

# SONDAGES GÉOÉLECTRIQUES «NULL-ARRAYS» POUR LA CARACTÉRISATION DES STRUCTURES DE SUBSURFACE

---

Thèse présentée à la Faculté des Sciences  
de l'Université de Neuchâtel  
Institut d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN)  
Pour l'obtention du grade de docteur ès Sciences

par

**Pierik Falco**

## **Membres du jury**

Prof. Pierre Perrochet, Directeur,	<i>Université de Neuchâtel</i>
Dr Ellen Milnes, Co-directrice,	<i>Université de Neuchâtel</i>
Prof. Christian Hauck, Rapporteur,	<i>Université de Fribourg</i>
Dr James Irving, Rapporteur,	<i>Université de Lausanne</i>
Dr Frank Bosch, Rapporteur,	<i>Université de Aachen</i>

Thèse soutenue le 15.04.2013

Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN),  
Emile-Argand 11, 2000 Neuchâtel, Suisse



## IMPRIMATUR POUR THESE DE DOCTORAT

---

**La Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel  
autorise l'impression de la présente thèse soutenue par**

**Monsieur Pierik FALCO**

Titre:

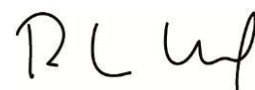
**Sondages Géoélectriques "Null-Arrays" pour la Caractérisation  
des Structures de Subsurface**

**sur le rapport des membres du jury composé comme suit:**

- Prof. Pierre Perrochet, Université de Neuchâtel, *directeur de thèse*
- Dr Ellen Milnes, Université de Neuchâtel, *co-directrice de thèse*
- Prof. Christian Hauck, Université de Fribourg, *rapporteur*
- Dr James Irving, Université de Lausanne, *rapporteur*
- Dr Frank Bosch, Université de Aachen, Allemagne, *rapporteur*

Neuchâtel, le 17 octobre 2013

Le Doyen, Prof. P. Kropf





## Résumé

Le terme "géoélectrique null-array" est utilisé pour les configurations géoélectriques qui mesurent une différence de potentiel nulle sur un espace homogène. Ce travail de recherche présente une étude du comportement de trois de ces null-arrays - le midpoint null-array, le Wenner- $\gamma$  null-array et le Schlumberger null-array - sur différentes structures verticales, en mesure en profil et en mesure azimutale. Une analyse numérique est présentée avec une approche qui utilise un logiciel de calcul hydrodynamique, en utilisant l'analogie entre les théories hydrodynamiques et électriques. Cette analyse numérique concorde avec les mesures de terrain effectuées avec les méthodes géoélectriques classiques et les null-arrays. Une campagne de terrain a été effectuée sur une carrière aux Breuleux (Jura, Suisse) afin de détecter les fractures et failles verticales ainsi que leurs orientations, qui pouvaient aussi être déterminées et mesurées sur le mur de la carrière. Une autre campagne a été menée à Vers chez le Brandt (Neuchâtel, Suisse) pour localiser la grotte et déterminer son orientation. Une dernière campagne a été menée sur la plaine de Buix (Jura, Suisse) dans le but de détecter et caractériser la position et l'orientation de chenaux. Cette étude a montré que certains null-arrays donnaient des résultats plus précis et sont mieux adaptés pour détecter et caractériser précisément ces structures verticales que d'autres méthodes classiques. Le Wenner- $\gamma$  null-array a montré qu'il est le plus efficace pour la détection de structures verticales et plus sensible que les autres null-arrays. Le Schlumberger null-array donne aussi de bons résultats, mais sa sensibilité est légèrement plus faible que pour le premier. De plus, cette configuration est nettement moins rapide à mettre en oeuvre que les autres. Le midpoint null-array est le plus efficace pour la détermination de l'orientation des structures, alors que le Schlumberger null-array permet d'ajouter de la précision à la mesure. Finalement, cette étude a mené à l'élaboration de conseils d'application de ces méthodes, comme le choix des configurations ou les dimensions à utiliser en pratique.

### Mots-clés :

Géoélectrique null-array ; Modèle numérique ; Mesures azimutales ; Fractures ; Orientation

## **Abstract**

The term "geoelectric null-array" is used for those geoelectrical configurations measuring a zero potential difference above a homogenous half-space. This thesis presents a study of the behaviour of three of these null-arrays - the midpoint null-array, the Wenner- $\gamma$  null-array and the Schlumberger null-array - above different vertical structures, using profiling and azimuthal measurements. A numerical analysis is presented with an approach which uses a hydrodynamic software based on the analogy between hydrodynamic and electric theories. This numerical analysis provides similar results to the field data acquired with the classical and null-array geoelectrical methods. Field measurements have been carried out on a quarry located in Les Breuleux (Jura, Switzerland) with the aim to detect vertical fractures and faults as well as to determine their orientations. Other measurements were performed in Vers chez le Brandt (Neuchâtel, Switzerland) with the aim to localise a cave and determine the orientation. A last data set was acquired at Buix (Jura, Switzerland) with the aim to detect and characterise the position and orientation of channels. These studies showed that some of these null-arrays provided more accurate results and are more capable of detecting and characterising precisely these vertical structures than other classical methods. The Wenner- $\gamma$  null-array was the most efficient for the detection of vertical structures and the most sensitive of the three null-arrays. The Schlumberger null-array provided good results, but the sensitivity was slightly lower. Moreover, this configuration was clearly more time-consuming than the others. The midpoint null-array is the best to detect orientation of structures, while the Schlumberger null-array added accuracy to the measurements. Finally, this thesis led to the elaboration of advices for a field application of the methods, as the choice of the array or of the array size.

### **Keywords :**

Geoelectric null-array ; Numerical modelling ; Azimuthal measurement ; Fractures ; Orientation

# REMERCIEMENTS

---

Merci à ceux qui m'ont aidé, de n'importe quelle manière, à achever ce travail... Merci à :

**Dr Ellen Milnes**, pour ses conseils, sa formation accélérée, les rires et les bières, sur le terrain, au bureau et en dehors du travail, jusqu'à la Maison des Bois

**Prof. Pierre Perrochet**, pour sa disponibilité, ses critiques et conseils avisés

**Dr François Negro**, dit «**Paco**», pour son soutien et ses conseils, tant géologiques que rédactionnels, ainsi que pour les nombreux Cafés Grappa ou GinTonic qui ont aidé mon moral à survivre à cette expérience et à me remettre des crampes dues aux parties effrénées de squash

**Prof. Christian Hauck**, de l'Université de Fribourg, qui m'a prêté le matériel nécessaire et dont nous ne disposions pas, et qui m'a aussi conseillé et qui a accepté d'être membre du jury

**Dr Nicolas Coppo**, pour m'avoir de près comme de loin, aidé et motivé au long de ces quatre années

**Dr Pierre-André Schnegg**, pour avoir été là à mes débuts dans le domaine géologique, et pour être resté présent par la suite! Et pour avoir cru en moi dès le début

**Vivian Gremaud** et **Lucien Blandenier**, pour les rires, échanges, conseils et gags au bureau

**Dr Sándor Szalai**, de l'université de Sopron (Hongrie), pour son aide et son soutien à distance...

Mon père, **Lucien Falco**, pour son aide sur la majorité de mes terrains test, ainsi que pour son soutien et ses conseils de scientifique chevronné durant toute cette aventure

**Dr Michiel Pronk**, pour son aide sur le terrain et les pauses café

**Pascale Preisig (Ducommun)**, **Giona Preisig**, **Jaouher Kerrou**, **Domagoj Babic**, **Daniel Bouchard** et **Geoffrey Undereiner**, pour leur aide ici ou là, dans tel ou tel domaine, ainsi que pour les moments passés autour d'une bière, sur un terrain de basket, avec une tasse de café ou un repas

**Prof. François Zwahlen**, pour m'avoir accepté et encouragé

**Ma famille**, qui m'a soutenue, volontairement ou non, tout au long de ce travail fastidieux ...

**Mes amis**, Christobald, Perou, Ramon, Poupou, Juige, et plein d'autres ... qui m'ont distrait et changé les idées durant ces années

**Toutes les personnes que j'oublie**, qui m'ont, de près ou de loin, longuement ou sur un bref instant, encouragé à finir cette aventure

Je tiens finalement à remercier **Dr James Irving** et **Dr Frank Bosch** d'avoir accepté d'être membre du jury



# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Méthodes géophysiques pour l'hydrogéologie . . . . .	2
1.2	Méthodes géophysiques pour la caractérisation de fractures . . . . .	5
1.3	L'apport des null-arrays pour la caractérisation de fractures . . . . .	8
1.4	Objectifs et plan de la thèse . . . . .	9
<b>2</b>	<b>Méthodes géoélectriques</b>	<b>11</b>
2.1	Les méthodes géoélectriques . . . . .	12
2.1.1	La loi d'Ohm . . . . .	13
2.1.2	La théorie électrique . . . . .	14
2.2	Les configurations géoélectriques classiques . . . . .	15
2.3	Limitations des méthodes classiques . . . . .	18
2.4	Les null-arrays . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Développement d'outils pour l'interprétation géoélectrique</b>	<b>23</b>
3.1	Analogie des théories hydraulique et électrique . . . . .	24
3.2	Modèle de simulation et effets du maillage . . . . .	27
3.2.1	Force du signal . . . . .	27
3.2.2	Contraste de résistivité . . . . .	28
3.2.3	Correction du maillage . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Modélisation numérique synthétique</b>	<b>33</b>
4.1	Modèles investigués . . . . .	34
4.2	Profils avec les null-arrays . . . . .	38
4.2.1	Profil sur une faille . . . . .	38
4.2.2	Profil sur une structure de faille oblique . . . . .	40
4.2.3	Profil sur une structure à deux failles . . . . .	43
4.2.4	Profil sur une structure de cavités . . . . .	44
4.2.5	Profil sur une structure de grotte . . . . .	46
4.2.6	Profil sur une structure à deux zones . . . . .	47

4.2.7	Profil sur une structure en horst . . . . .	48
4.3	Mesures azimutales avec les null-arrays . . . . .	50
4.3.1	Paradoxe anisotropique . . . . .	50
4.3.2	Mesure azimutale sur une structure de faille . . . . .	54
4.3.3	Mesure azimutale sur une structure à deux failles . . . . .	56
4.3.4	Mesure azimutale sur une structure de failles en X . . . . .	57
4.3.5	Mesure azimutale sur une structure de grotte . . . . .	59
4.3.6	Mesure azimutale sur une structure à deux zones . . . . .	61
4.4	Profondeur d'investigation des null-arrays . . . . .	62
4.5	Discussion sur les simulations numériques . . . . .	68
4.5.1	Profils . . . . .	68
4.5.2	Mesures azimutales . . . . .	72
4.5.3	Comportement du paradoxe anisotropique . . . . .	74
4.5.4	Profondeur d'investigation . . . . .	76
4.6	Applicabilité des null-array en situations de terrain . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Mesures de terrain</b>	<b>79</b>
5.1	Matériel . . . . .	80
5.2	Les Breuleux - Structure fracturée . . . . .	83
5.2.1	Contexte géologique . . . . .	83
5.2.2	Méthodes géophysiques classiques . . . . .	85
5.2.2.1	Méthodes géophysiques classiques sur le profil P1 . . . . .	85
5.2.2.2	Méthodes géophysiques classiques sur les profils P4 et P5 . . . . .	89
5.2.3	Profils avec les null-arrays . . . . .	90
5.2.3.1	Profil P1 avec les null-arrays . . . . .	90
5.2.3.2	Profils P2 et P3 avec les null-arrays . . . . .	94
5.2.4	Mesures azimutales avec les null-arrays . . . . .	95
5.2.5	Conclusion sur les mesures de terrain aux Breuleux . . . . .	98
5.3	Vers chez le Brandt - Grotte dans un milieu karstique . . . . .	100
5.3.1	Contexte géologique . . . . .	100
5.3.2	Méthodes géophysiques classiques . . . . .	101
5.3.3	Profils avec les null-arrays . . . . .	105
5.3.4	Mesures azimutales avec les null-arrays . . . . .	108
5.3.5	Conclusion sur les mesures de terrain de Vers chez le Brandt . . . . .	111
5.4	Buix - Structure de dépôts alluviaux . . . . .	113
5.4.1	Contexte géologique . . . . .	113
5.4.2	Méthodes géophysiques classiques . . . . .	115
5.4.3	Profils avec les null-arrays . . . . .	117
5.4.4	Mesures azimutales avec les null-arrays . . . . .	122

