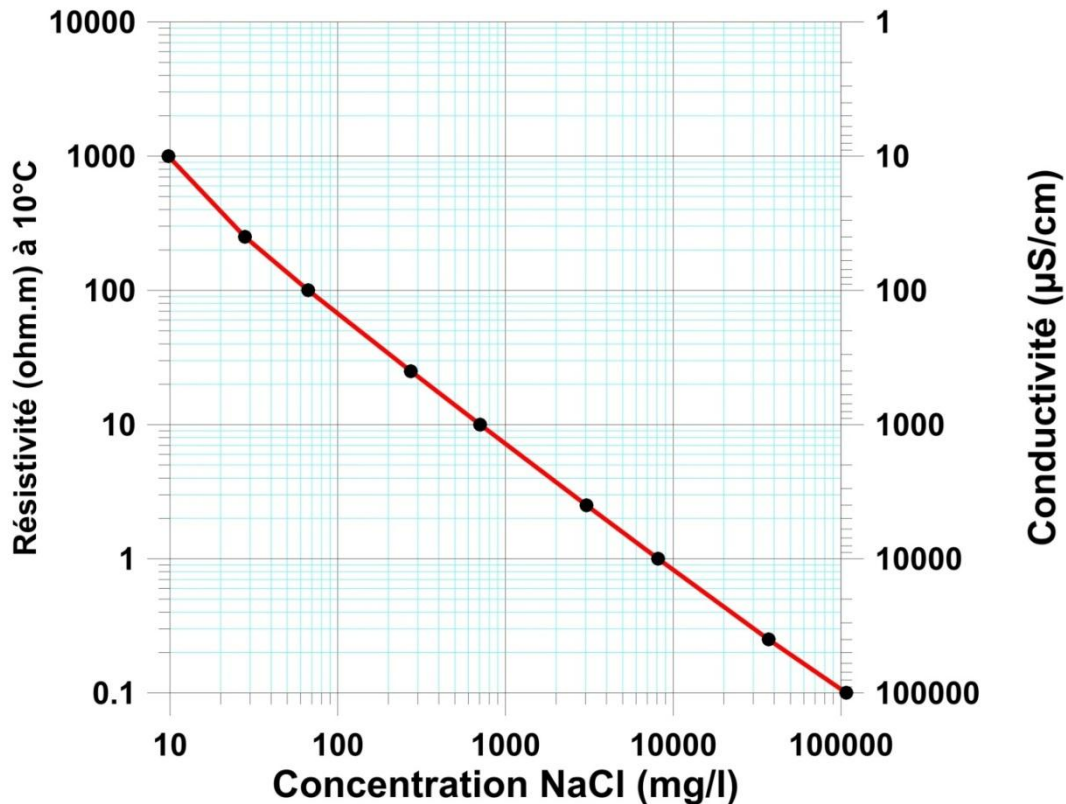


Illustration 12 : Relation entre la résistivité (conductivité) de l'eau et la concentration en NaCl.

Piézomètre	Aquifère	Profondeur prélèvement (m)	Teneur moyenne en chlorures (mg/l) depuis 2011		Dernière teneur en chlorures à disposition en 2013 ou <u>2014</u> (mg/l)	
			statique	dynamique	statique	dynamique
293	Sup	13	164	-	149	-
293	Inf	35	16000	-	13477	-
294	Sup	14	524	-	527	-
294	Inf	24	1600	-	1696	-
294	Inf	37	3179	-	2779	-
544	Inf	39	395	2236	267	1775
545	Sup	22	143	-	Arrêté	
546	Inf	33	158	11000	131	9569
547	Sup	12	128	-	86.7	-
379	Sup	5	329	-	12.6	-
234	Sup	?	Arrêté	129	Arrêté	
548	Inf	25	181	-	64.7	-
549	Sup	20	193	-	2217	-
440	Sup	17	130	394	94	Arrêté
440	Inf	26	211	2347	157	1865
552	Sup	15	303	-	819	-
551	Inf	27	218	1562	138	Arrêté
550	Inf	31	389	3893	770	3002
496	Sup	15	65	-	34.4	-
495	Inf	31	389	-	311	-
539	Sup	10	375	-	246	-

Tableau 2 : Concentration moyenne en NaCl depuis 2011 dans les aquifères inférieur et supérieur au niveau de la zone d'étude (mesures effectuées dans 17 piézomètres).

Porosité totale (%)	Résistivité aquifère (ohm.m)	Résistivité de l'eau (ohm.m)	Conductivité de l'eau (μS/cm)	Concentration NaCl (mg/l)
20	75	14	714	476
20	100	19	526	341
20	150	28	357	224
20	200	37	270	166
20	250	46	217	131
20	300	55	182	108
20	350	64	156	91
15	75	8.8	1136	788
15	100	12.7	787	529
15	150	19	526	341
15	200	25	400	253
15	250	32	312	194
15	300	38	263	161
15	350	44	227	137
10	75	5.3	1886	1367
10	100	7.5	1333	938
10	150	11.2	893	606
10	200	15	667	441
10	250	18.7	535	347
10	300	22.5	444	284
10	350	26	385	243

Tableau 3 : Estimation à partir des coupes de résistivité inversée de la porosité totale moyenne des aquifères inférieur et supérieur.

Le Tableau 3 montre que la porosité totale de l'aquifère (inférieur ou supérieur), calculée (loi d'Archie) en partant d'une résistivité d'aquifère comprise entre 75 et 350 ohm.m (zone non polluée) et une concentration de 150 mg/l de NaCl serait comprise entre **15 et 20 %**.

Dans le cas d'une roche saturée, ARCHIE a établi une relation expérimentale liant la résistivité de la roche à la porosité et à la résistivité de l'eau d'imbibition. La loi d'Archie :

$$\rho_r = \rho_w * a * \emptyset^{-m}$$

ρ_r = résistivité de la formation saturée,

ρ_w = résistivité de l'eau d'imbibition,

$\emptyset$ = porosité,

a = facteur qui dépend de la lithologie et qui varie entre 0,6 et 2 ($a < 1$ pour les roches à porosité intergranulaire 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).

Limites de la loi d'Archie : Cette loi ne s'applique pas rigoureusement pour les formations argileuses à cause de deux phénomènes secondaires (ionisation de certains minéraux argileux, conductibilité superficielle). Elle n'est applicable que dans le cas de formations saturées en eau.

Les paramètres classiquement admis pour une formation alluvionnaire sont $a = 0,67$ et $m = 1,3$.

La loi d'Archie permet donc, en partant de la résistivité de l'aquifère (fournis par les coupes de résistivité inversée) et de la porosité (comprise entre 15 et 20 %), de calculer la résistivité (ou conductivité) de l'eau de formation qui sera ensuite convertie en concentration NaCl suivant la relation présentée sur l'illustration 12.

4.2.2. Concentration en NaCl dans la nappe de l'aquifère supérieur

L'illustration 13 présente une carte de la salure de l'aquifère supérieur établie en 2012 à partir des mesures de concentration en NaCl effectuées dans les piézomètres.

Les coupes inversées des panneaux électriques P1, P2 et P3 (illustrations 8, 9 et 10) ne présentent aucune anomalie conductrice au sein de l'horizon géo-électrique correspondant à l'aquifère supérieur. La résistivité de cet aquifère est relativement homogène sur l'ensemble du transect et s'établit aux environs de 300 ohm.m. Comme le montre le Tableau 3, une résistivité de formation de l'ordre de 300 ohm.m correspond à une concentration en NaCl d'environ 150 mg/l (161 mg/l exactement). Cette valeur de 150 mg/l correspond à une concentration en NaCl considérée comme normale (Tableau 2) sur la zone d'étude.

Les mesures de salinité effectuées au sein de l'aquifère supérieur (à 12 m de profondeur) dans le piézomètre 04131X547 confortent cette interprétation. La concentration moyenne depuis 2011 (20 mesures) dans ce piézomètre est de 128 mg/l.

Ces résultats entraînent des modifications de la cartographie de la salure de l'aquifère supérieur qui faisait passer un panache de pollution (concentration NaCl > 500 mg/l) sur l'extrémité nord du panneau électrique P1 connectant ainsi la langue salée issue des terrils Amélie à celle issue des terrils Anna.

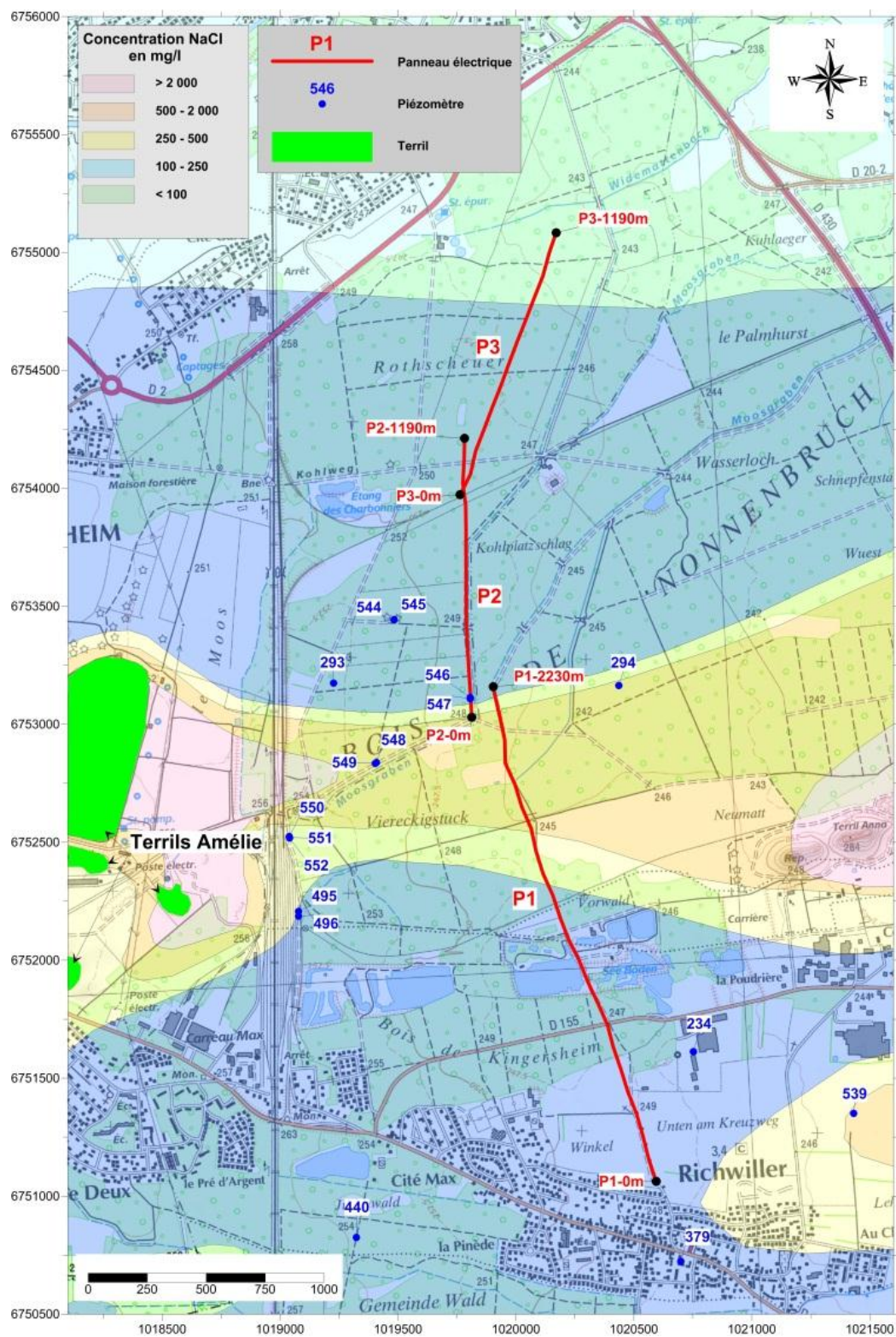


Illustration 13 : Cartographie des concentrations en chlorures dans l'aquifère supérieur.

4.2.3. Concentration en NaCl dans la nappe de l'aquifère inférieur

L'illustration 14 présente une carte de la salure de l'aquifère inférieur établie en 2012 à partir des mesures de concentration en NaCl effectuées dans les piézomètres.

Sur les coupes de résistivité inversée (illustrations 8, 9 et 10), l'excellent calage de l'interface géo-électrique correspondant à la base de l'aquifère inférieur (toit du substratum) issues des données BRAR a permis d'individualiser deux anomalies conductrices au sein de l'horizon géo-électrique correspondant à l'aquifère inférieur. Les logs géologiques des trois piézomètres profonds 04131X0548, 0546 et 0544 situés dans le secteur des anomalies conductrices confortent le calage.

Les caractéristiques de ces deux anomalies conductrices sont les suivantes :

- l'anomalie conductrice A (nommée langue salée A sur les coupes de résistivité inversée) est localisée en partie sur le panneau électrique P1 entre les abscisses 1970 et 2230 m et en partie sur P2 entre les abscisses 0 et 720 m. Son extension serait donc d'environ 800 m (longueur apparente). Sa puissance varie de 0 m sur les bordures nord et sud de son emprise à environ 15 m au niveau de l'abscisse P2/250 m. La résistivité de cette anomalie conductrice est comprise entre 3,5 et 10 ohm.m avec une moyenne qui s'établit aux environs de 4 ohm.m.

Compte tenu du fait que la résistivité normale de l'aquifère inférieur est de l'ordre de 300 ohm.m, cette anomalie conductrice à 4 ohm.m correspondrait donc à une langue salée. Si l'on se réfère à la procédure décrite en section 4.2.1. et au Tableau 4, la concentration en NaCl au niveau de cette langue salée A serait comprise entre 11 000 et 17 000 mg/l avec une valeur probable (porosité à 17,5 %) de l'ordre de 14 000 mg/l (valeurs surlignées en jaune dans le tableau 4). Cette interprétation est bien confortée par les mesures de salinité effectuées dans les piézomètres 0431X0546 (11 000 mg/l à 33 m de profondeur) et 0431X0293 (16 000 mg/l à 35 m de profondeur) ;

- l'anomalie conductrice B (nommée langue salée B sur les coupes de résistivité inversée) est localisée exclusivement sur le panneau électrique P1 entre les abscisses 1 650 et 2 100 m. Elle a donc une longueur apparente de 450 m. Sa puissance varie de 0 à 7 m, la valeur maximale étant localisée à l'aplomb de l'abscisse 1950 m. La résistivité de cette anomalie conductrice est comprise entre 10 et 30 ohm.m avec une moyenne qui s'établit aux environs de 20 ohm.m.

Comme précédemment, cette anomalie conductrice peut être assimilée à une langue salée. La procédure décrite en section 4.2.1. et le Tableau 5 permettent d'estimer la concentration en NaCl au niveau de la langue salée B, elle serait comprise entre 2 000 et 3 000 mg/l avec une valeur probable (porosité à 17,5 %) aux environs de 2 500 mg/l (valeurs surlignées en jaune dans le tableau 5). Aucune mesure de salinité en forage ne permet de conforter cette interprétation. On peut seulement noter que le piézomètre 0431X0548 au niveau duquel la concentration en NaCl dans l'aquifère inférieur est de 181 mg/l serait situé sur la limite sud de l'extension de la langue salée B.

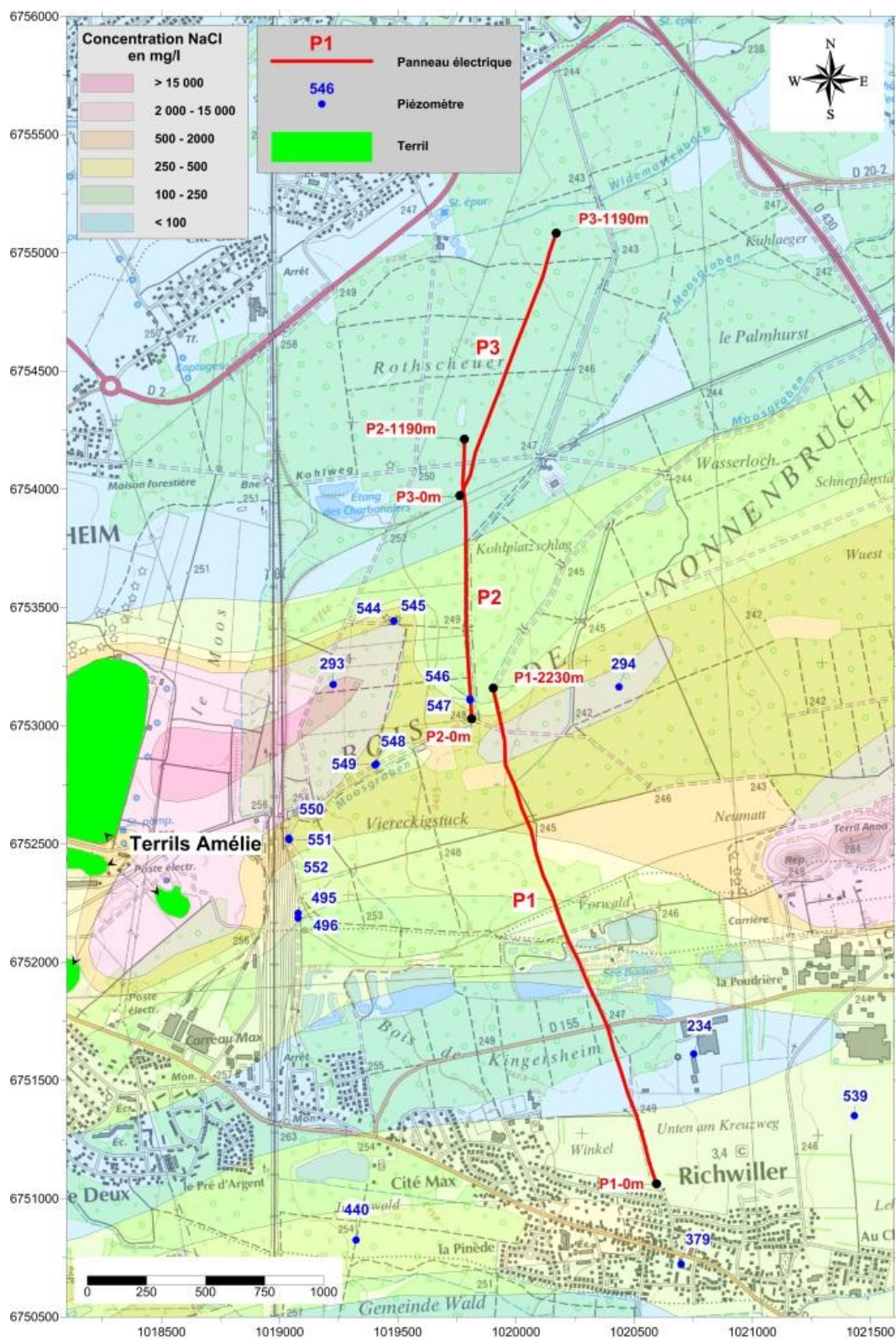


Illustration 14 : Cartographie des concentrations en chlorures dans l'aquifère inférieur.

Porosité totale (%)	Résistivité aquifère inf. (ohm.m)	Résistivité de l'eau (ohm.m)	Conductivité de l'eau (µS/cm)	Concentration NaCl (mg/l)
20	3.5	0.65	15384	13 368
20	4	0.75	13333	11 463
20	5	0.92	10869	9 165
20	6	1.1	9090	7 548
20	8	1.5	6666	5 388
20	10	1.85	5405	4 290
17.5	3.5	0.55	18182	16 029
17.5	4	0.63	15873	13 830
17.5	5	0.78	12820	10 966
17.5	6	0.93	10753	9 058
17.5	8	1.25	8000	6 569
17.5	10	1.55	6452	5 200
10	3.5	0.45	22222	19 934
10	4	0.51	19607	17 399
10	5	0.64	15625	13 595
10	6	0.76	13157	11 280
10	8	1	10000	8 371
10	10	1.25	8000	6 569

Tableau 4 : Détermination au niveau de la langue salée A de la concentration en NaCl en fonction de la résistivité de l'aquifère inférieur et de différentes hypothèses de porosité.

Porosité totale (%)	Résistivité aquifère inf. (ohm.m)	Résistivité de l'eau (ohm.m)	Conductivité de l'eau (µS/cm)	Concentration NaCl (mg/l)
20	10	1.85	5405	4 290
20	15	2.8	3571	2 735
20	20	3.7	2702	2 020
20	25	4.6	2174	1 595
20	30	5.6	1786	1 288
17.5	10	1.55	6452	5 200
17.5	15	2.35	4255	3 308
17.5	20	3.1	3225	2 449
17.5	25	3.9	2564	1 908
17.5	30	4.7	2127	1 558
10	10	1.25	8000	6 569
10	15	1.9	5263	4 168
10	20	2.5	4000	3 093
10	25	3.2	3125	2 366
10	30	3.8	2632	1 963

Tableau 5 : Détermination au niveau de la langue salée B de la concentration en NaCl en fonction de la résistivité de l'aquifère inférieur et de différentes hypothèses de porosité.

Sur l'ensemble du transect et en dehors des deux zones anormales A et B, la résistivité de l'aquifère inférieur comme celle de l'aquifère supérieur s'établit aux environs de 300 ohm.m ce qui confère à la nappe une concentration en NaCl de l'ordre de 150 mg/l.

4.3. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Les principaux résultats des investigations géophysiques sont synthétisés sur l'illustration 15. Ces résultats sont les suivants :

- mise en évidence d'une première langue salée (A) au sein de l'aquifère inférieur. Cette langue salée, d'une largeur d'environ 800 m aurait une concentration en NaCl de l'ordre de 14 000 mg/l. Elle occuperait le fond d'un paléo-chenal creusé dans le substratum (données BRAR). Les mesures de salinité effectuées dans les piézomètres 0431X0546 et 0431X0293, qui sont situés sur le flanc sud du paléo-chenal, confortent cette interprétation ;
- une deuxième langue salée (B) affectant également l'aquifère inférieur a été mise en évidence sur la bordure sud de la première langue salée A. Géomorphologiquement, elle est donc située sur le flanc sud du paléo-chenal. Sa largeur réelle serait d'environ 250 m et la concentration en NaCl de l'ordre de 2 500 mg/l ;
- mise en évidence de la présence d'un diapir de sel qui serait également localisé sur l'axe présumé de paléo-chenal bien que cela semble contradictoire. La mise en place de ce paléo-chenal ainsi que celle du diapir sont probablement contrôlées par la présence d'une faille majeure ;
- d'après les coupes de résistivité inversée, il n'y aurait à priori pas de connexion entre la nappe salée (origine naturelle) coiffant le dôme de sel et la langue salée A (origine anthropique). Cette interprétation est valable au droit du transect géophysique mais ne peut être extrapolée de part et d'autre de ce transect ;
- au niveau de la zone d'étude, l'aquifère supérieur ne semble plus être impacté par la pollution salée issue des terrils Amélie ;
- l'horizon semi-perméable qui sépare l'aquifère supérieur et l'aquifère inférieur est localement caractérisé par une résistivité très faible ($< 10 \text{ ohm.m}$). Les zones à faible résistivité sont approximativement corrélées avec les langues salées A et B. Ce caractère très conducteur pourrait donc être dû à des imprégnations résiduelles de saumure laquelle aurait été piégée dans les argiles lors de son passage de l'aquifère supérieur vers l'aquifère inférieur.