5.4.5	Conclusion sur les mesures de terrain à Buix . . . . .	124
<b>6</b>	<b>Discussions et conclusions</b>	<b>127</b>
6.1	Applicabilité des configurations et limitations . . . . .	128
6.2	Perspectives . . . . .	133
6.3	Conclusions . . . . .	136
	<b>Abréviations</b>	<b>139</b>
	<b>Index</b>	<b>141</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>143</b>
<b>A</b>	<b>Les méthodes magnétotelluriques</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Annexes des modélisation numériques</b>	<b>V</b>
B.1	Profondeur d'investifation d'après Roy et Apparao (1971) . . . . .	V
B.2	Courbes de profondeur d'investigation . . . . .	VIII
<b>C</b>	<b>Annexes des mesures de terrain</b>	<b>IX</b>
C.1	Les Breuleux : ERT sur le profil P5 . . . . .	IX
C.2	Les Breuleux : Photos du mur de la carrière . . . . .	XI
C.3	Les Breuleux : Mesures azimutales avec les null-arrays . . . . .	XIII
C.4	Les Breuleux : Photos de terrain . . . . .	XVI
C.5	Vers chez le Brandt : Simulations directes et inverses sur une grotte . . . . .	XVII
C.6	Vers chez le Brandt : Mesures azimutales avec les null-arrays . . . . .	XIX
C.7	Buix : Simulations des null-array sur des chenaux . . . . .	XXI
<b>D</b>	<b>Article publié</b>	<b>XXIII</b>



# TABLE DES FIGURES

---

2.1	Lignes de courant et d'équipotentiels . . . . .	14
2.2	Wenner array . . . . .	16
2.3	Schlumberger array . . . . .	17
2.4	Dipôle-dipôle array . . . . .	17
2.5	Pôle-dipôle array . . . . .	18
2.6	Configuration des null-arrays étudiés . . . . .	20
3.1	Simulation comparée de Res2Dmod et de Feflow . . . . .	26
3.2	Validation de l'analogie avec une application de terrain . . . . .	26
3.3	Différence entre résistance et résistivité . . . . .	28
3.4	Simulations numériques du contraste de résistivité avec le midpoint null-array . . . . .	29
3.5	Simulations numériques du midpoint null-array proche d'une faille en fonction du contraste de résistivité . . . . .	29
3.6	Exemples de correction de maillage . . . . .	30
3.7	Validation de la correction du maillage . . . . .	31
3.8	Correction du maillage sur un profil . . . . .	31
4.1	Schémas des structures synthétiques utilisée pour les simulations numériques . . . . .	37
4.2	Schéma du déroulement d'une mesure en profil . . . . .	38
4.3	Simulations numériques des null-arrays sur une faille résistive et une faille conductive . . . . .	39
4.4	Modèle schématique de la structure de faille oblique . . . . .	40
4.5	Simulations numériques des null-arrays sur une faille oblique . . . . .	40
4.6	MAN sur différentes failles obliques : la position des zéros . . . . .	41
4.7	Détermination de la pente des failles obliques . . . . .	42
4.8	Simulations numériques du Sna sur une structure à deux failles . . . . .	44
4.9	Schéma de la structure de cavités . . . . .	44
4.10	Simulations numériques des null-arrays sur une structure de cavités . . . . .	45
4.11	Simulations numériques des null-arrays sur une structure de grotte . . . . .	46
4.12	Simulations numériques des null-arrays sur une structure à deux zones . . . . .	48

4.13	Structure en horst et profil avec le Sac . . . . .	48
4.14	Simulation numérique des null-arrays sur une structure en horst . . . . .	49
4.15	Exemple de l'ellipse circonscrite au digrame en fleur . . . . .	51
4.16	Simulations numériques du paradoxe anisotropique pour le mMAN sur une structure anisotropique . . . . .	52
4.17	Simulations numériques du paradoxe anisotropique pour le mMAN sur une structure composée de trois failles . . . . .	53
4.18	Simulations numériques des mesures azimutales sur une faille conductive . . . .	54
4.19	Simulations numériques des mesures azimutales sur une faille résistive . . . . .	56
4.20	Simulations numériques des mesures azimutales sur une structure composée de deux failles parallèles . . . . .	57
4.21	Simulations numériques des mesures azimutales sur une structure de failles en X	58
4.22	Simulations numériques des mesures azimutales sur une structure de grotte . . .	60
4.23	Simulations numériques des mesures azimutales sur une structure à deux zones .	61
4.24	Setup de la position d'un élément de volume par rapport au null-array pour le calcul analytique de la profondeur d'investigation . . . . .	65
4.25	Courbes de profondeur d'investigation caractéristique pour le MAN . . . . .	66
4.26	Courbes de profondeur d'investigation caractéristique pour les null-arrays . . . .	67
4.27	Différence entre des données avec signe ou en valeur absolue . . . . .	70
5.1	Le boîtier SYSCAL . . . . .	80
5.2	Câble ERT et mesure en mode azimutal . . . . .	82
5.3	Localisation et mesures aux Breuleux . . . . .	84
5.4	Profils géophysiques classiques aux Breuleux . . . . .	86
5.5	ERT sur le profil <i>P1</i> aux Breuleux . . . . .	88
5.6	Profils <i>P1</i> et <i>P4</i> aux Breuleux . . . . .	89
5.7	Profils null-arrays et profils classiques sur le profil <i>P1</i> aux Breuleux . . . . .	93
5.8	Profils <i>P2</i> et <i>P3</i> aux Breuleux avec les null-arrays . . . . .	94
5.9	Mesures azimutales à la position <i>A4</i> aux Breuleux . . . . .	96
5.10	Mesures azimutales à la position <i>A2</i> aux Breuleux . . . . .	98
5.11	Localisation de Vers chez le Brandt . . . . .	100
5.12	ERT à Vers chez le Brandt . . . . .	102
5.13	Mesures géophysiques classiques et avec les null-arrays à Vers chez le Brandt . .	104
5.14	Null-arrays à Vers chez le Brandt . . . . .	107
5.15	Mesures azimutales à Vers chez le Brandt . . . . .	108
5.16	Localisation de la plaine de Buix et les profils géophysiques . . . . .	113
5.17	Structure supposée des chenaux de la plaine de la Buix . . . . .	114
5.18	ERT sur le profil <i>P1</i> à Buix . . . . .	115
5.19	ERT sur le profil <i>P2</i> à Buix . . . . .	116

5.20	ERT sur le profil <i>P3</i> à Buix . . . . .	117
5.21	Profil <i>P1</i> à Buix effectué avec une Wenner ERT et Sna . . . . .	118
5.22	Profil <i>P2</i> à Buix effectué avec des ERT et des null-arrays . . . . .	120
5.23	Profil <i>P3</i> à Buix effectué avec des ERT et des null-arrays . . . . .	121
5.24	Mesure azimutale avec les null-arrays sur le profil <i>P2</i> à Buix . . . . .	122
5.25	Mesure azimutale avec les null-arrays sur le profil <i>P3</i> à Buix . . . . .	123
A.1	Illustration de la méthode RMT d'après Koll et Müller (1989) . . . . .	II
B.1	Courbes de profondeur d'investigation pour le Wenner- $\gamma$ - et le Schlumberger null-arrays . . . . .	VIII
C.1	ERT sur le profil <i>P5</i> aux Breuleux . . . . .	X
C.2	Photos du mur Sud de la carrière des Breuleux . . . . .	XI
C.3	Photos du mur Ouest de la carrière des Breuleux . . . . .	XI
C.4	Photos du mur Nord de la carrière des Breuleux . . . . .	XII
C.5	Mesures azimutales à la position <i>A1</i> . . . . .	XIII
C.6	Mesures azimutales à la position <i>A2</i> . . . . .	XIII
C.7	Mesures azimutales à la position <i>A3</i> . . . . .	XIV
C.8	Mesures azimutales à la position <i>A4</i> , $LD = 10\text{ m}$ . . . . .	XIV
C.9	Mesures azimutales à la position <i>A4</i> , $LD = 20\text{ m}$ . . . . .	XIV
C.10	Mesures azimutales avec le Schlumberger array classique à la position <i>A4</i> . . . .	XV
C.11	Mesures azimutales à la position <i>A5</i> . . . . .	XV
C.12	Photos du terrain aux Breuleux . . . . .	XVI
C.13	Simulations directes et inverses sur une grotte . . . . .	XVIII
C.14	Mesures azimutales à Vers chez le Brandt à la position <i>A1</i> . . . . .	XIX
C.15	Mesures azimutales à Vers chez le Brandt à la position <i>A2</i> . . . . .	XIX
C.16	Mesures azimutales à Vers chez le Brandt à la position <i>A3</i> . . . . .	XX
C.17	Mesures azimutales à Vers chez le Brandt à la position <i>A2</i> avec les dispositifs classiques . . . . .	XX
C.18	Mesures azimutales à Vers chez le Brandt à la position <i>A3</i> avec les dispositifs classiques . . . . .	XX
C.19	Simulation d'un profil avec le Schlumberger null-array sur des chenaux . . . . .	XXI



# LISTE DES TABLEAUX

---

1.1	Méthodes usuelles en géophysique . . . . .	2
2.1	Valeur de résistivité de la Terre . . . . .	13
2.2	Facteurs géométriques des null-array . . . . .	21
4.1	Détermination de la pente d'une faille oblique avec le MAN . . . . .	43
4.2	Profondeur d'investigation relative pour les null-arrays . . . . .	67
4.3	Identification des structures avec les null-arrays . . . . .	70
4.4	Amplitudes des signaux sur les différentes structures . . . . .	72
4.5	Orientation des mesures azimutales sur différentes structures . . . . .	75
5.1	Positions des mesures azimutales et des profils perpendiculaires aux Breuleux . .	85
5.2	Orientations données par les mesures azimutales avec les null-array aux Breuleux	97
5.3	Positions des mesures azimutales et des profils à Vers chez le Brandt . . . . .	103
5.4	Orientations données par les mesures azimutales avec les null-arrays à Vers chez le Brandt . . . . .	109
6.1	Résumé des avantages et désavantages des null-arrays . . . . .	129



# INTRODUCTION

---

L'hydrogéologie est la science qui étudie l'eau souterraine. Son étude peut être menée en terme d'hydrodynamique, souvent abordée avec des modèles numériques, dans le but de se concentrer sur la circulation et la répartition de l'eau dans le sol. Elle peut aussi être menée en terme d'hydrochimie afin d'étudier l'interaction de l'eau avec le milieu environnant ou d'effectuer un bilan qualitatif de l'eau. Quelle que soit l'approche utilisée, des données de terrain sont nécessaires à son étude. La géophysique fournit un type de données de terrain, permettant d'obtenir des données géométriques et géologiques.