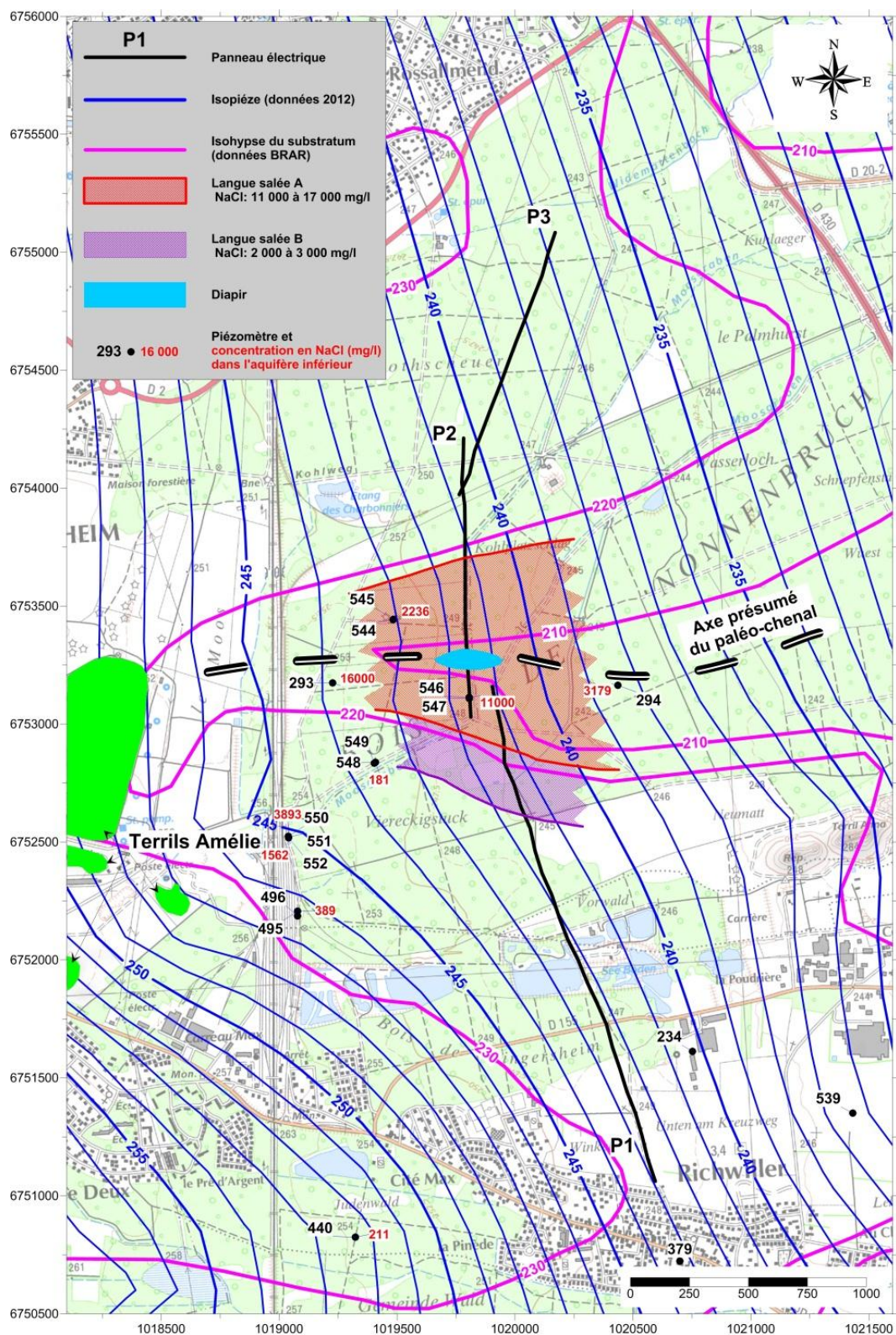


Illustration 15 : Carte de synthèse des résultats.

5. Conclusion et recommandations

Les résultats de cette étude géophysique ont permis au niveau de la zone d'étude d'améliorer la connaissance tant d'un point de vue géologique et hydrogéologique que d'un point de vue pollution de la nappe.

D'un point de vue géologique et hydrogéologique, les résultats sont les suivants :

- confirmation de la présence de deux aquifères superposés, d'origine alluvionnaire, séparés par un horizon semi-perméable de faible épaisseur qui contrairement aux informations issues de BRAR, semble être relativement continu ;
- confirmation de la côte du toit du substratum montrant que dans ce secteur les données BRAR sont fiables. La profondeur moyenne de cette interface au niveau du transect géophysique est de 25 à 35 m ;
- mise en évidence d'une structure de type diapir de sel présente dans l'axe d'un paléo-chenal creusé dans le substratum marneux. Ce dôme de sel est également positionné dans l'axe de la langue salée issue des terrils Amélie mais à une profondeur plus importante. L'apex de ce diapir se situerait à une profondeur de l'ordre de 45 m et serait coiffé d'une nappe salée.

D'un point de vue pollution par les chlorures, les résultats de l'étude géophysique sont les suivants :

- aucune anomalie de conductivité de l'eau n'a été mise en évidence dans l'aquifère supérieur. La concentration moyenne en chlorure serait de l'ordre de 150 mg/l ce qui est quand même deux fois plus élevé que la concentration normale qui est, pour l'aquifère alluvial du Rhin, de l'ordre de 75 mg/l ;
- l'horizon semi-perméable qui sépare l'aquifère supérieur et l'aquifère inférieur est localement caractérisé par une résistivité très faible qui pourrait être en relation avec des imprégnations résiduelles de saumure piégée dans les argiles lors de son passage de l'aquifère supérieur vers l'aquifère inférieur ;
- mise en évidence d'une zone à forte concentration en chlorure (11 000 à 17 000 mg/l) dans l'aquifère inférieur. Les caractéristiques géométriques de cette langue salée sont : largeur 750 m, puissance maximale 15 m. D'après la carte du toit du substratum (données BRAR), cette langue salée occuperait le fond d'un paléo-chenal creusé dans le substratum. Ce paléo-chenal aurait une direction E-W et passerait à l'extrémité nord du terri Amélie ;
- mise en évidence, toujours dans l'aquifère inférieur, d'une deuxième langue salée dont la concentration en chlorure est moins importante (2 000 à 3 000 mg/l). Elle est située sur la bordure sud de la première langue salée (flanc sud du paléo-chenal). Ces caractéristiques géométriques sont les suivantes : largeur 250 m, puissance maximale 5 à 6 m ;

- dans l'aquifère inférieur et en dehors des deux langues salées, la concentration moyenne en chlorure serait de l'ordre de 150 mg/l, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que dans l'aquifère supérieur ;
- les variations de résistivité du substratum marneux (plus conducteur au sud qu'au nord) pourraient être en relation avec la présence actuelle ou historique de la branches méridionale (terril Joseph Else) et de la branche septentrionale (Terril Amélie) de la langue salée Est. En effet, dans la partie sud, les eaux saumâtres présentent dans l'aquifère inférieur ont pu imprégner la partie sommitale du substratum caractérisée par une faible résistivité alors que dans la partie nord, où historiquement il n'y a jamais eu de pollution par les chlorures, la résistivité du substratum est plus élevée.

Si d'autres opérations géophysiques devaient être initiées sur la même problématique, l'expérience acquise lors de cette étude permettra d'optimiser les procédures d'intervention.

Les recommandations pour la réalisation d'éventuelles futures campagnes géophysiques pourraient être les suivantes :

- présence sur le profil électrique de un ou plusieurs sondages ayant atteint avec certitude le toit du substratum afin de valider la carte de toit du substratum issue des données BRAR sur l'ensemble du secteur d'étude. Cette connaissance indispensable pour l'interprétation en termes de pollution par les chlorures (discrimination entre les faibles résistivités du substratum et les faibles résistivités de l'aquifère pollué) permettra également de mieux fixer la profondeur d'investigation optimale des panneaux électriques ;
- mesure d'un log de conductivité de l'eau dans les piézomètres situés à proximité des panneaux électriques en début d'intervention ;
- mesure d'un log de conductivité/résistivité des formations intersectées par les piézomètres ;
- dans le cas où il y aurait une incertitude sur la localisation du toit du substratum (donnée indispensable pour l'interprétation des coupes de résistivité), il faudrait prévoir la réalisation d'un profil sismique HR sur le même tracé que le profil électrique. Lors des investigations géophysiques réalisées dans le cadre du projet INTERREG II, cette méthode a donné d'excellents résultats en ce qui concerne la localisation du toit du substratum ;
- la méthode RMP a été mise en œuvre à plusieurs reprises sur cette problématique de contamination de la nappe du Rhin par les chlorures en aval des terrils. L'objectif de cette méthode était la discrimination entre les anomalies conductrices dues à la présence de matériaux argileux et celles dues à une forte concentration en chlorure. Les résultats sont très mitigés pour au moins deux raisons :
 - dans le cas d'aquifères superposés, comme c'est le cas ici, seul la caractérisation de l'aquifère supérieur est fiable,
 - la zone d'extension des panaches de pollution est située dans une zone très urbanisée où les conditions de bruit électromagnétique sont très défavorables et limitent les possibilités d'application de la méthode.

6. Bibliographie

Archie G.E. (1942) - The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Tran. AIME*, 146, p. 54-67.

Dupont F., Miehé J.M. (2005) - Contrôle de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace en aval du bassin potassique. Campagne géophysique 2005. Répétition des profils 3 Ouest, 3 Est et 4. Compléments de mesures sur le secteur Ungersheim Nord. BRGM/RP-54121-FR, 82 p., 20 ill., 5 ann.

Loke M. H., Barker R.D. (1996) - Rapide least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44, p. 131-152.

Miehé J.M. (2002) - Caractérisation hydrodynamique de la nappe d'Alsace au droit d'une salure par méthodes géophysiques. BRGM/RP-51779-FR, 103 p., 25 fig., 3 tabl., 2 ann.

Miehé J.M. (2003) - Compléments de mesures géophysiques. Langue salée ouest de la nappe d'Alsace. BRGM/RP-52169-FR, 56 p., 6 fig., 2 tabl., 4 ann.

Miehé J.M. (2003) - Mesures géophysiques par méthodes électriques sur la langue salée est en aval du bassin potassique. BRGM/RP-52329-FR, 29 p., 10 fig., 1 tabl.

Miehé J.M. (2004) - Contrôle de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace en aval du bassin potassique. Complément de mesures géophysiques par méthodes électriques. BRGM/RP-53126-FR, 33 p., 12 ill.

Miehé J.M. (2005) - Contrôle de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace en aval du bassin potassique. Campagne d'automne 2004. Compléments de mesures électriques sur les secteurs d'Ensisheim, d'Ungersheim et du Hettenschlag. BRGM/RP-53907-FR, 22 p., 13 ill.

Miehé J.M. (2007) - Contrôle de la salinité de la nappe phréatique d'Alsace en aval du bassin potassique. Campagne géophysique 2007. Aval de terrils et anomalies. Rapport final. BRGM/RP-55197-FR, 57 p., 18 ill., 2 ann.

Galan C. (2011) - Mines De Potasse d'Alsace (68). Réalisation de logs salinométriques de part et d'autre des terrils Marie-Louise, Alex, Rodolphe, Amélie 1, Anna et Ensisheim. INERIS/DRS-11-116791-02497A, 37 p., 16 ill., 9 tab.

Elsass P. en collaboration avec Wirsing G. (1999) - INTERREG II. Inventaire de la qualité des eaux souterraines dans la vallée du Rhin supérieur. Etudes géophysiques et piézomètres profonds. BRGM/R 40585, 40 p., 11 ill., 4 tab., 4 ann.

Elsass P. (2005) - Étude géophysique des langues salées du bassin potassique. Synthèse des travaux 2002-2005. Rapport BRGM/RP-54275-FR, 52 p., 25 ill.

Annexe 1

Principe de la méthode du panneau électrique

La tomographie électrique (ERT pour Electrical Resistivity Tomography) est une méthode géophysique permettant d'obtenir la distribution de la résistivité électrique des matériaux (roches ou structures) en profondeur (2D et 3D selon le dispositif d'acquisition mis en place) à partir de mesures de potentiel électrique en surface. Les termes «panneau électrique» ou «tomographie électrique» sont utilisés pour qualifier une prospection électrique (initialement basée sur quatre électrodes) automatisée le long d'un profil multi-électrodes (2D) ou sur une surface (3D). Ce type d'acquisition présente l'avantage de fournir des résultats fiables en 2D ou 3D, et d'être rapidement mis en œuvre.

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 1).