Les méthodes géophysiques sont fréquemment utilisées pour un grand nombre d'applications. Elles investiguent la Terre avec des méthodes indirectes et non-invasives dans le but de déterminer des propriétés physiques du sol. Les propriétés obtenues permettent alors d'identifier des roches, de déterminer la structure du sol ou de déduire la présence de certains matériaux, comme de l'eau, du pétrole ou des minerais. Ces méthodes sont fréquemment appliquées en hydrogéologie, l'eau influençant grandement les propriétés électriques du sol. Le principe de base est simple : n'importe quel changement de la propriété physique étudiée va provoquer une variation du champ qu'elle génère et sera ainsi détectable (Kelly et Mares, 1993).

Ainsi, en fonction du type de champ mesuré, différentes grandeurs sont déterminées. Des méthodes comme la gravimétrie ou la sismique permettent de déterminer par exemple la densité du sol, alors que des mesures électromagnétiques, électriques ou magnétiques permettent de trouver la résistivité électrique du sol ou la permittivité diélectrique.

Pour les problèmes hydrogéologiques, les méthodes géophysiques les plus intéressantes sont celles qui se concentrent sur la partie supérieure de la croûte terrestre. Malheureusement, ces

mesures ne peuvent pas donner d'information directe sur l'eau ou l'aquifère, puisqu'elles sont en même temps influencées par la géologie environnante. L'application la plus courante est ainsi d'ordre structural, la géophysique permettant de déterminer la géométrie des aquifères ou des aquicludes étudiés, comme leur position, leur épaisseur ou leur profondeur.

## 1.1 Méthodes géophysiques pour l'hydrogéologie

Parmi toutes les méthodes géophysiques existantes, les plus communes sont la gravimétrie, la sismique, l'électromagnétique, l'électrique et le radar (GPR). Le choix de la méthode appropriée est principalement lié à l'étude en elle-même, les profondeurs investiguées n'étant pas les mêmes pour toutes ces méthodes. Le prix, pouvant énormément changer d'une méthode à l'autre, est aussi un argument de choix. Le tableau 1.1 montre les propriétés principales déduites à partir de ces méthodes. Dans ce tableau, la résonance magnétique a été ajoutée. Il faut noter que cette dernière sort un peu des deux domaines présentés et permet une estimation plus ou moins directe de la teneur en eau du sol.

TABLE 1.1 – Méthodes usuelles en géophysique

Méthode	Propriété mesurée
Gravimétrie	Densité
Sismique	Vitesse des ondes
Électrique	Résistivité
Polarisation Induite	Chargeabilité
Self potential	Flux hydraulique souterrain
Magnétotellurique	Résistivité
Électromagnétique	Contraste de résistivité
Radar (GPR)	Perméabilité diélectrique
Résonance magnétique	Temps de relaxation

A partir de ces propriétés, il est alors possible de déduire certaines caractéristiques du sol, comme par exemple la structure ou la géométrie (position, profondeur, épaisseur, ...), la teneur en eau ou la salinité. Ainsi, en fonction de l'étude désirée, du terrain en lui-même et de la problématique, différentes méthodes géophysiques sont utilisables. Les méthodes couramment utilisées en hydrogéologie sont ainsi présentées dans les paragraphes suivants, en mettant un accent particuliers sur les méthodes géoélectriques qui sont à la base de ce travail de recherche. Toutes ces méthodes sont non-invasives et non-destructives.

## Méthodes électriques (directes)

Les méthodes électriques classiques nécessitent une source d'énergie pour produire le courant électrique injecté et mesuré dans le sol. Il y a plus de variantes de techniques de mesures électriques que dans les autres méthodes. Elles sont alors parmi les plus appliquées pour les études de subsurface et d'eau souterraine, donnant la répartition des résistivités électriques des roches, qui est un paramètre très sensible à la teneur en eau du sol. Ces méthodes permettent la modélisation de profondeur et/ou d'épaisseur des couches du sous-sol.

En 1720, Gray et Wheeler sont les tout premiers à mesurer la conductivité électrique de certaines roches. En 1746, Watson a remarqué que le courant électrique pouvait circuler dans le sol. La théorie permettant la mesure de la résistivité électrique du sol a été développée à partir des équations de Maxwell en 1891 (Marescot, 2004). Les méthodes géoélectriques appliquées ont ensuite été développées parallèlement en France par Conrad Schlumberger en 1912 et aux États Unis par Frank Wenner la même année. Par la suite, le développement de ces méthodes géoélectriques se focalise particulièrement sur leur applicabilité et l'interprétation des sondages verticaux (Marescot, 2004).

Dans les années 70, la combinaison du sondage vertical avec une mesure où le dispositif est déplacé en surface donne les premières tomographies électriques (Electrical Resistivity Tomography ou ERT) (Edwards, 1977). Les développements informatiques et algorithmiques, en particulier par Loke (1999), vont mener à une très forte utilisation de ces tomographies à travers le monde (Marescot, 2004). De nos jours, les mesures géoélectriques sont très couramment utilisées pour l'hydrogéologie, dans le but de caractériser des réseaux de fractures et d'étudier la structure du sol.

## Ground Penetrating Radar (GPR)

Cette méthode a besoin d'une source d'énergie, le "transmetteur", pour générer le champ électromagnétique mesuré. Cette méthode mesure un contraste des propriétés diélectriques du sol, qui est relié à des paramètres mécaniques et géologiques des roches et à la teneur en eau du sol. Cette méthode est l'analogue électromagnétique de la méthode de sismique réflexion. Elle est utilisée pour déterminer la géométrie de subsurface.

## Méthodes électromagnétiques

Ces méthodes ont soit besoin de sources d'énergie artificielles, comme des antennes de télécommunication à grande distance, soit de sources naturelles, comme des fluctuations naturelles du champ magnétique terrestre. Ces méthodes mesurent la répartition des résistivités du sol par l'interaction des ondes électromagnétiques avec le sol. Le choix des fréquences mesurées permet le choix de la profondeur de mesure et la résolution : les basses fréquences sont utilisées

pour les études de subsurface ou pour trouver des grottes ou des mines, alors que les hautes fréquences sont utilisées pour détecter de petits objets comme des câbles ou des conduites enterrées.

## Gravimétrie

La gravimétrie est une méthode non-invasive et non-destructive. Son avantage principal est qu'elle ne nécessite aucune source d'énergie. Cette méthode permet d'obtenir une répartition de la densité des roches, rendant ainsi possible la caractérisation et l'identification de différents milieux. Cette technique, adéquate pour explorer des failles habituellement entourées par des roches de densités différentes, est plus utilisée pour la prospection de réservoirs géothermiques que pour des problèmes hydrogéologiques.

## Méthodes sismiques

Les méthodes sismiques ont besoin d'une source d'énergie sous forme de vibration mécanique, comme par exemple un coup de marteau ou une explosion, qui produira ainsi l'onde mécanique. Elles permettent d'obtenir la répartition de la densité des roches, qui dépend elle-même de la lithologie ou de la porosité. Ces techniques sont les méthodes géophysiques les plus utilisées pour la recherche de pétrole. Il est possible de distinguer deux "sous-méthodes" : la sismique réflexion et la sismique réfraction. Dans les deux cas, le temps de propagation de l'onde mécanique dans le sol est mesurée, permettant de déterminer la vitesse sismique et de modéliser alors des profondeurs de couches composant le sol.

## Considérations générales

Le choix de la méthode utilisée se fait alors en fonction du sujet de l'étude et du terrain d'étude en lui-même. Outre la propriété physique étudiée, les différences majeures entre ces méthodes sont d'une part leur prix et d'autre part leurs profondeurs d'investigation. Le GPR est beaucoup utilisé pour des structures de faibles profondeurs, typiquement 10-20 m, les méthodes électriques permettent d'atteindre des profondeurs légèrement plus importantes, typiquement jusqu'à ~ 50 m, alors que les méthodes électromagnétiques et sismiques peuvent être utilisées comme des méthodes de surface et permettent également d'atteindre de grandes profondeurs, pouvant atteindre plusieurs kilomètres.

Les sols stratifiés sont habituellement faciles à étudier et interpréter en terme de données géophysiques. Les structures verticales ou abruptes sont plus complexes à déterminer. A grande échelle, donc plus de 100 m environ, la gravimétrie est la méthode la plus apte à détecter des structures subverticales importantes. A une échelle intermédiaire de l'ordre de 10 m à 100 m, les méthodes électromagnétiques, comme par exemple le "Very Low Frequency", sont idéales

pour les structures subverticales et fractures de moyenne taille. A une échelle plus petite, inférieure à 10 m, peu de méthodes sont adéquates pour la détection de telles structures. Bien que certaines méthodes électromagnétiques permettent la détection de ces petites structures, comme des fractures, peu de techniques de surface sont adaptées à cette problématique. Ces petites structures jouent un rôle important en hydrogéologie et leur détection peut alors dans certain cas se révéler indispensable pour la compréhension du comportement hydrodynamique du sol. Des méthodes de surface capables de détecter ce genre de structures seraient alors d'une grande utilité pour l'hydrogéologie.

Pour alléger la lecture, le terme de "fracture" reflétera dans ce document toutes sortes d'hétérogénéités verticales ou subverticales, comme des fractures à proprement parler, des failles ou des conduits karstiques.

## 1.2 Méthodes géophysiques pour la caractérisation de fractures

Depuis sa création en 1965, le Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel s'est intéressé aux problèmes karstiques, en utilisant et étudiant des méthodes géophysiques. Dans un premier temps, ces dernières n'étaient pas particulièrement utilisées mais la physique aidait déjà à simuler les écoulements en se basant sur l'analogie entre les théories hydrauliques et électriques (Kiraly, 1970 ; Kiraly, 1971). En s'intéressant au magnétisme (Fischer *et al.*, 1979; Fischer et Schnegg, 1994) et à l'électromagnétisme, I. Müller, G. Fischer et P.-A. Schnegg ont alors commencé à développer des méthodes électromagnétiques comme le Very Low Frequency (VLF) dans le but de caractériser les sols<sup>1</sup> (Müller, 1983). L'un des principaux buts de ces méthodes était de pouvoir identifier des conduits karstiques. Le Radio Magneto-Telluric (RMT)<sup>1</sup> a ensuite été développé (Turberg, 1994). Des études sur le VLF ont par la suite continué, comme Müller *et al.* (1995) ou Stiefelhagen (1998), et ont mené à une variante, le VLF-Grad (Bosch, 2002). Par la suite, toujours dans le domaine des méthodes électromagnétiques, des méthodes audio-magnétotelluriques ont été appliquées (Coppo, 2008). Toutes ces études avaient comme but de caractériser le sol et sa structure pour mieux connaître la dynamique des écoulements souterrains en général et dans les conduits karstiques plus particulièrement. Ces écoulements sont grandement influencés par la présence de fractures, qui sont dès lors les paramètres prépondérants dans les modèles d'écoulement. Comme l'a montré Turberg (1994), les milieux fracturés et/ou karstifiés ont toujours été difficiles à caractériser. Même si l'apport des mesures VLF a permis de détecter grands nombres de structures, ces méthodes sont toujours limitées par leur sensibilité aux perturbations électromagnétiques anthropiques, la nécessité d'une source externe et le besoin d'un contraste résistif suffisamment grand dans le sol.