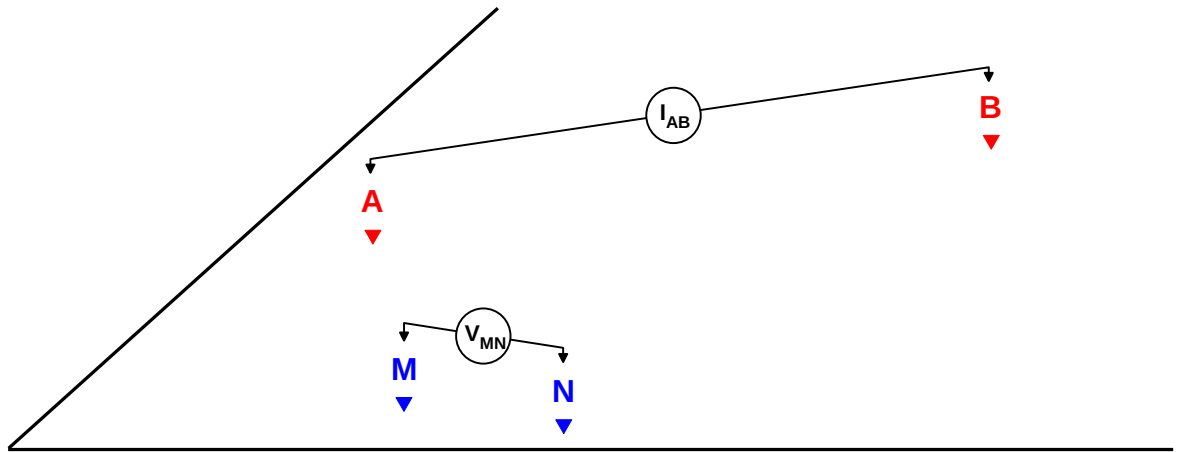


Figure 1 : Principe de la mesure en courant électrique continu.

À 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 2) :

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

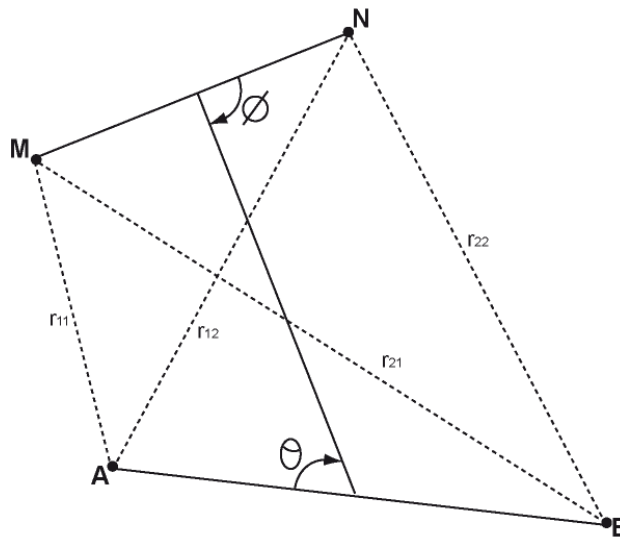


Figure 2 : Disposition générale d'électrodes où A et B sont les électrodes de courant, M et N, les électrodes de potentiel ($0 < \theta, \Phi < \pi$).

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.

Dispositifs d'électrodes / configurations d'acquisition

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 équipotentiels 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 3).

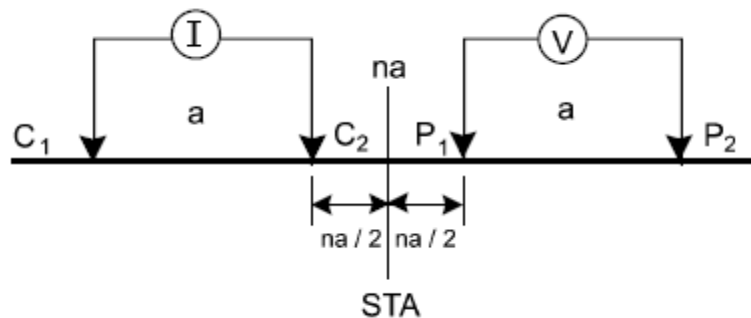


Figure 3 : Configuration dipôle-dipôle.

Le dispositif Schlumberger est plus intégrant et, de ce fait, plus sensible aux effets latéraux. 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 grâce à un meilleur rapport signal/bruit (figure 4).

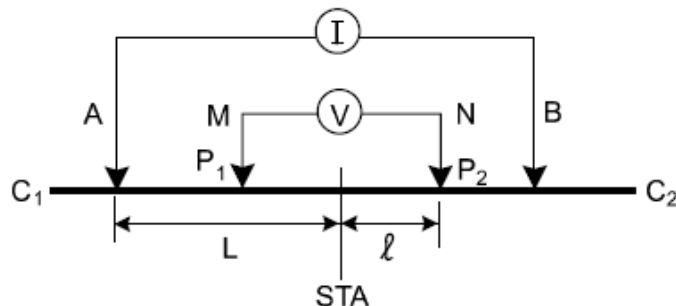


Figure 4 : Configuration de Schlumberger.

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 5).

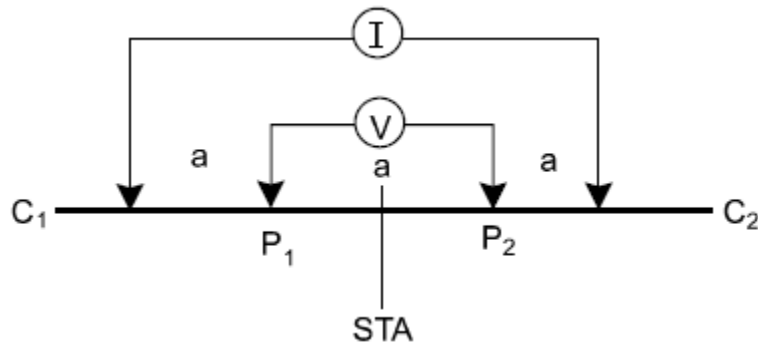


Figure 5 : Configuration de Wenner.

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 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 6).

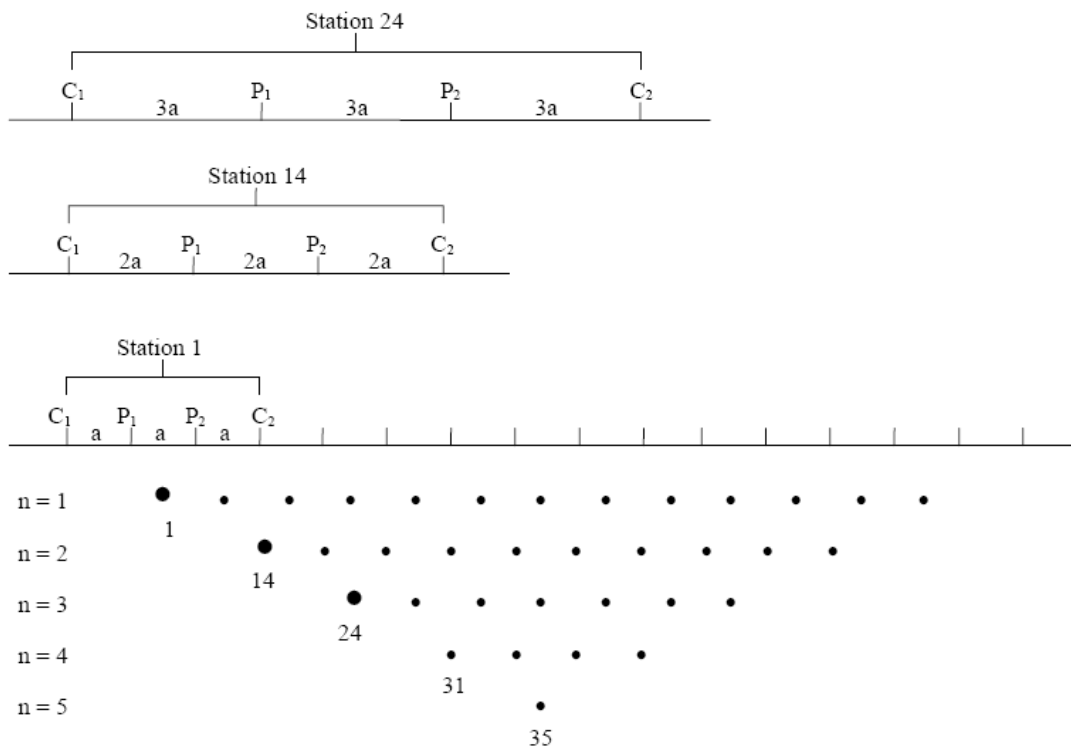


Figure 6 : Principe de construction d'une pseudo-section pour un dispositif Wenner.

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 7). Cette étape est réalisée à l'aide du logiciel Res2DInv (Loke & Barker). 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 8).

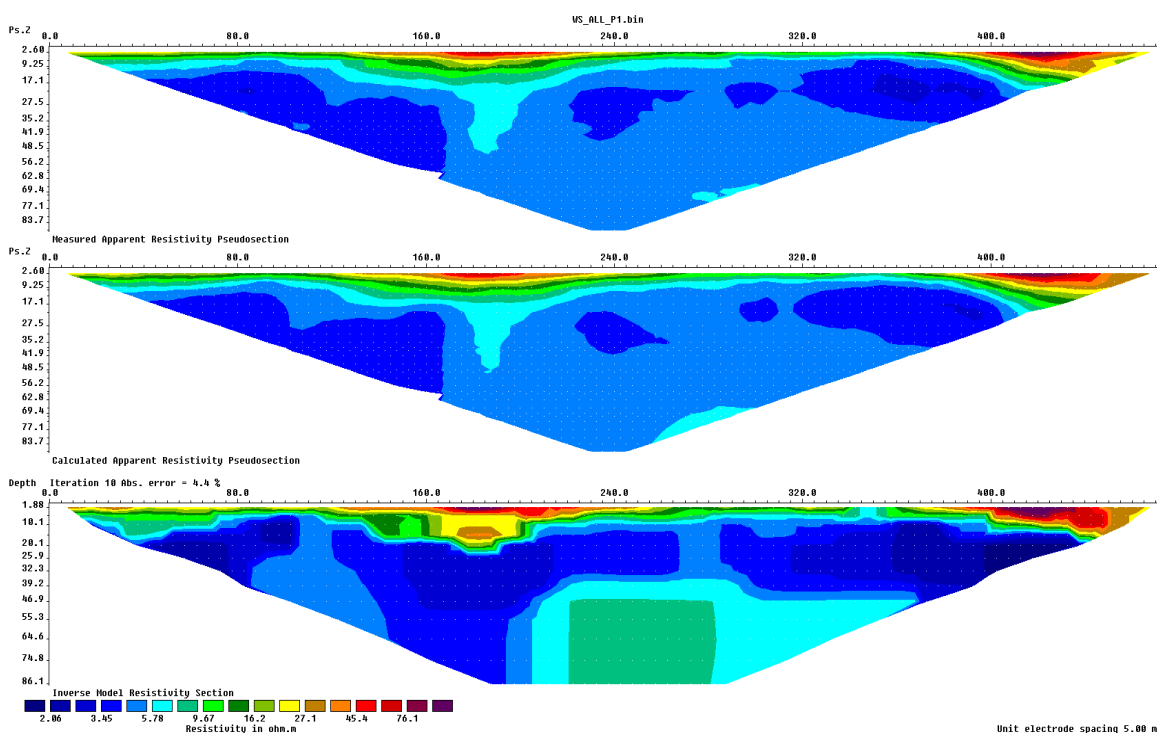


Figure 7 : Résultats complets (en images) d'une inversion.

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,).

La section de résistivité « vraie » (illustration du bas de la figure 7), 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 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.

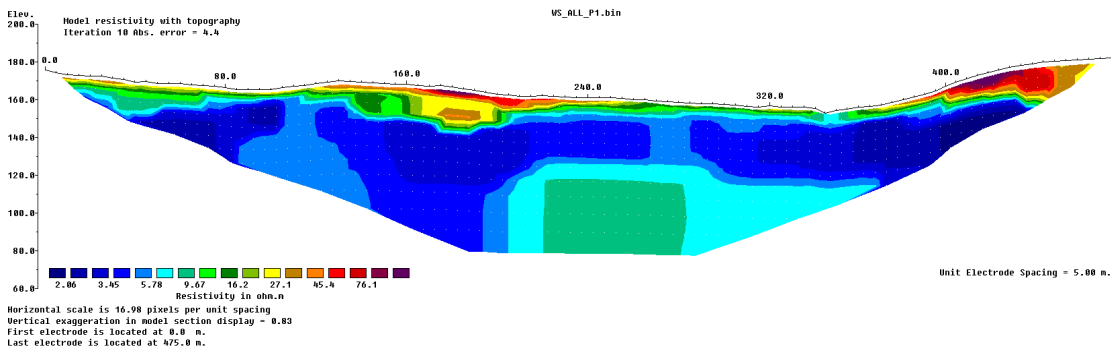


Figure 8 : Résultat de l'inversion de la figure 7 avec la topographie.