---

1. Voir l'annexe A pour plus d'information sur ces méthodes

## Intérêt pour l'hydrogéologie

L'intérêt principal des milieux fracturés pour l'hydrogéologie est que l'écoulement se fait en grande partie dans ces structures. Il est alors capital de pouvoir détecter, identifier et caractériser ces fractures afin d'étudier et de comprendre l'hydrogéologie d'un terrain. Comme ces fractures se rencontrent fréquemment dans tout milieu karstique, le problème de leur détection et caractérisation a ainsi fortement alimenté les sujets des thèses précédentes menées au Centre d'hydrogéologie. Bosch (2002) avait ainsi apporté une grande aide à cette problématique, avec le développement du VLF-Grad qui apportait une meilleure sensibilité que le VLF traditionnel. En plus de la caractérisation des structures et donc des écoulements, la localisation de ces fractures, failles ou conduits karstiques sont par exemple indispensable pour la réalisation d'essai de traçage. En effet, lors de ce genre d'études, il faut maximiser les chances que le traceur injecté pénètre directement le sol. Il faut donc injecter les traceurs dans des fractures (au sens "large") en amont des sources et des points de mesures. Là encore, la localisation de ces structures à petite échelle est alors importante pour améliorer la qualité des essais de traçage.

Dans les régions karstiques ou en milieux fissurés calcaires, des formations comme des dolines, des dépressions, des grottes ou des conduits karstiques favorables pour l'écoulement de l'eau souterraine apparaissent comme des zones avec un contraste électrique par rapport aux calcaires environnants. Les zones karstiques sont alors habituellement étudiées avec des méthodes électriques. En effectuant un sondage vertical dans le karst, quatre couches devraient ainsi être différenciées : un sol, le plus souvent argileux ; des calcaires karstifiés secs ; des calcaires karstifiés saturés d'eau ; et des calcaires solides non karstifiés (Kelly et Mares, 1993). Les zones karstifiées ou fissurées sont aussi étudiées avec des méthodes sismiques ou gravimétriques (Kelly et Mares, 1993). Comme les failles ou les fractures jouent un rôle principal dans l'hydrogéologie karstique, leur détection et leur caractérisation sont des objectifs majeurs (Tabbagh *et al.*, 2007). Pourtant, même si elles créent un contraste physiquement grand, la détection de ces fractures par des méthodes géophysiques présente toujours une difficulté, à cause de leur faible volume par rapport au milieu dans lequel elles se trouvent (Tabbagh *et al.*, 2007), sans compter le fait qu'elles peuvent ensuite se remplir de dépôts et de sédiments, ce qui aura pour effet d'atténuer le contraste. Une autre tâche particulière pour des études géophysiques en milieu karstique est la localisation et le suivi de cavités, comme des conduits, des chenaux ou des grottes. Ce genre d'identification force l'utilisation de traceur pour suivre le parcours de l'eau (Kelly et Mares, 1993).

La caractérisation des fractures, même de petites tailles, est alors d'un intérêt majeur pour l'hydrogéologie, particulièrement en milieu karstique. A cause de leur faible volume, en comparaison du milieu dans lequel elles se trouvent, ces fractures sont donc souvent difficiles à détecter, malgré le contraste résistif élevé entre elles et leur milieu (Tabbagh *et al.*, 2007). Bien que différents outils électromagnétiques aient été proposés pour détecter ces fractures avec des

mesures dans un puits (Tabbagh et Giannakopoulou, 1995) ou entre des puits (Giannakopoulou *et al.*, 1997), ces techniques ne sont pas des méthodes de surface (Genter *et al.*, 1991) et ne sont donc pas toujours applicables. D'autres outils géoélectriques, où les électrodes de courant sont installées dans un puits et les électrodes de potentiel en surface, ont également montré de bonnes aptitudes à détecter des fractures (Wang *et al.*, 1991), mais ces méthodes ne sont toujours pas des méthodes de surface à proprement parler et ne sont donc toujours pas applicables partout. Ainsi, en géophysique strictement de surface, la détection directe de fractures reste un défi majeur. L'usage de dispositifs composés de microélectrodes en effectuant des tomographies électriques 3D a révélé un bon potentiel pour la détection de la présence de fractures, même si le processus d'inversion ne permet d'obtenir ni la géométrie, ni la position, en raison de l'absence de codes d'inversion adaptés (Samouëlian *et al.*, 2003).

Une fois les fractures détectées, il reste encore à les caractériser, principalement à déterminer leur orientation. Taylor et Fleming (1988) ont proposé la "technique de mesures géoélectriques azimutales", qui pourrait permettre de déterminer ces directions à partir de mesures de surface (Szalai *et al.*, 2010b). Ces techniques ont été utilisées malgré le fait que dans un tiers des cas, la direction mesurée était fautive (Ritzi et Andolsek, 1992). Il a en effet été montré qu'un décalage de la position de la mesure, ou un changement de l'épaisseur du sol, pouvait changer le diagramme polaire obtenu de la mesure azimutale (Sauck et Zabik, 1992). Ce dernier point peut être dû d'une part au paradoxe anisotropique qui peut se produire dans les mesures de terrain (Keller et Frischknecht, 1966) ou au fait que la direction de fracture ne peut pas être déterminée directement dans un cas multifracturé (Szalai *et al.*, 2010a). De plus, des structures anthropiques, comme des barrières électriques, des lignes électriques (enterrées) ou des conduites, peuvent perturber les mesures. La détermination de la direction des structures est alors un problème complexe et difficile à résoudre sans affleurement.

Un des grands problèmes de ces méthodes est le processus d'inversion. Le terme "inversion" désigne le processus mathématique qui recherche la structure "réelle" à partir des données de géophysiques. Ces problèmes n'étant pas linéaires et étant sous-déterminés, il n'y a pas de solution unique. Un processus itératif tente donc d'approcher au mieux une réalité sur la base des mesures effectuées. Durant ce processus, les divergences numériques, ajoutées aux erreurs de mesures sur le terrain, mènent à des limitations quant aux résultats possibles. Par exemple, les méthodes géoélectriques sont connues pour être très limitées pour la détection et/ou la caractérisation de structures subverticales. La détection de fractures est donc toujours une problématique difficile.

L'idée qui est la base du présent travail est le développement d'une méthode géoélectrique facile à mettre en oeuvre et efficace pour déterminer des structures (sub)verticales. En effet, les méthodes électromagnétiques nécessitent un équipement particulier et facilement limité

dans leur emploi à cause de leur forte sensibilité au bruit électromagnétique généré par l'urbanisation. N'ayant pas ces contraintes, une étude sur l'application potentielle des méthodes géoélectriques, fréquemment utilisées dans le milieu hydrogéologique, à la problématique particulière des fractures semble être alors appropriée. Pour la détection de fractures, Szalai *et al.* (2002) a déjà utilisé des méthodes géoélectriques spécifiques, appelées "null-arrays", en collaborant avec Bosch (2002) et en les comparant avec le VLF-Grad. Ces méthodes "null-arrays" semblent alors être un point de départ prometteur pour tenter d'apporter de nouveaux éléments à ces problématiques hydrogéologiques spécifiques.

### 1.3 L'apport des null-arrays pour la caractérisation de fractures

Les null-arrays sont des cas particuliers des mesures géoélectriques introduites à la section 1.1, où la mesure devrait être nulle sur un milieu théorique homogène. Ce type de mesure a pour avantage de réagir à des perturbations, ou hétérogénéités, et est ainsi potentiellement intéressant pour la caractérisation de structures subverticales de petite échelle, comme les failles. Dans la littérature, les null-arrays n'ont apparemment jamais été utilisés sur le terrain jusqu'à ce que Szalai *et al.* (2002) les appliquent. Deux raisons expliquent cette absence d'application de ces méthodes. D'une part l'interprétation était problématique car ces techniques sont des cas particuliers qui mènent à des divergences dans les calculs d'inversion (Szalai *et al.*, 2002). D'autre part les auteurs précédents avaient laissé entendre que le signal mesuré serait beaucoup trop faible pour être mesurable. Cette deuxième raison a déjà été démontré comme fausse par Szalai et Szarak (2002).

#### Intérêt des null-arrays pour l'hydrogéologie

L'identification de structures subverticales comportent plusieurs intérêts majeurs en hydrogéologie. Comme déjà mentionné, déterminer la fracturation principale d'une structure joue un rôle prépondérant à la compréhension du comportement hydrogéologique du sol. Ainsi, ce genre de mesure sera d'une précieuse aide à l'étude des eaux souterraines. De plus, ces méthodes seraient capables de détecter des structures secondaires - donc plus petites - par rapport aux structures majeures déjà connues ou détectables avec des méthodes traditionnelles, comme des mesures électromagnétiques. Les null-arrays semblent aussi prometteurs dans la détermination de l'orientation de structures. Ces deux derniers points permettront alors d'avoir des informations plus précises sur le comportement hydrogéologique.

Leur application pourrait ainsi être pour des études hydrogéologiques, pour la géothermie de faible profondeur, pour des études de fracturation et de stabilité du sol ou pour localiser des sources. Ces méthodes seraient alors utilisées de manière complémentaire à d'autres mesures hydrogéologiques, comme pour déterminer un point d'injection lors d'un essai de traçage.

## 1.4 Objectifs et plan de la thèse

Bien que les méthodes géoélectriques soient largement utilisées pour identifier la structure "stratifiée" des zones karstiques, la détection, l'identification et la caractérisation de cavités ou de fractures est toujours une de leur faiblesse. Le but de cette thèse est alors d'étudier une méthode géoélectrique alternative, qui permet de résoudre ce genre de problème. Cette méthode relativement novatrice, appelée "null-arrays", est en effet capable de détecter, de localiser et de caractériser le genre de structure typiquement rencontré dans les zones karstiques, comme des conduits, des grottes ou des fractures, bien qu'elle reste applicable à n'importe quel milieu. Quant aux difficultés liées à l'inversion et à l'interprétation des mesures, l'aspect original consiste à les contourner en simulant les signaux qui devraient être mesurés sur un inventaire de structures synthétiques, permettant ainsi l'interprétation de données de terrain. Cet aspect constitue l'un des objets principaux de la thèse, en élaborant une sorte de "catalogue de référence" permettant l'interprétation des données en évitant le processus d'inversion. Ainsi, afin d'élaborer ce catalogue de référence, une première partie de ce travail se compose de simulations numériques effectuées pour étudier leur comportement sur des structures synthétiques typiques des zones karstiques. Ces simulations seront menées d'une part de manière à localiser les structures, et d'autre part de manière à les caractériser en déterminant leur orientation. La seconde partie de cette thèse est une étude pratique, en utilisant des sites de référence avec des résultats connus, afin de tester l'applicabilité des null-arrays sur le terrain. Cette thèse se divise alors en six chapitres :

Le premier chapitre, "**Introduction**", présente le contexte général de cette étude, les enjeux hydrogéologiques qui la motive ainsi que ses buts.

Le chapitre 2, "**Méthodes géoélectriques**" présente les bases de la théorie de l'électricité, puis les principes des méthodes géoélectriques, qui peuvent être utilisés selon quatre modes différents : les sondages verticaux (Vertical Electrical Sounding ou VES), les profils, les tomographies électriques (Electrical Resistivity Tomography ou ERT) et les mesures azimutales. Les différentes configurations, appelées des "arrays", utilisées dans ce travail sont alors montrées puis leurs limites sont discutées. Le concept de null-array est alors expliqué, ainsi que le lien entre ces null-arrays et les arrays classiques<sup>2</sup>. Les trois null-arrays étudiés dans ce travail sont finalement présentés.

Le chapitre 3, "**Développement d'outils pour l'interprétation géoélectrique**", discute la manière particulière dont les mesures vont être interprétées dans ce travail. En effet, comme l'inversion des mesures obtenues avec les null-arrays est plus compliquée que pour des mesures classiques, l'interprétation doit être menée de manière différente. L'idée est ici d'effectuer une

---

2. Par "classique", il faut comprendre les dispositifs conventionnels utilisés en prospection géoélectrique, par opposition aux null-arrays.

série de simulations des différents null-arrays sur différentes structures typiques, afin de comparer et ainsi interpréter les mesures de terrain en se basant sur le catalogue établi à l'aide de ces simulations. La simulation de ces mesures se fera sur un logiciel d'hydrodynamique, en tirant parti des analogies hydrodynamiques-électriques sur le plan mathématique. Des tests numériques seront aussi effectués et discutés, notamment sur la force des signaux générés par ces méthodes, l'effet du contraste de résistivité des structures ainsi que sur une astuce pour corriger les divergences numériques créées par le maillage de calcul.

Le chapitre 4, "**Modélisation numérique**" présente dans un premier temps les sept structures synthétiques étudiées. Celles-ci peuvent être groupées en trois "familles" : les failles, la zone de contact (ou zone de transition) et les cavités. Les trois null-arrays étudiés sont donc simulés sur ces structures, avec des mesures en profil et des mesures azimutales. Une discussion sur les aptitudes de ces dispositifs pour la détection et la caractérisation de ces différentes structures est ensuite présentée, ainsi qu'une approche analytique concernant les questions liées à une estimation de la profondeur d'investigation.

Le chapitre 5, "**Mesures de terrain**" présente l'application des trois null-arrays, en mode profil et azimutal, sur trois terrains tests dans le Jura suisse. En parallèle, des méthodes géophysiques "classiques", géoélectriques et électromagnétiques, sont effectuées afin de valider les mesures. L'interprétation des données des null-arrays se basent alors sur les simulations du chapitre précédent. Les trois terrains tests choisis sont Les Breuleux, avec une carrière traversée par plusieurs familles de failles ; Vers chez le Brandt, zone karstifiée traversée par une grotte ; et Buix, plaine alluviale composée de chenaux naturels.

Le chapitre 6, "**Discussions et conclusions**", présente les avantages et inconvénients des méthodes développées, leurs forces et leurs limites, leur applicabilité, leurs perspectives ainsi que les améliorations qui pourraient encore y être apportées.

# MÉTHODES GÉOÉLECTRIQUES

---

Durant les dernières décennies, les avancées technologiques en prospection géoélectrique ont été importantes. Aujourd'hui, ces méthodes sont les plus utilisées à travers le monde pour des investigations géophysiques de subsurface, combinant souvent des sondages verticaux et des profils. La plupart des techniques d'inversion des sondages verticaux supposent que le sous-sol est composé de couches horizontales (Parker, 1984). Les variations latérales des propriétés électriques du sous-sol sont en général identifiées par des profils électriques (Edwards, 1977) en utilisant des configurations d'électrodes appropriées atteignant différentes profondeurs (Roy et Apparao, 1971; Marescot, 2004).

Des structures subverticales, comme des failles ou des fractures, sont difficiles à identifier avec des profils géoélectriques traditionnels, puisque la sensibilité aux perturbations latérales est une faiblesse intrinsèque de ces méthodes. Pourtant, certaines configurations, comme le dipôle-dipôle array, montrent une sensibilité plus importante aux variations latérales que d'autres configurations (Loke, 1999). Les mesures azimutales utilisant des configurations géoélectriques classiques ont été utilisées pour identifier des structures verticales (Taylor et Fleming, 1988), même si les valeurs mesurées peuvent changer en fonction de la position de la mesure par rapport à la structure (Busby, 2000).

Szalai *et al.* (2002) ont introduit le terme de géoélectrique "null-array" pour identifier les structures subverticales. Cette méthode se base sur la méthode dite d'anomalie pure ("pure anomaly method" en anglais) développée par Tarkov (1957). Le principe de la méthode des null-arrays est d'utiliser des configurations d'électrodes particulières qui donne un signal nul sur un sol homogène ou sur une structure parfaitement horizontale. Tout signal qui diffère alors de zéro montre la présence d'une anomalie latérale. Ainsi, les null-arrays paraissent très

utiles pour l'identification de structures subverticales. La raison pour laquelle ces configurations n'ont pas été beaucoup utilisées jusqu'ici est liée au signal mesuré, qui est supposé très, voir trop, faible. De plus, il y a aussi un problème d'interprétation, lié à un facteur géométrique théoriquement infini. Ainsi, jusqu'ici, seulement cinq null-arrays différents ont été étudiés sur les terrains et par des analyses numériques. Ces études montrent que le signal est suffisant d'une part, et que les problèmes liés à l'inversion peuvent être facilement évités par une interprétation directe des signaux d'autre part. (Szalai *et al.* 2002 ; Szalai *et al.* 2004).

Ce chapitre présente une introduction théorique générale aux méthodes géoélectriques. Dans un premier temps, les méthodes géoélectriques classiques sont présentées, suivies par une première discussion sur les null-arrays.

## 2.1 Les méthodes géoélectriques

Les explorations géoélectriques sont basées sur la réponse du sol à un courant électrique. Généralement, un courant électrique est injecté dans le sol à travers deux électrodes de courant, et deux électrodes de potentiel mesurent la tension électrique. Avec ces deux informations, le courant et la tension, une résistivité apparente peut être calculée. Cette résistivité apparente dépend alors uniquement des positions des électrodes (donc le dispositif) et du sol lui-même bien sûr. Le terme "apparent" reflète le fait que la résistivité du sous-sol est une combinaison des résistivités des différents matériaux qui le composent.

Ainsi, les résistivités apparentes peuvent varier énormément. La teneur en eau ou en argile est le facteur principal de la variation de la résistivité. D'autres facteurs importants peuvent influencer cette valeur, comme la porosité ou la salinité. Comme l'eau minéralisée a une résistivité électrique assez basse, la mesure de cette valeur peut aider à déterminer les milieux saturés ou non-saturés et peut ainsi mener à une estimation du volume poreux dans le sous-sol.

La profondeur de mesure atteinte par les sondages dépend de la distance entre les électrodes de courant. Plus les électrodes sont espacées, plus le sondage atteindra de grande profondeur. Pour chaque mesure, il est important de noter que la résistivité mesurée est une valeur apparente, et ne correspond pas à une valeur réelle. Cette valeur apparente peut donc être perçue comme une moyenne des différents chemins que le courant électrique parcourt dans le sous-sol. Avec les différentes valeurs de résistivité apparentes mesurées pour différents espacements entre les électrodes, le set de données peut être interprété en terme de lithologie et de modèle géologique. Le terme "inversion" indique alors ce processus : retrouver une "vraie" structure ou géométrie du sol à partir des mesures de résistivités apparentes.

### 2.1.1 La loi d'Ohm

La loi d'Ohm décrit les propriétés électriques d'un flux de courant dans un milieu donné. Cette loi simple dit que la différence de potentiel, ou tension,  $\Delta V$  (V) entre deux points est proportionnelle au courant  $I$  (A) traversant ce milieu et à sa résistance  $R$  ( $\Omega$ ).

$$\Delta V = RI \quad (2.1)$$

La valeur de résistance ne dépend pas seulement du matériel, mais aussi de la géométrie, donc de la taille, de ce milieu. Ainsi, connaissant la résistance  $R$  dans un câble de longueur  $L$  et de section  $S$ , la résistivité  $\rho$  peut être déterminée selon l'équation

$$\rho = R \frac{S}{L} = Rk \quad (2.2)$$

où  $k$  est appelé *facteur géométrique*, qui a le mètre  $m$  comme unité. Dans le cas de la terre, ce facteur doit encore être déterminé, puisque le sol ne se comporte pas comme un simple fil. Il dépend alors uniquement de la configuration géométrique des électrodes.

Les valeurs de résistivité dans des milieux naturels peuvent changer de neuf ordres de grandeur, entre 0.1 et  $10^8 \Omega m$ . La table 2.1 montre quelques valeurs typiques pour différents types de roches.

TABLE 2.1 – Gamme de résistivité et valeur typique pour différents matériaux terrestres. Tiré de : <http://www.lightningman.com.au/Earthing.pdf>

Matériau	Valeur typique ( $\Omega m$ )	Gamme de valeur ( $\Omega m$ )
Eau de mer	2	0.1 – 10
Argile, marnes (Aquiclude)	30	10 – 70
Eau souterraine & eau de source	50	10 – 150
Sable (Aquifer)	100	50 – 400
Schiste & grès	120	10 – 1000
Tourbe, terreau & boue	150	5 – 250
Gravier (Aquifer)	200	150 – 500
Lac & ruisseau (eau)	250	100 – 400
Sable (sec)	2000	200 – 3000
Granites & basaltes	4000	10'000 – 50'000
Calcaires & dolomites	2000	100 – 10'000
Gravier morainique	3000	40 – 10'000
Granite compacte	25'000	10'000 – 50'000
Glace	100'000	10'000 – 100'000
Eau pure	180'000	10'000 – 250'000

Dans cette table, certaines valeurs identiques peuvent être trouvées pour divers types de roches. Ainsi, une valeur de résistivité ne peut pas être directement liée à une roche, puisque la porosité,

la salinité, la perméabilité et la teneur en eau jouent des rôles importants sur la valeur de la résistivité. Il est alors impossible d'identifier un type de roche en utilisant uniquement une mesure de résistivité.

### 2.1.2 La théorie électrique

Pour expliquer et déterminer le facteur géométrique dans le cas d'une mesure géoélectrique, le flux de courant électrique dans le sol doit être calculé. La théorie complète et le développement des équations sont expliqués par Telford *et al.* (1990) et basés sur les équations de Maxwell. La forme vectorielle et généralisée de la loi d'Ohm doit être utilisée :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = -\frac{1}{\rho} \nabla V \quad (2.3)$$

où  $\vec{J}$  est la densité de courant,  $\sigma$  la conductivité électrique (l'inverse de la résistivité),  $\rho$  la résistivité électrique et  $\vec{E}$  le champ électrique. Les unités de la densité de courant sont  $Am^{-2}$ . Le dernier terme de cette équation est lié au fait que le champ électrique  $\vec{E}$  est opposé au gradient du potentiel électrique  $\nabla V$ . La Fig. 2.1 montre les lignes de courant électrique ( $\vec{E}$ ) et les lignes d'équipotentiels ( $V$ ) dans le cas d'un sol homogène.