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

Quelles que soient les performances des algorithmes de convergence, en l'absence d'étalonnage (résistivité étalonnée, profondeur des interfaces géo-électriques) 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).

Applications

La tomographie électrique proche surface (< 100 m) s'applique globalement à toutes les sciences environnementales dans des domaines divers et variés :

- hydrogéologie (épaisseur d'aquifère), profondeur du substratum, identification d'invasions salines en milieu côtier ;
- volcanologie : identification des zones de fortes altérations hydrothermales ;
- géologie : identification de contact géologique ou tectonique ;
- environnement : suivi de panache de contamination dans le sol ou dans un aquifère ;
- risques naturels : délimitation de la base de glissements de terrain ;
- dans le domaine minier (associée à des mesures de polarisation provoquée (PP)), pour mettre en évidence des corps minéralisés ;
- en archéologie pour l'identification de structures enterrées ;
- risques naturels : recherche de cavité en proche surface ;
- géotechnique : qualité de fondations.

Annexe 2

Coordonnées X, Y, Z de certaines stations de mesure sur les profils P1, P2 et P3.

Profil 1			
X	Y	Z	Abscisse
1020594.26	6751062.03	246.146	0
1020575.05	6751107.72	246.246	50
1020562.68	6751156.29	246.621	100
1020550.41	6751204.71	247.126	150
1020538.35	6751253.82	247.507	200
1020525.65	6751302.28	247.723	250
1020510.78	6751349.77	247.958	300
1020487.96	6751393.77	248.423	350
1020474.32	6751442.01	248.108	400
1020460.13	6751489.95	247.99	450
1020444.75	6751537.3	247.98	500
1020428.87	6751584.6	247.903	550
1020412.49	6751631.6	248.205	600
1020403.27	6751679.62	248.128	650
1020387.73	6751726.03	248.363	700
1020378.91	6751755.21	247.96	730
1020370.27	6751772.06	247.982	750
1020365.63	6751782.07	248.124	760
1020356.5	6751799.87	248.017	780
1020347.58	6751816.7	248.397	800
1020325.79	6751851	248.715	840
1020321.36	6751859.06	248.837	850
1020313.85	6751878.34	248.859	870
1020305.27	6751906.51	248.775	900
1020296.7	6751936.43	248.502	930
1020289.75	6751953.96	248.249	950
1020281.37	6751972.92	248.311	970
1020267.45	6751999.45	247.948	1000
1020253.09	6752025.66	247.98	1030
1020243.74	6752043.52	247.645	1050
1020235.09	6752061.5	247.704	1070
1020222.54	6752088.28	247.297	1100
1020209.84	6752126.79	246.987	1140
1020205.24	6752135.35	247.032	1150
1020195.83	6752153.16	246.878	1170
1020189.6	6752171.64	246.727	1190
1020187	6752181.11	246.765	1200
1020178.64	6752209.98	247.113	1230
1020166.79	6752248.02	248.091	1270
1020155.53	6752276.31	247.639	1300
1020139.19	6752312.2	247.82	1340

Profil 1			
X	Y	Z	Abscisse
1020125.71	6752339.63	247.83	1370
1020114.51	6752367.32	247.81	1400
1020099.97	6752404.2	247.739	1440
1020090.35	6752432.65	247.445	1470
1020085	6752461.81	247.319	1500
1020077.44	6752500.9	246.832	1540
1020064.17	6752558.9	247.423	1600
1020044.13	6752604.96	247.079	1650
1020037.78	6752623.86	246.125	1670
1020023.93	6752651.46	245.062	1700
1020003.61	6752717.11	244.728	1770
1019996.06	6752743.74	244.953	1800
1019985.74	6752771.78	245.461	1830
1019966.66	6752807.51	245.529	1870
1019954.85	6752834.75	245.641	1900
1019951.18	6752874.38	245.527	1940
1019951.13	6752904.15	245.639	1970
1019952.23	6752934.82	245.754	2000
1019944.98	6752973.96	245.978	2040
1019937.72	6753003	246.06	2070
1019931.1	6753032.58	245.834	2100
1019922.09	6753071.35	245.986	2140
1019915.26	6753100.89	245.879	2170
1019908.87	6753130.04	246.117	2200
1019904.2	6753159.53	246.607	2230

Profil 2			
X	Y	Z	Abscisse
1019812.53	6753029.34	247.78	0
1019811.06	6753078.97	247.676	50
1019806.96	6753128.62	247.561	100
1019803.84	6753178.41	248.021	150
1019800.04	6753228.81	248.304	200
1019796.08	6753278.67	248.681	250
1019794.58	6753328.13	249.498	300
1019792.2	6753377.48	249.5	350
1019789.33	6753428.63	249.574	400
1019788.88	6753478.66	249.245	450
1019788.94	6753528.03	250.68	500
1019791.69	6753576.49	251.85	550
1019788.83	6753628.22	251.703	600
1019788.52	6753678.49	249.638	650

Profil 2			
X	Y	Z	Abcisse
1019788.06	6753728.41	249.518	700
1019788.53	6753777.59	249.1	750
1019788.02	6753828.19	248.725	800
1019787.64	6753878.38	247.863	850
1019786.58	6753928.17	248.233	900
1019787.17	6753977.58	249.023	950
1019774.43	6754022.57	248.75	1000
1019777.04	6754072.77	248.575	1050
1019780.36	6754122.98	249.947	1100
1019781.17	6754172.71	250.458	1150
1019782	6754211.91	250.458	1190

Profil 3			
X	Y	Z	Abcisse
1019763.16	6753972.82	249	0
1019776.3	6754018.48	249	50
1019806.86	6754059.69	248.206	100
1019814.83	6754109.37	248.534	150
1019828.48	6754157.18	248.527	200
1019846.07	6754204.13	248.25	250
1019864.47	6754250.26	247.964	300
1019882.24	6754296.99	247.765	350
1019899.74	6754343.88	247.627	400
1019917.61	6754390.44	247.086	450
1019936.36	6754436.25	246.972	500
1019952.78	6754483.57	247.073	550
1019970.75	6754530.49	247.268	600
1019989.7	6754576.7	247.504	650
1020005.65	6754623.73	246.865	700
1020024.59	6754669.8	246.413	750
1020042.41	6754716.41	245.993	800
1020059.32	6754763.11	246.001	850
1020078.11	6754809.44	247.396	900
1020093.61	6754856.64	244.804	950
1020114.42	6754900.71	244.8	1000
1020127.64	6754951.34	244.795	1050
1020141.16	6754999.18	246.649	1100
1020157.52	6755046.2	245.233	1150
1020170.05	6755083.71	242.797	1190

Annexe 3

Paramètres d'inversion pour Res2Dinv


```

Inversion settings
Initial damping factor (0.01 to 1.00)
0.0500
Minimum damping factor (0.001 to 0.75)
0.0100
Line search option (0=Never, 1=Sometimes, 2=Always)
2
Convergence limit for relative change in RMS error in percent (0.1 to
20)
1.0000
Minimum change in RMS error for line search in percent (0.5 to 100)
0.5000
Number of iterations (1 to 30)
7
Vertical to horizontal flatness filter ratio (0.25 to 4.0)
0.3000
Model for increase in thickness of layers(0=default 10, 1=default 25,
2=user defined)
2
Number of nodes between adjacent electrodes (2 or 4)
2
Flatness filter type, Include smoothing of model resistivity (0=model
changes only,1=directly on model)
1
Reduce number of topographical datum points? (0=No,1=Yes. Recommend
leave at 0)
0
Carry out topography modeling? (0=No,1=Yes)
1
Type of topography trend removal (0=Average,1=Least-squares,2=End to
end)
1
Type of Jacobian matrix calculation (0=Quasi-Newton, 1=Gauss-Newton,
2=Mixed)
1
Increase of damping factor with depth (1.0 to 2.0)
1.1000
Type of topographical modeling (0=None, 1=No longer supported so do
not use, 2=uniform distorted FEM, 3=underwater, 4=damped FEM, 5=FEM
with inverse Swartz-Christoffel)
0
Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)
0
Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))
0.0100
Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)
0
Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)
0.0010
Robust data constrain? (0=No, 1=Yes)
1
Cutoff factor for data constrain (0.0001 to 0.1))
0.0100

```

```

Robust model constrain? (0=No, 1=Yes)
1
Cutoff factor for model constrain (0.0001 to 1.0)
0.0010

Allow number of model parameters to exceed datum points? (0=No,
1=Yes)
1
Use extended model? (0=No, 1=Yes)
0
Reduce effect of side blocks? (0=No, 1=Slight, 2=Severe, 3=Very
Severe)
3
Type of mesh (0=Normal,1=Fine,2=Finest)
2
Optimise damping factor? (0=No, 1=Yes)
1
Time-lapse inversion constrain (0=None,1=Least-
squares,2=Smooth,3=Robust)
0
Type of time-lapse inversion method (0=Simultaneous,1=Sequential)
0
Thickness of first layer (0.25 to 1.0)
0.5000
Factor to increase thickness layer with depth (1.0 to 1.25)
1.1000
USE FINITE ELEMENT METHOD (YES=1,NO=0)
1
WIDTH OF BLOCKS (1=NORMAL WIDTH, 2=DOUBLE, 3=TRIPLE, 4=QUADRAPLE,
5=QUINTIPLE)
1
MAKE SURE BLOCKS HAVE THE SAME WIDTH (YES=1,NO=0)
1
RMS CONVERGENCE LIMIT (IN PERCENT)
1.000
USE LOGARITHM OF APPARENT RESISTIVITY (0=USE LOG OF APPARENT
RESISTIVITY, 1=USE RESISTANCE VALUES, 2=USE APPARENT RESISTIVITY)
0
TYPE OF IP INVERSION METHOD (0=CONCURRENT,1=SEQUENTIAL)
1
PROCEED AUTOMATICALLY FOR SEQUENTIAL METHOD (1=YES,0=NO)
1
IP DAMPING FACTOR (0.01 to 1.0)
0.150
USE AUTOMATIC IP DAMPING FACTOR (YES=1,NO=0)
0
CUTOFF FACTOR FOR BOREHOLE DATA (0.0005 to 0.02)
0.00100
TYPE OF CROSS-BOREHOLE MODEL (0=normal,1=halfsize)
0
LIMIT RESISTIVITY VALUES (0=No,1=Yes)
0
Upper limit factor (10-50)
20.000