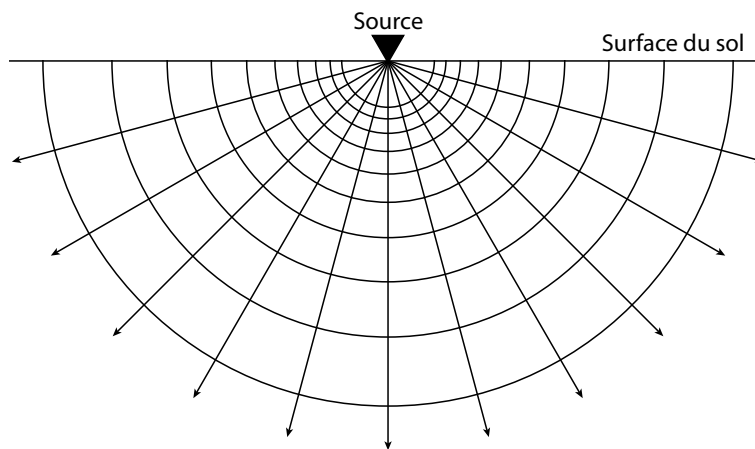


FIGURE 2.1 – Distribution des flux de courant  $\vec{E}$  (flèches) et des lignes d'équipotentiels  $V$  (lignes traitillées) induites par une source ponctuelle dans un sol homogène.

Dans le cas d'une source ponctuelle, la densité de courant est en fait donnée par le courant total  $I$  traversant une demi-sphère virtuelle de rayon  $r$  donné. Ce rayon  $r$  représente la distance à laquelle la densité de courant est calculée par rapport à la source ponctuelle. Cette densité de courant peut facilement être calculée avec l'équation 2.3

$$J = \frac{I}{\frac{1}{2}(4\pi r^2)} = -\frac{1}{\rho} \frac{dV}{dr} \quad (2.4)$$

Dans le cas homogène où  $\rho$  est identique partout, cette équation a une solution simple

$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (2.5)$$

où  $r$  est la distance entre l'électrode et la source et  $I$  le courant total injecté dans le milieu.

Le potentiel électrique est mesuré entre deux électrodes notées  $M$  et  $N$  et les deux électrodes de courants sont notées  $A$  et  $B$ . Supposant les quatre distances  $AM$ ,  $AN$ ,  $BM$  et  $BN$ , l'équation suivante peut être obtenue pour le calcul du potentiel théorique entre  $M$  et  $N$

$$\Delta V = V_{MN} = \frac{\rho I}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right] \quad (2.6)$$

En utilisant la loi d'Ohm (équation 2.2), le facteur géométrique  $k$  peut être calculé dans le cas général d'un quadripôle

$$k = \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right)} \quad (2.7)$$

## 2.2 Les configurations géoélectriques classiques

Pour effectuer un sondage géoélectrique, les quatre électrodes sont typiquement alignées, avec les électrodes de courant  $A$  et  $B$  à chaque extrémité du dispositif et les électrodes de potentiel  $M$  et  $N$  au milieu. Mais il est également possible d'utiliser n'importe quelle autre configuration, avec les électrodes alignées ou non. Ainsi, en augmentant progressivement l'espacement entre les électrodes de courant, la résistivité apparente d'une demi-sphère virtuelle de rayon croissant est alors mesurée. Cela permet d'obtenir des informations à différentes profondeurs, puisque plus l'espacement entre les électrodes est grand, plus le courant pénétrera profondément dans le sol. Les profondeurs des sondages sont connues comme représentant approximativement 20% de la distance entre les électrodes de courant  $AB$  (Roy et Apparao, 1971). Cela permet d'avoir différentes valeurs de résistivités à différentes "profondeurs", et donc d'avoir des informations sur le sol en considérant qu'il est composé de plusieurs couches horizontales.

Parmi la centaine de différents dispositifs géoélectriques qui existent (Szalai et Szarka, 2008a), les quatre utilisés dans ce travail vont être présentés. Dans cette étude, le terme "dispositif classique" (ou "array classique") est utilisé en opposition au terme de "null-array", qui va être présenté plus loin.

Ces différents dispositifs peuvent être utilisés selon différents modes :

1. En augmentant l'espacement des électrodes autour du centre de symétrie du dispositif, une mesure de la variation verticale (donc en fonction de la profondeur) de la résistivité va être obtenue. Ce mode est appelé "*Vertical Electrical Sounding (VES)*"

2. En déplaçant le dispositif à la surface avec un espacement fixe des électrodes, une mesure de la variation latérale de la résistivité va être obtenue. Ce mode est appelé le "*profil*"
3. En mélangeant les deux premiers modes avec un système d'acquisition automatique qui utilise plusieurs électrodes à la fois (typiquement au moins 30), une mesure bi-dimensionnelle dans un plan vertical de la variation de la résistivité va être obtenue. Ce mode est appelé "*Electrical Resistivity Tomography (ERT)*", ou simplement "tomographie".
4. En faisant tourner le dispositif à la surface autour de son centre de symétrie avec un espacement fixe des électrodes, une mesure en fonction de l'orientation de la variation de la résistivité va être obtenue. Ce mode est appelé "*azimutal*"

### Wenner array

Le *Wenner array* est la configuration la plus simple et peut-être la plus utilisée autour du monde. Cette configuration consiste en quatre électrodes alignées avec un espacement constant  $a$  entre chacune d'elles (cf. Fig. 2.2).

Le facteur géométrique  $k$  de ce dispositif a la forme la plus simple de tous les dispositifs :  $2\pi a$ . Dans ce genre de sondage, la résistivité apparente  $\rho_a$  se calcule alors par

$$\rho_a = 2\pi a R = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}. \quad (2.8)$$

Pour des sondages verticaux, les électrodes sont alors déplacées autour du centre de dispositif, où la mesure est supposée être effectuée, en augmentant la valeur de  $a$ .

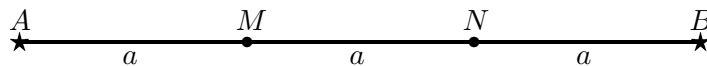


FIGURE 2.2 – Configuration des électrodes de courant  $A$  et  $B$  et des électrodes de potentiel  $M$  et  $N$  dans une mesure utilisant le Wenner array.

La configuration Wenner est la plus utilisée pour les tomographies (ERT) puisque l'espacement entre les électrodes est toujours constante. Elle est alors la plus aisée à mettre en oeuvre.

### Schlumberger array

Le *Schlumberger array* consiste en quatre électrodes alignées, avec une séparation entre les deux électrodes de courant de  $2L$  et une autre séparation entre les deux électrodes de potentiel  $2d$  (cf. Fig. 2.3).

Le facteur géométrique  $k$  de cette configuration est :  $\pi \frac{L^2 - d^2}{2d}$ .

Dans ce genre de sondage, la résistivité apparente  $\rho_a$  se calcule alors par

$$\rho_a = \pi \frac{L^2 - d^2}{2d} R = \pi \frac{L^2 - d^2}{2d} \frac{V}{I} \quad (2.9)$$

Pour des sondages verticaux, les électrodes de courant sont alors déplacées autour du centre du dispositif, où la mesure est effectuée, en augmentant la valeur de  $L$ , alors que les électrodes de potentiel sont laissées fixes.

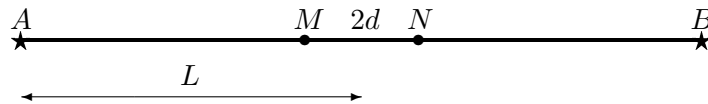


FIGURE 2.3 – Configuration des électrodes de courant  $A$  et  $B$  et des électrodes de potentiel  $M$  et  $N$  dans une mesure utilisant le Schlumberger array.

La configuration Schlumberger est la plus utilisée pour les sondages verticaux (VES) puisque seulement deux des quatre électrodes doivent être déplacées entre deux mesures.

### Dipôle-dipôle array

Le *dipôle-dipôle array* consiste en quatre électrodes alignées avec une séparation constante  $a$  entre les deux électrodes de courant d'un côté du dispositif et entre les deux électrodes de potentiel de l'autre côté du dispositif (cf. Fig. 2.4). Les deux électrodes de potentiel sont elles espacées d'une distance de  $na$  des deux électrodes de courant, où  $n$  est un nombre entier.

Le facteur géométrique  $k$  est :  $\pi n(n+1)(n+2)a$ .

Dans ce genre de sondage, la résistivité apparente  $\rho_a$  se calcule alors par

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a R = \pi n(n+1)(n+2)a \frac{V}{I} \quad (2.10)$$

Pour effectuer une mesure, les deux électrodes de potentiel sont éloignées des deux électrodes de courant, en augmentant la valeur de  $n$ .

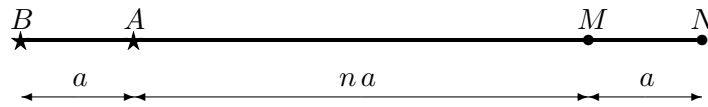


FIGURE 2.4 – Configuration des électrodes de courant  $A$  et  $B$  et des électrodes de potentiel  $M$  et  $N$  dans une mesure utilisant le dipôle-dipôle array.

La configuration dipôle-dipôle est aussi utilisée en tomographie (ERT), car elle est la configuration la plus sensible aux structures verticales (Loke, 1999).

### Pôle-dipôle array

Le *pôle-dipôle array* consiste théoriquement en seulement trois électrodes : une de courant et deux de potentiel, séparées d'une distance  $a$ . Le centre des deux électrodes de potentiel est positionné à une distance  $L$  de l'électrode ce courant  $A$  (cf. Fig. 2.5).

Le facteur géométrique  $k$  est :  $\pi \frac{4L^2 - a^2}{2a}$ .

Dans ce genre de sondage, la résistivité apparente  $\rho_a$  se calcule alors par

$$\rho_a = \pi \frac{4L^2 - a^2}{2a} R = \pi \frac{4L^2 - a^2}{2a} \frac{V}{I} \quad (2.11)$$

Pour effectuer une mesure, les deux électrodes de potentiel sont éloignées de l'électrode de courant en augmentant la valeur de  $L$ . En réalité, une quatrième électrode  $B$  doit être utilisée et placée "à l'infini".

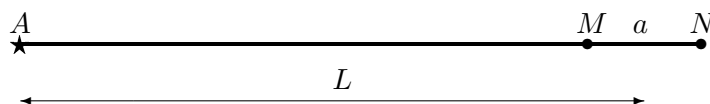


FIGURE 2.5 – Configuration de l'électrode de courant  $A$  et des électrodes de potentiel  $M$  et  $N$  dans une mesure utilisant le pôle-dipôle array.

La configuration pôle-dipôle est la moins utilisée parmi celles présentées ici, principalement à cause de cette quatrième électrode  $B$  placée "à l'infini" qui pose souvent des problèmes et des contraintes dans les cas appliqués.

## 2.3 Limitations des méthodes classiques

Les méthodes géoélectriques sont bien connues et utilisées depuis longtemps. Schlumberger et Wenner étaient les premiers à les utiliser au début du vingtième siècle, puisque le principe de base est extrêmement simple. Mais l'interprétation de ces données n'est pas si facile, et plusieurs études pour retrouver une géométrie ou une structure avec des valeurs de résistivités vraies ont mené au théorème mathématique de l'unicité (Langer, 1933). Ce théorème n'est pas applicable dans les cas de terrain, à cause des erreurs de mesures et de la non continuité des mesures. Dès lors, dans ce genre de mesures, il faut supposer que le sol est composé de couches horizontales (Parker, 1984). Edwards (1977) commence à utiliser les profils géoélectriques (Marescot, 2004) et ajoute des études sur la profondeur d'investigation. De là, les variations verticales deviennent plus facilement identifiables dans les mesures de terrain et les profondeurs d'investigation des différentes configurations classiques deviennent bien définies, par exemple par (Evjen, 1938; Roy et Apparao, 1971; Edwards, 1977).

Néanmoins, les structures verticales demeurent difficilement identifiables, puisque la sensibi-

lité aux variations latérales, comme des fractures ou des failles, sont une grande faiblesse des méthodes géoélectriques (Tabbagh *et al.*, 2007). Même si certaines configurations sont connues pour être plus sensibles aux changements horizontaux, donc aux structures verticales - comme le dipôle-dipôle array (Loke, 1999) par exemple - et si des mesures azimutales peuvent donner des informations pour ce genre de structures (Taylor et Fleming, 1988), la localisation, l'identification, la caractérisation et la détermination de l'orientation des structures verticales est toujours un problème majeur des études géoélectriques. D'autres méthodes, comme les méthodes électromagnétiques, peuvent aider à répondre à ces questions, mais un manque de précision et/ou de résolution apparaît alors souvent et ces problèmes de localisation, d'identification, de caractérisation, et d'orientation ne trouvent parfois pas de solution dans les cas appliqués.

Les null-arrays semblent alors pouvoir amener une solution à ces limitations et ces problématiques. De plus, et en opposition à des méthodes électromagnétiques, les null-arrays ne sont presque pas perturbés par des lignes électriques. Ce dernier point est important étant donné que beaucoup de sites d'études se trouvent dans des zones urbanisées.

## 2.4 Les null-arrays

Tarkhov a présenté la méthode de l'anomalie pure, qui utilise des configurations géoélectriques particulières où le signal mesuré est nul sur un sous-sol homogène (Tarkhov, 1957). Ainsi, la présence d'anomalies peut être supposée dès qu'une valeur non nulle est mesurée. Mais cette méthode n'a pas été recommandée par l'auteur.

En 2002, Szalai et Szarka ont travaillé sur ces méthodes et les ont appelées "null-arrays" (Szalai *et al.*, 2002). Ce genre de configuration n'a pas été beaucoup utilisé ni étudié jusqu'ici, principalement à cause de la complexité de leur interprétation, des problèmes liés à l'inversion des données, au signal d'acquisition qui était supposé trop faible dans les cas pratiques et au fait que ces configurations n'existent pas dans la majorité des logiciels de simulations géoélectriques (Szalai *et al.*, 2004). Seulement cinq différents null-arrays ont été utilisés et étudiés à ce jour, sur le terrain et en simulation : le dipôle axial, le Schlumberger, le "three electrodes", le midpoint et le Wenner- $\gamma$  null-arrays (Szalai *et al.* 2002 ; Szalai *et al.* 2004).

Dans ce travail, trois différents null-arrays ont été choisis pour être analysés numériquement, puis testés sur le terrain et enfin discutés : le Wenner- $\gamma$  null-array noté **W $\gamma$ na** (Szalai *et al.*, 2010b) ; le Schlumberger null-array noté **Sna** (Bogolyubov, 1984), (Winter, 1994) ; et le midpoint null-array noté **MAN** (Szalai *et al.*, 2010b). Le choix de ces configurations s'est basé sur la simplicité de leur dispositif. En effet, si numériquement une configuration complexe n'est pas forcément un problème, elle peut vite le devenir pour les applications de terrain. Ainsi, la sélection des null-arrays étudiés a été faite avec le raisonnement suivant : un dispositif colinéaire

de trois électrode (MAN), un dispositif colinéaire de quatre électrode ( $W\gamma na$ ) et un dispositif non-colinéaire de quatre électrode (Sna). Leurs configurations sont présentées dans la Fig. 2.6. Les lettres "A" et "B" représentent toujours les électrodes de courant, alors que les lettres "M" et "N" représentent les électrodes de potentiel. La valeur  $c$  est le Nombre d'Or valant  $\frac{\sqrt{5}-1}{2}$ .

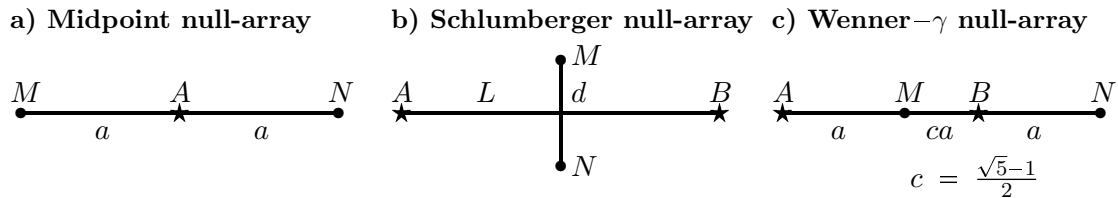


FIGURE 2.6 – Configurations des trois null-arrays : a) le midpoint null-array (MAN) avec une électrode  $B$  placée à l'infini, b) le Schlumberger null-array (Sna), et c) le Wenner- $\gamma$  null-array ( $W\gamma na$ ).

De par leur définition, le facteur géométrique théorique est infiniment grand. Il est alors impossible de calculer et de comparer des valeurs mesurées entre elles en terme de résistivité. Mais en ne considérant que la résistance (donc le rapport tension sur courant), un dispositif ayant deux tailles différentes pourrait alors produire le même signal en terme d'intensité. Le problème est alors que ce n'est pas représentatif de la taille de l'anomalie, puisque le volume considéré n'est pas le même. Pour résoudre ce problème, une valeur de résistivité "virtuelle" est calculée en utilisant un facteur géométrique dit équivalent. Cette valeur de résistivité pourrait alors être reliée à la force du signal mesuré. Cette valeur n'est alors plus une vraie résistivité et n'a dès lors plus de signification physique réelle.

Cette approche permet aussi d'effectuer des comparaisons quantitatives entre les configurations et les situations, ce que l'utilisation des cartes de sensibilités des paramètres, ou "parameter sensitivity maps" ne permet pas (Szalai et Szarka 2008a; Szalai et Szarka 2008b).

Le facteur géométrique d'une configuration classique dite équivalente est alors utilisé à la place de ce facteur infini pour résoudre ce problème. Par exemple, pour le midpoint null-array, le facteur géométrique du pôle-dipôle array est utilisé; pour le Schlumberger null-array et le Wenner- $\gamma$  null-array, le facteur géométrique du Schlumberger array classique équivalent est utilisé, avec les valeurs adaptées de  $a$ ,  $L$  et  $d$ .

Donc, en utilisant l'équation 2.9, le midpoint null-array utilise

$$L = \frac{3}{2}a$$

et le Wenner- $\gamma$  null-array

$$L = \left(1 + \frac{c}{2}\right) a \quad \text{et} \quad d = \frac{c}{2} a$$

pour calculer leur facteur géométrique respectif.

La table 2.2 donne alors les différentes valeurs de facteur géométrique pour les trois null-arrays.

TABLE 2.2 – Facteurs géométriques utilisés pour les trois null-arrays étudiés.

<b>Midpoint null-array</b>	$K = 4\pi a$
<b>Schlumberger null-array</b>	$K = \pi \frac{L^2 - d^2}{2d}$
<b>Wenner-<math>\gamma</math> null-array</b>	$K = \pi a \frac{c+1}{c}$

Avec ces facteurs, les valeurs de résistivités des null-arrays, qui sont en fait des valeurs liées à la force du signal mesuré, sont comparables entre elles, en prenant en compte le signal mesuré et la géométrie de la configuration. Ces valeurs ne sont pas liées aux valeurs absolues des vraies résistivités du sol étudié, mais seulement aux contrastes électrique dans le sol lié à la présence d'hétérogénéités.

En effet, sur une structure homogène, les valeurs mesurées par les null-arrays devraient être zéro partout. En fonction de l'orientation du dispositif, sur certaines structures symétriques, certains null-arrays devraient également fournir une valeur nulle. Dès lors, une étude du comportement de ces configurations est importante pour pouvoir ensuite les appliquer et les interpréter dans les cas pratiques.

Jusqu'ici, parmi les cinq null-arrays cités dans la littérature à ce jour, Szalai *et al.* (2002) ont étudiés les Schlumberger-, 3-électrodes- et dipôle axial- null-arrays sur le terrain d'une part, et en effectuant des profils en simulation numérique et des mesures azimutales en simulation analogique d'autre part. Szalai *et al.* (2004) ont ensuite étudié les midpoint- et Wenner- $\gamma$ -null-arrays en effectuant des simulations numériques sur des dykes et des zones de contact. Le midpoint null-array a également été testé sur une structure de horst. Ces deux null-arrays ont été "testé" sur le terrain sur une zone de contact et le midpoint null-array a été testé au-dessus d'un garage.

Cette thèse sélectionne donc trois null-arrays, ceux qui paraissent le plus aisé à appliquer sur le terrain, et les étudie de manière systématique sur une liste de structure de référence.



# DÉVELOPPEMENT D'OUTILS POUR L'INTERPRÉTATION GÉOÉLECTRIQUE

---

Ces dernières années, les études géophysiques étaient souvent menées de deux manières différentes : soit en développant de nouvelles méthodes, soit en développant des nouveaux codes ou algorithmique d'inversions. Les simulations géoélectriques directes sont parfois limitées par les logiciels commerciaux à certaines configurations d'électrodes et à des structures simples du point de vue du maillage. De plus, le choix de l'orientation des dispositifs par rapport aux structures n'est pas toujours possible sur un même maillage.

Plusieurs codes existent qui permettent de développer de manière plus libre la configuration des électrodes utilisée ou une structure plus fine du maillage. Par exemple, le logiciel "BERT" (Boundless Electrical Resistivity Tomography) de Günther et Rücker permet d'éviter les limitations des logiciels commerciaux (Günther et Rücker, 2013). Ce logiciel donne une totale liberté de création du maillage, avec topographie, grâce à son maillage créé sur des triangles (pour les maillages 2D) et sur des tétraèdre (en 3D) et effectue des simulations calculées en éléments finis.

"R3t" de Binley est un autre exemple de logiciel qui permet un calcul direct et inverse en trois dimensions avec des éléments en forme de tétraèdres ou de prismes triangulaires. Les électrodes peuvent ici se trouver sur n'importe quel noeud du maillage (Binley, 2013).

Dans ce travail, une approche un peu différente a été utilisée. Elle utilise une série de simulations numériques directes sur un panel de structures afin d'interpréter les données de terrain. L'aspect original de cette approche est l'utilisation d'un logiciel de simulation hydraulique pour effectuer ces simulations de données géoélectriques. Deux principaux avantages découlent alors

de cette manière de faire. D'une part, l'absence de contrainte liée à la structure, qui peut être modélisée en trois dimensions avec des prismes triangulaires dans un logiciel commercial et ergonomique, facile à utiliser. D'autre part, la liberté complète sur la configuration étudiée, qui est souvent prédéfinie dans les logiciels commerciaux de simulations géoélectriques, est un grand avantage notamment pour les mesures azimutales ou les configurations non colinéaires.

Dans ce chapitre, l'analogie entre les théories de l'hydraulique et de l'électricité est alors présentée dans un premier temps, suivi par une technique qui corrige considérablement l'effet du maillage, pour finir avec quelques tests sur l'effet des différents paramètres utilisés.

### 3.1 Analogie des théories hydraulique et électrique

Les théories hydraulique et électrique suivent l'équation 3.1. Ces deux équations sont mathématiquement identiques.

$$S \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot (-K \nabla H) = q \quad \Leftrightarrow \quad C^* \frac{\partial V}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -\frac{1}{\rho} \nabla V \right) = i \quad (3.1)$$

où  $S$  le coefficient d'emmagasinement ( $m^{-1}$ ),  $K$  la perméabilité hydraulique ( $m s^{-1}$ ),  $H$  la charge hydraulique ( $m$ ),  $q$  la densité de source volumique ( $s^{-1}$ ),  $C^*$  est la capacité électrique par unité de volume ( $F m^{-3}$ ),  $V$  la tension électrique ( $V$ ),  $\rho$  la résistivité électrique ( $\Omega m$ ), et  $i$  la densité de courant électrique ( $A m^{-3}$ ). La partie hydraulique de l'équation 3.1 représente un débit par unité de volume, exprimé en  $\frac{m^3/s}{m^3}$ , alors que la partie électrique représente un courant par unité de volume, exprimé en  $\frac{C/s}{m^3}$ .

En supposant un aquifer confiné (ce qui permet d'éviter des problèmes gravitaires) en écoulement permanent pour l'approche hydrodynamique et du courant électrique continu pour l'approche électrique, l'équation 3.1 peut être réécrite et simplifiée par l'équation 3.2

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{K_h} = k \frac{\Delta H}{Q} \quad (3.2)$$

où  $I$  est le courant électrique ( $A$ ),  $Q$  le débit ( $m^3 s^{-1}$ ) et  $k$  ( $m$ ) est un facteur lié à la géométrie de la situation (position des électrodes pour l'approche électrique et position des puits et des points d'observation pour l'approche hydrodynamique).

Les théories hydraulique et électrique suivent ainsi les équations de Darcy et de Poisson, respectivement (équation 3.2). Comme ces équations sont mathématiquement identiques, le comportement de ces domaines physiques sont exactement les mêmes : le courant électrique correspond au débit hydraulique ; la tension électrique correspond à la différence de charge hydraulique ; la résistivité électrique (ou conductivité) correspond à la résistivité hydraulique (ou conductivité).

C'est de cette analogie bien connue qu'est venue l'idée d'utiliser le logiciel de simulations numériques hydrodynamiques afin de simuler des données géoélectriques. N'importe quel dispositif géoélectrique peut ainsi être simulé, sur n'importe quelle structure, simple ou complexe. Le choix du dispositif n'est pas limité, et les structures synthétiques n'ont pas à être approximées à cause de contraintes de maillage.

Avant de faire cette étude, un cas simple a été simulé sur le logiciel hydrodynamique et comparé aux résultats du même cas simulé sur un logiciel de géoélectrique, afin de vérifier le fonctionnement de l'analogie.

En hydrodynamique, des logiciels bien connus et très développés existent, comme par exemple Feflow (WASY, Berlin). Ce genre de logiciel donne des résultats extrêmement précis avec des conditions initiales totalement libres. Ainsi, il est possible de créer par exemple un maillage triangulaire aussi bien qu'un maillage quadrangulaire, et donc de créer des structures obliques avec une interface douce. Les puits, et donc les électrodes, peuvent aussi être implémentés n'importe où dans le modèle. La seule et unique contrainte d'utiliser un tel logiciel pour simuler des données géoélectriques est la nécessité de travailler en trois dimensions, même pour simuler un cas unidimensionnel ou bidimensionnel. En effet, en travaillant en deux dimensions, les puits ne seraient plus des sources ponctuelles, mais des tranchées ; ce qui implique que l'analogie avec le cas électrique n'est plus valable.

En pratique dans Feflow (WASY, Berlin), les électrodes de courant sont donc des puits, et les électrodes de potentiel sont des points d'observation où la charge hydraulique est mesurée. La différence de charge donne alors la tension électrique. Les simulations sont menées en état stationnaire et dans un milieu saturé. L'avantage du régime permanent est le temps de calcul beaucoup plus court. Ce dernier, étant plus simple, permet d'avoir des modèles plus grands en terme de nombre de noeuds ou d'éléments par rapport au régime transitoire. Par exemple, certains maillages dépassent largement le million d'éléments. En utilisant un ordinateur standard (DualCore @ 3.10 GHz, 3 Go RAM), une simulation ne nécessite que quelques dizaines de secondes, alors qu'elle durerait plusieurs minutes ou heures en régime transitoire.

Les résistivités apparentes de n'importe quel dispositif sur n'importe quelle structure, uni-, bi- ou tridimensionnelle, peuvent alors être calculées. Fig. 3.1 montre une comparaison des simulations directes effectuées avec les mêmes paramètres sur un logiciel hydraulique et sur un logiciel de géoélectrique, sur une structure unidimensionnelle à trois couches. La première couche a une résistivité  $\rho_1 = 700 \Omega m$  et une épaisseur de  $2 m$ , la deuxième couche une résistivité  $\rho_2 = 50 \Omega m$  et une épaisseur de  $5 m$  et la troisième couche une résistivité  $\rho_3 = 300 \Omega m$ . La ligne traitillée montre les résistivités apparentes calculées avec Res2dmod (Loke, 1999) alors que la ligne pleine montre les résistivités apparentes calculées avec Feflow (WASY, Berlin). La déviation standard entre ces deux courbes, composées de 6 points, est de 1.35 %.

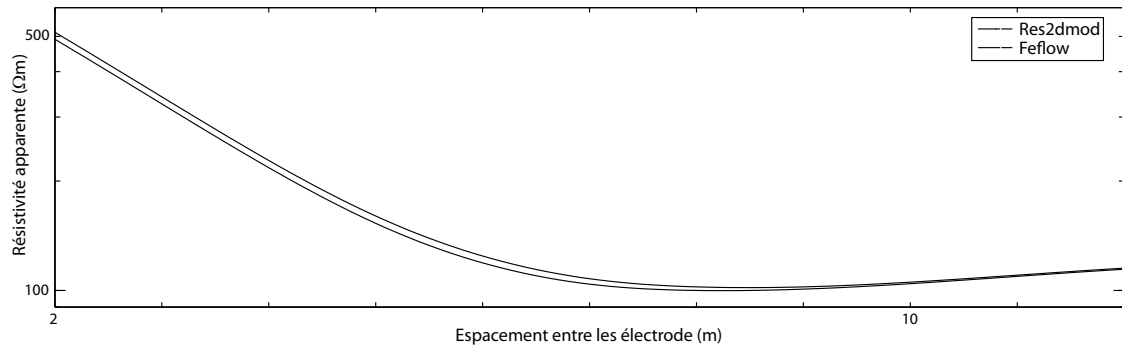


FIGURE 3.1 – Résistivité apparente ( $\Omega m$ ) en fonction de l'espacement des électrodes ( $m$ ) calculée avec Res2Dmod (Loke, 1999) en ligne traitillée et Feflow (WASY, Berlin) en ligne pleine.

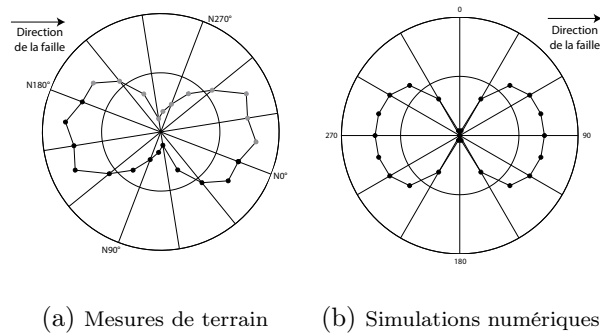


FIGURE 3.2 – Exemple de mesure de terrain et de simulation avec le midpoint null-array sur une structure composée d'une faille verticale.

Afin de confirmer la validation de l'utilisation de Feflow (WASY, Berlin) pour les simulations géoélectriques, une mesure a été effectuée sur une structure connue, d'une part sur le terrain et d'autre part simulée numériquement. Le midpoint null-array en mode azimuthal a ainsi été utilisé sur une structure composée d'une faille verticale. Comme montré sur le Fig. 3.2, la forme des deux figures sont très proches l'une de l'autre, le diagramme ayant des valeurs proches de zéro dans la direction perpendiculaire à la faille.

## 3.2 Modèle de simulation et effets du maillage

Avant d'effectuer les différentes simulations, certains aspects doivent encore être discutés. Les intensités des signaux mesurés doivent être définis et le terme "signal" doit être précisé. Certaines structures étudiées devraient engendrer un contraste de résistivité important, ce qui pourrait impliquer des divergences numériques au niveau des simulations. Le contraste résistif utilisé dans les simulations est alors également un sujet à aborder. Un dernier point, important principalement pour les mesures azimutales, est l'effet du maillage sur ces simulations. En effet, les null-arrays devraient mesurer un signal nul sur une structure homogène. Les limites, irrégularités et asymétries du maillage pourraient alors être les causes de signaux non désirés dans les simulations. Il faut ici préciser que ces effets sont faibles, voire négligeables, pour des simulations sur des mesures classiques ; mais avec les null-arrays, qui sont sensés mesurer un signal nul s'il n'y a aucune structure, ces effets peuvent alors prendre de l'importance.

### 3.2.1 Force du signal

Le mot "*signal*" doit être clairement défini, puisque le signal mesuré avec les null-arrays est supposé faible (Szalai *et al.*, 2002). Le premier sens du mot signal pourrait être "ce qui est mesuré/simulé". Cette définition est ambiguë puisque le courant et la tension électrique sont mesurés ; il faudrait alors les combiner en une seule valeur : la résistance électrique ( $\Omega$ ). Cette valeur serait alors directement liée à la force du signal et pourrait être une définition du mot "signal".

Mais dans les mesures géoélectriques, plus les électrodes sont éloignées et plus faible sera la résistance mesurée, même si cela ne signifie pas que le signal est faible. Il faut donc tenir compte de la géométrie du dispositif. Le terme de résistivité électrique ( $\Omega m$ ) apparaît alors comme étant plus clairement lié à la force du signal et est obtenu par le calcul du *facteur géométrique*  $k$  présenté dans l'équation 2.2 à la section 2.1.1 et dans le tableau 2.2 de la section 2.3 pour les null-arrays. Particulièrement dans le cas des null-arrays, qui ne mesurent plus des résistivités "vraies" mais un signal généré par des anomalies, ces valeurs n'ont plus de signification physique. Le signal mesuré sous forme de "fausse" résistivité est en fait directement une valeur liée à la force du signal.

La Fig. 3.3 représente un même set de données, une fois en terme de résistance (Fig. 3.3a) et une fois en terme de résistivité (Fig. 3.3b). Ces mesures ont été effectuées sur le profil  $P2$  à Buix (voir section 5.4). Le Wenner- $\gamma$  null-array avec  $a = 10m$  semble avoir un signal faible en terme de résistance en comparaison au petit dispositif ( $a = 5m$ ). Mais en terme de résistivité, les deux signaux sont d'intensité comparable. La différence étant que dans le calcul de la résistivité, la taille du dispositif est prise en compte.

Ainsi, pour les null-arrays et physiquement parlant, il paraît plus correct de lier la force du signal aux valeurs de "résistivités", puisqu'il est ainsi possible de faire des comparaisons entre