```

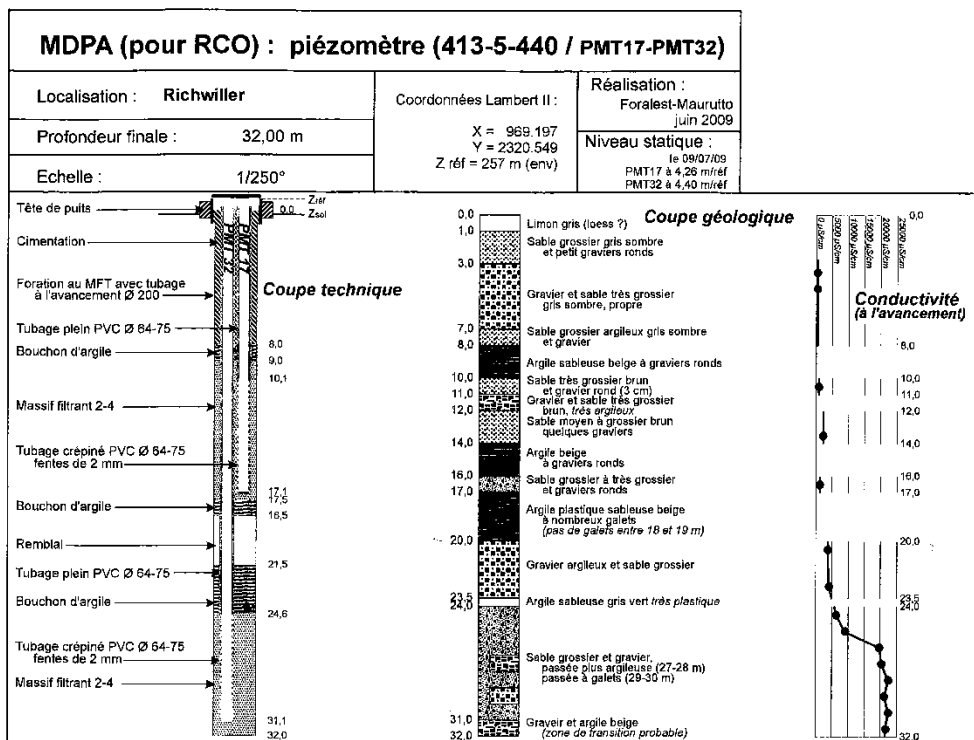

Lower limit factor (0.02 to 0.1)
 0.050
 Type of reference resistivity (0=average,1=first iteration)
 0
 Model refinement (1.0=Normal,0.5=Half-width cells)
 1.00
 Combined Combined Marquardt and Occam inversion (0=Not used,1=used)
 0
 Type of optimisation method (0=Gauss-Newton,2=Incomplete GN)
 2
 Convergence limit for Incomplete Gauss-Newton method (0.005 to 0.05)
 0.010
 Use data compression with Incomplete Gauss-Newton (0=No,1=Yes)
 0
 Use reference model in inversion (0=No,1=Yes)
 0
 Damping factor for reference model (0.0 to 0.3)
 0.05000
 Use fast method to calculate Jacobian matrix. (0=No,1=Yes)
 1
 Use higher damping for first layer? (0=No,1=Yes)
 1
 Extra damping factor for first layer (1.0 to 100.0)
 2.50000
 Type of finite-element method (0=Triangular,1=Trapezoidal elements)
 1
 Factor to increase model depth range (1.0 to 5.0)
 1.000
 Reduce model variations near borehole (0=No, 1=Yes)
 0
 Factor to control the degree variations near the boreholes are reduced
 (2 to 100)
 5.0
 Factor to control variation of borehole damping factor with distance
 (0.5 to 5.0)
 1.0
 Floating electrodes survey inversion method (0=use fixed water layer,
 1=Incorporate water layer into the model)
 0
 Resistivity variation within water layer (0=allow resistivity to vary
 freely,1=minimise variation)
 1
 Use sparse inversion method for very long survey lines (0=No, 1=Yes)
 0
 Optimize Jacobian matrix calculation (0=No, 1=Yes)
 1
 Automatically switch electrodes for negative geometric factor (0=No,
 1=Yes)
 1
 Force resistance value to be consistant with the geometric factor
 (0=No, 1=Yes)
 0
 Shift the electrodes to round up positions of electrodes (0=No, 1=Yes)
 0

Use difference of measurements in time-lapse inversion (0=No,1=Yes)
0
Use active constraint balancing (0=No,1=Yes)
0
Type of active constraints (0=Normal,1=Reverse)
0
Lower damping factor limit for active constraints
0.4000
Upper damping factor limit for active constraints
2.5000
Water resistivity variation damping factor
8.0000

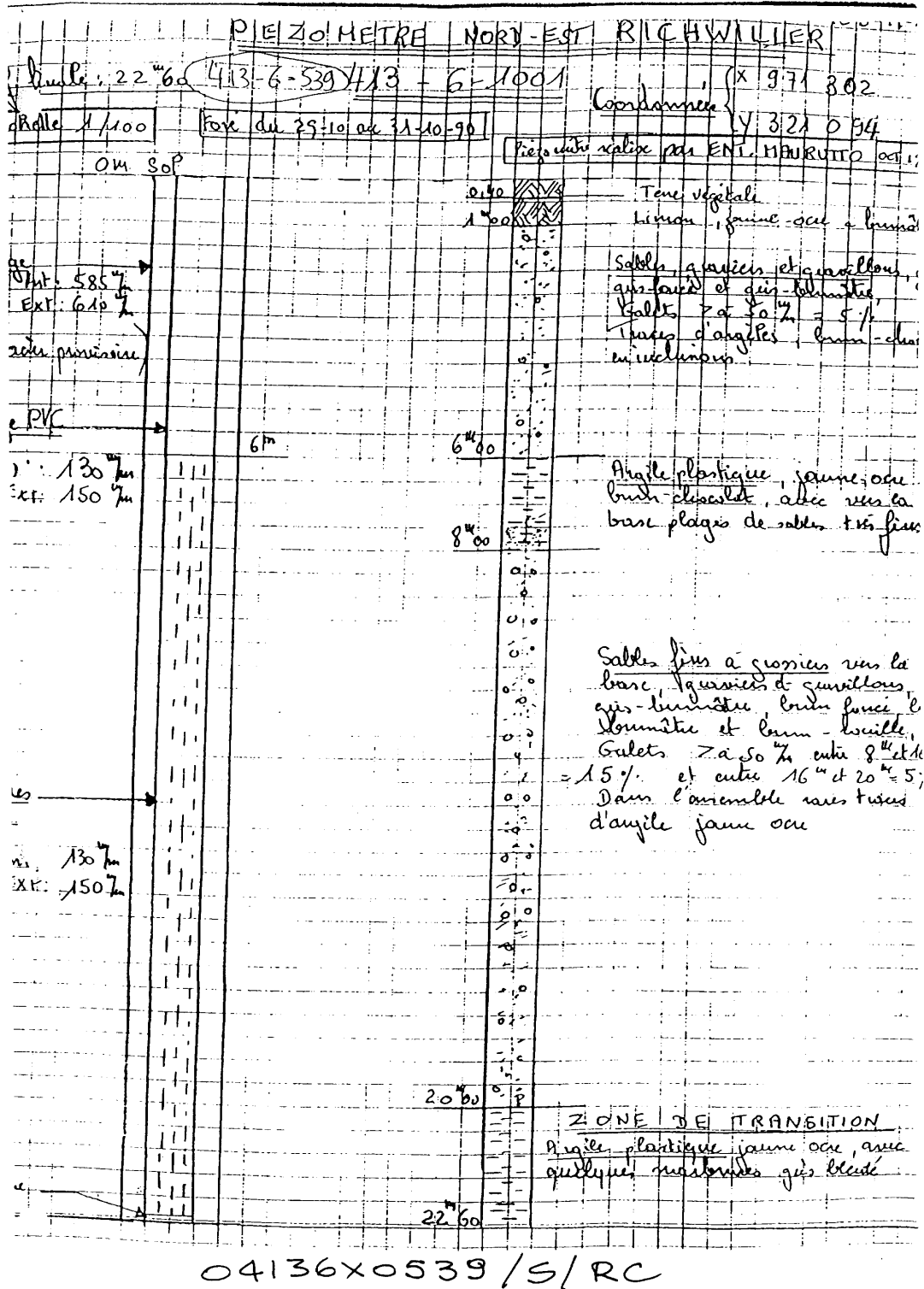
Annexe 4

Coupes géologiques des piézomètres ayant servi de calages pour l'interprétation géophysique

04135X0440



LUC JAILLARD
Ingénieur-Conseil
Mines, Géologie, Environnement



0953-02/TS MKL-JB/UB

Secteur Amélie/Max

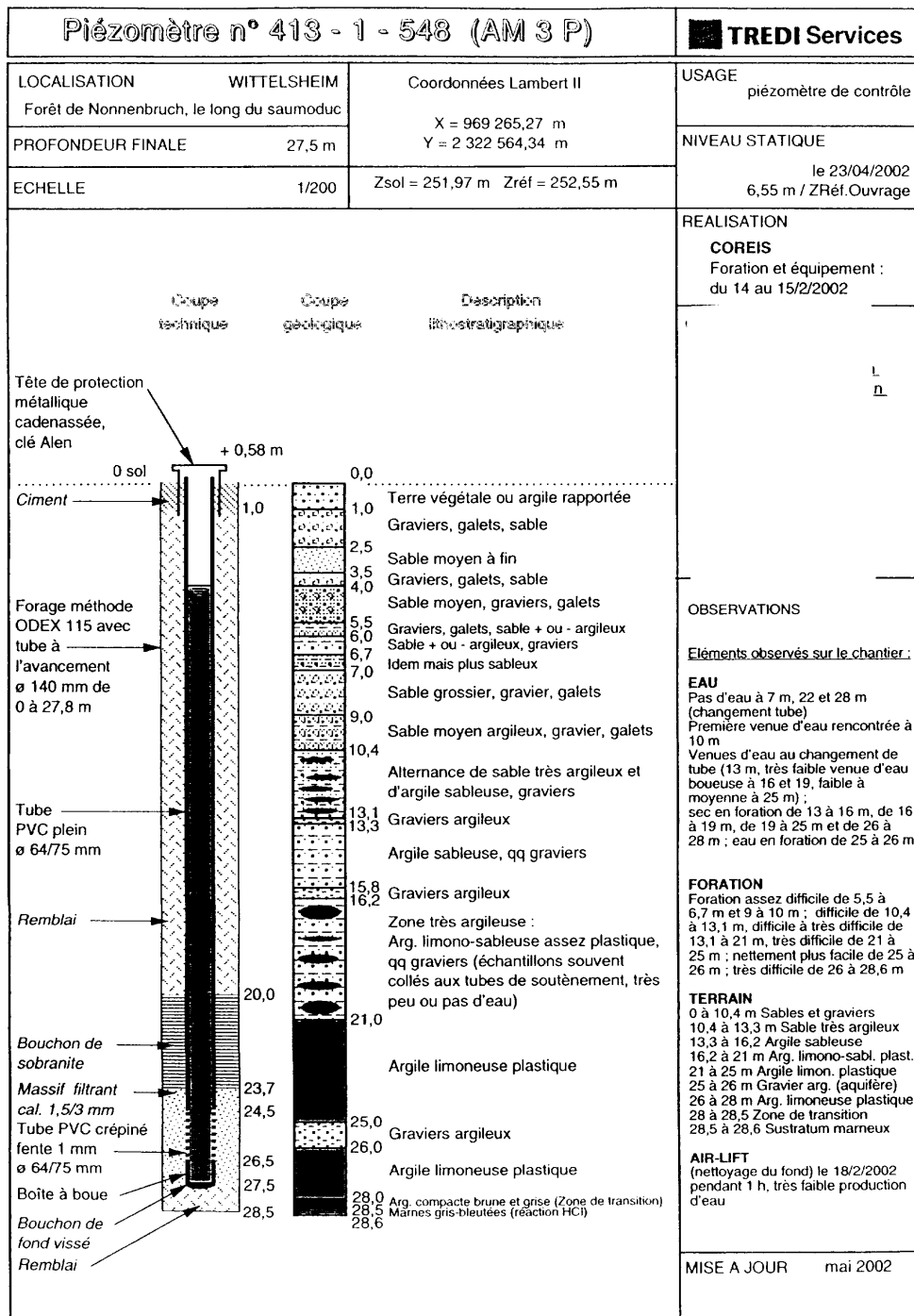


Figure 6 : Coupes technique et lithologique du piézomètre 413.1.548

04131x0548/AM3P/RC

0953-02/TS MKL-JB/JB

Secteur Amélie/Max

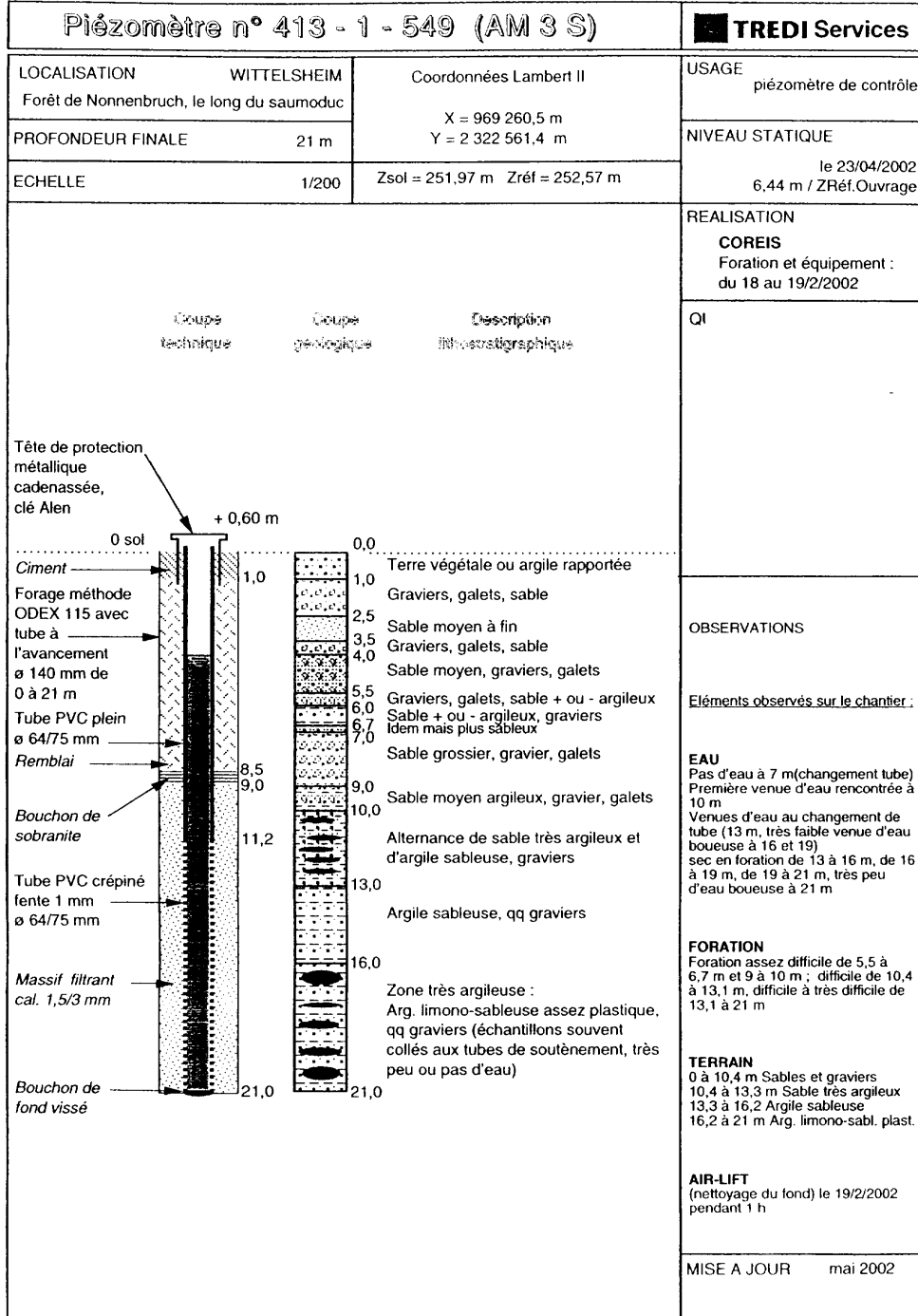


Figure 7 : Coupes technique et lithologique du piézomètre 413.1.549

04131x0549/AM3S/RC

0953-02/TS MKL-JB/JB

Secteur Amélie/Max

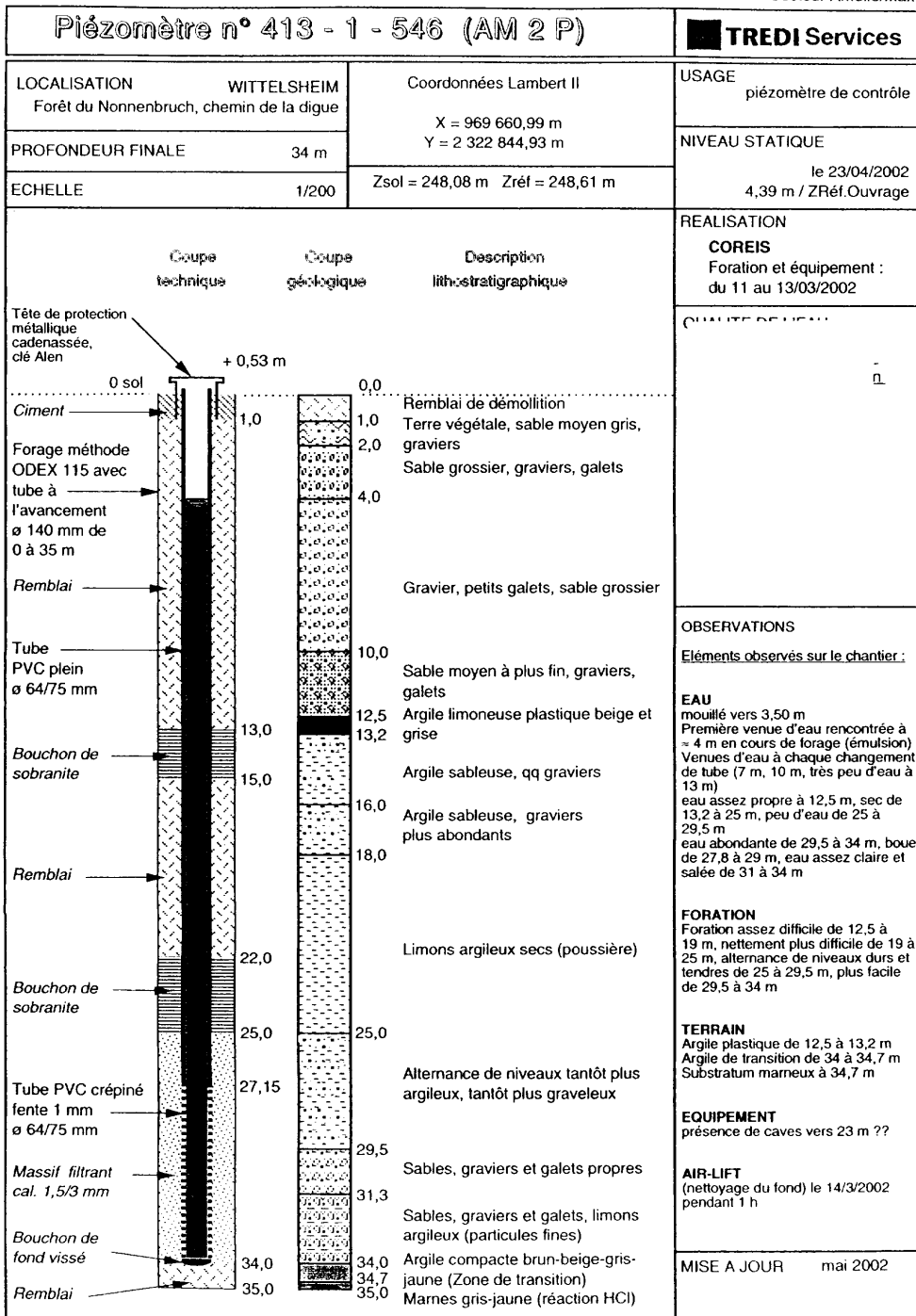


Figure 4 : Coupes technique et lithologique du piézomètre 413.1.546

04131x0546/AM2P/RC

0953-02/TS MKL-JB/JB

Secteur Amélie/Max

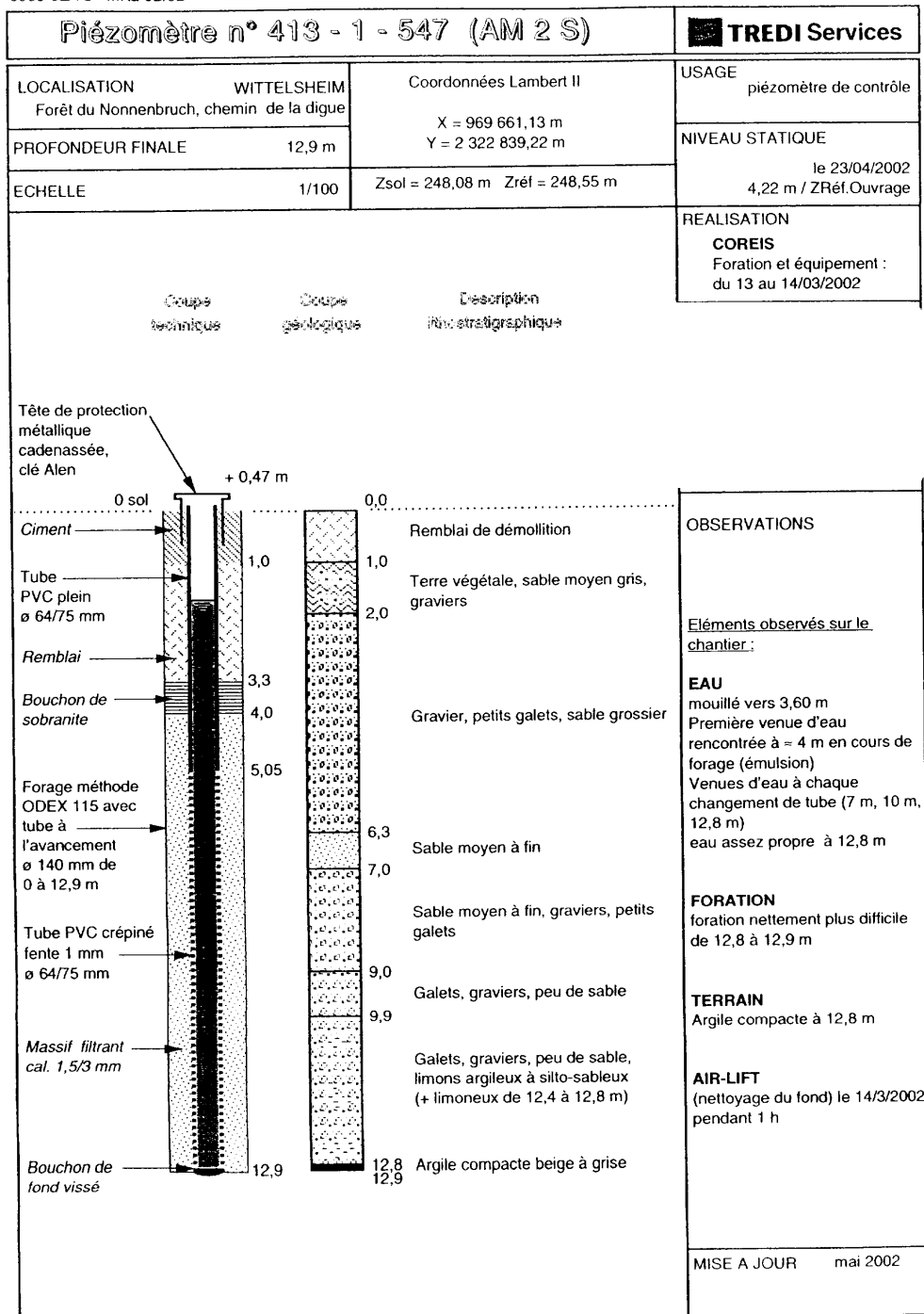


Figure 5 : Coupes technique et lithologique du piézomètre 413.1.547

04131x0547/AM2S/RC

0953-02/TS MKL-JB/JB

Secteur Amélie/Max

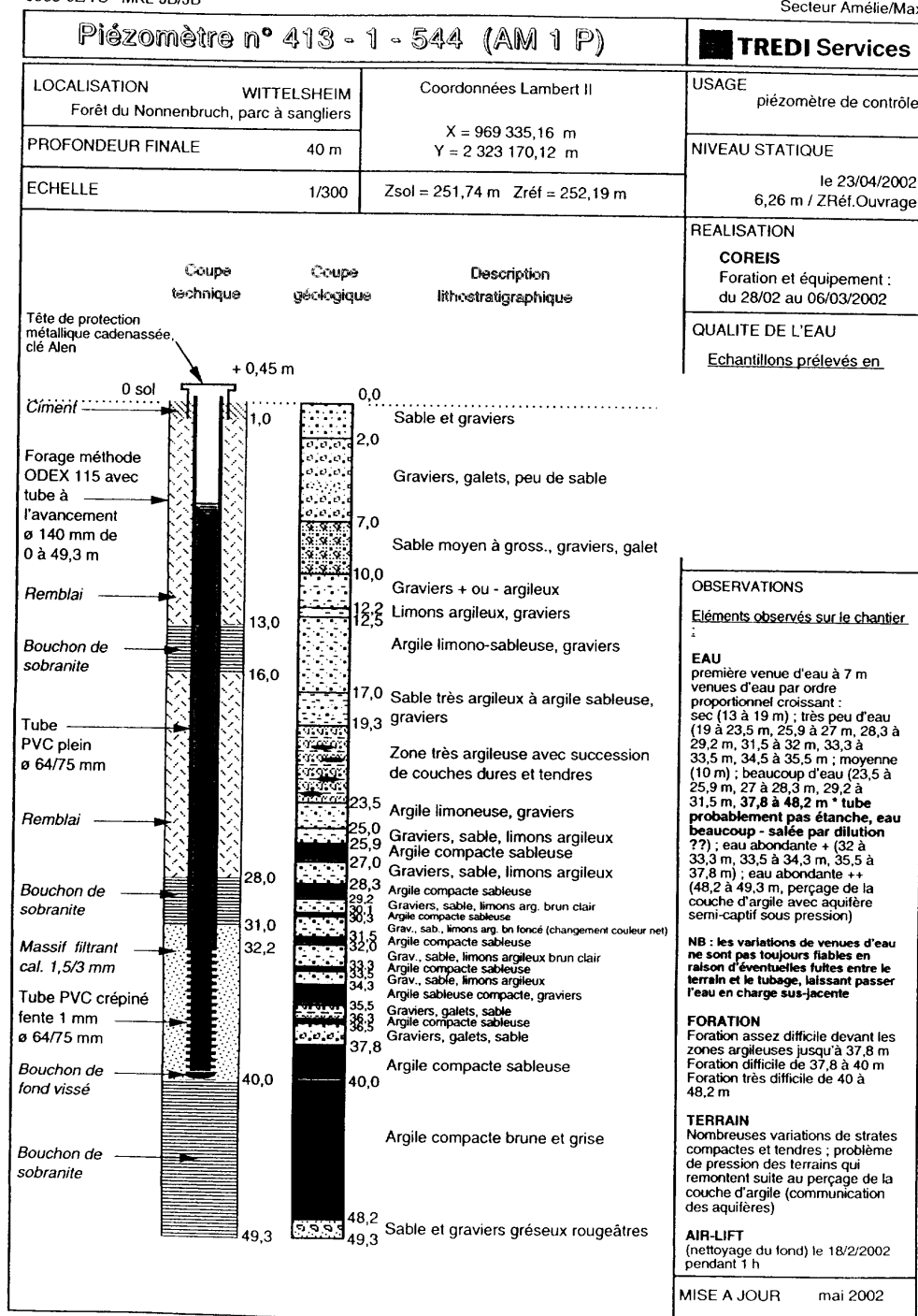


Figure 2 : Coupes technique et lithologique du piézomètre 413.1.544

04131x0544/AM1P/RC

0953-02/TS MKL-JB/JB

Secteur Amélie/Max

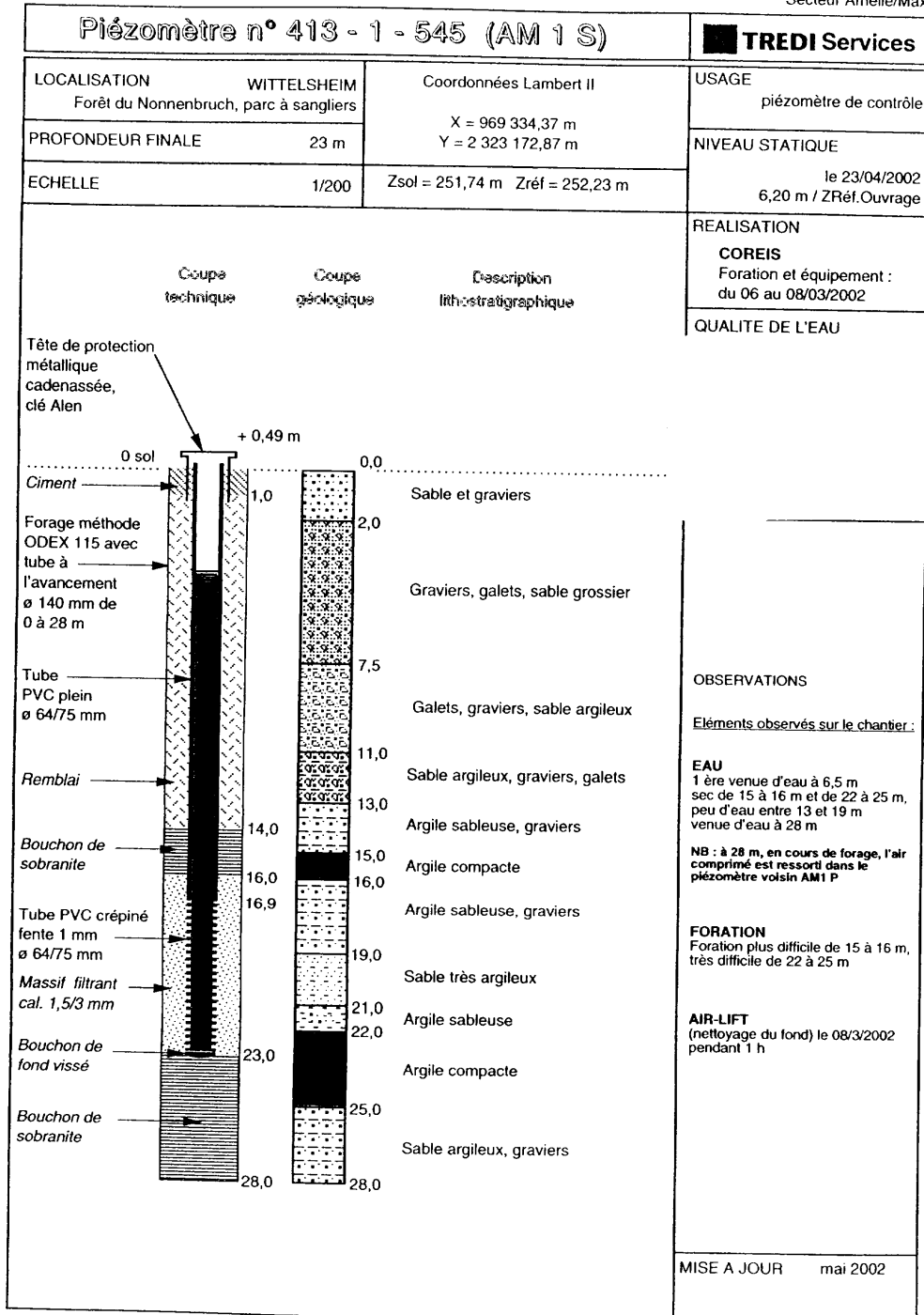


Figure 3 : Coupes technique et lithologique du piézomètre 413.1.545

04131X0545/AM1S/RC

Annexe 5

Coupes géologiques des sondages profonds ayant servi de calages pour l'interprétation géophysique



Dossier du sous-sol

04131X0045/DP18

Log validé

Profondeur

De 0.0 à 720.63 m Rafraichir

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
44.80	Alluvions Quaternaires		Alluvions. Alluvions anciennes d'origine vosgienne.	Pléistocène	203.20
	Série grise de Pechelbronn		Rupélien (Série grise).	Rupélien	
230.00 242.00	Série grise de Pechelbronn : Marnes à foraminifères		Couches à foraminifères.		18.00 6.00
400.30			Marne avec anhydrite, sel gemme. Premier sel gemme à 318m. Zone salifère supérieure.		
	Centre du bassin potassique : Zone salifère supérieure		Sel gemme et marne. Carottage continu.	Priabonien	-152.30
720.63					-472.63



Dossier du sous-sol

04131X0049/DP29

Log validé

Profondeur

De 0.0 à 875.7 m Rafraichir

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
0.30	Sol (terre végétale)		Terre végétale.	Holocène	246.70
1.00	Alluvions récentes		Galets bien roulés d'origine vosgienne, mêlés de terre végétale.	Würm	246.00
3.00	vosgiennes FzV		Sable et petits graviers avec quelques petits galets isolés.	Chattien	244.00
4.00	Alluvions würmiennes Fy		Galets de grosseur moyenne d'origine vosgienne, peu altérés, mêlés d'un peu de sable et petits graviers.		243.00
6.50	+5 - 10 (+3-4;412) (+1 - 3; 476)		Gros galets et cailloux roulés d'origine vosgienne, mêlés de sable et de graviers.		240.50
9.00			Gros galets plus altérés à la base et cailloux roulés d'origine vosgienne mêlés de sable et de graviers.		238.00
9.80	Molasse alsacienne : grès et sables parfois calcaire micacés		Argile gris-jaune, brune et blanche avec de nombreux graviers et petits galets dont quelques-uns très altérés.		237.20
12.00			Argile rouge et brune contenant de petits graviers et des galets plus ou moins altérés.		235.00
14.00			Loess jaune à roux avec des galets.		233.00
15.00			Sable plus ou moins argileux mais perméable, brun-rouge, avec graviers et galets d'origine vosgienne.		232.00
22.00			Ensemble hétérogène avec graviers, galets moyens, mêlés de sable et d'argile rougeâtre.		225.00
22.50			Argile compacte brun-jaune avec petits graviers et galets décomposés.		224.50
25.00			Graviers et galets d'origine vosgienne plus ou moins altérés avec argile.		222.00
26.00			Graviers et galets d'origine vosgienne plus ou moins altérés nettement plus argileux.		221.00
30.60			Argile compacte brun-rouge, jaune et ocre, avec petits graviers, sables, passant à un sable argileux.		216.40
35.00			Ensemble hétérogène argileux, argile ocre, avec graviers et galets parfois décomposés et pourris.		212.00
35.30			Argile compacte, sableuse, jaune et ocre.		211.70
37.00			Argile ocre-rouge et blanche provenant de la décomposition de matériel granitique, quelques galets.		210.00
39.00			Argile plastique et molle, ligniteuse, avec quelques éléments provenant de roche granitique décomposée.	Rupélien	208.00
44.60			Argile compacte et plastique, sableuse et par place ligniteuse.		202.40
49.00			Argile compacte et plastique, sableuse, lie-de-vin et ocre.		198.00
51.00			Argile compacte bistrée, jaune, vert-bleu et brune ligniteuse.		196.00
53.00			Argile compacte, sableuse, brun-rouge et jaune, avec petits graviers plus ou moins roulés.		194.00
53.50			Argile sableuse, lie-de-vin, rosée et gris-blanc.		193.50
56.00			Argile compacte avec petits rognons calcaires, présence de lignite.		191.00
61.00			Argile compacte avec petits rognons calcaires, présence de lignite et d'argile sableuse lie-de-vin.		186.00
70.00			Argile compacte jaune, ocre, vert-bleu, rouille et brune, ligniteuse.		177.00
75.00			Argile gris-bleu, vert-bleu, jaune et ocre.		172.00
			Marnes.		
875.70					620.70



Dossier du sous-sol

04136X0020/DP19

Log validé

Profondeur

De 0.0 à 690.0 m Rafraichir

Profondeur	Formation	Lithologie	Lithologie	Stratigraphie	Altitude
19.00	Alluvions Quaternaires		Alluvions. Alluvions anciennes d'origine vosgienne.	Pléistocène	205.00
26.60	Altérites indifférenciées		Zone de transition (altération des marnes du Rupélien).	Néogène	197.40
	Série grise de Pechelbronn		Couches à cyrènes, à mélettes, à amphisytes et foraminifères. Série grise de Pechelbronn.	Rupélien	
398.00					-174.00
463.15			Zone salifère supérieure. Marnes avec anhydrite, sel gemme		-239.15
	Centre du bassin potassique : Zone salifère supérieure		Premier sel gemme massif à 463,15m. Alternance de sel gemme et de marnes avec anhydrite, sel gemme. 622,22m : base de la Couche inférieure de potasse ?	Priabonien	
638.00					-414.00
690.00			Zone salifère moyenne. Marnes avec anhydrite, sel gemme.		-466.00



**Centre scientifique et technique
Direction des risques et prévention**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr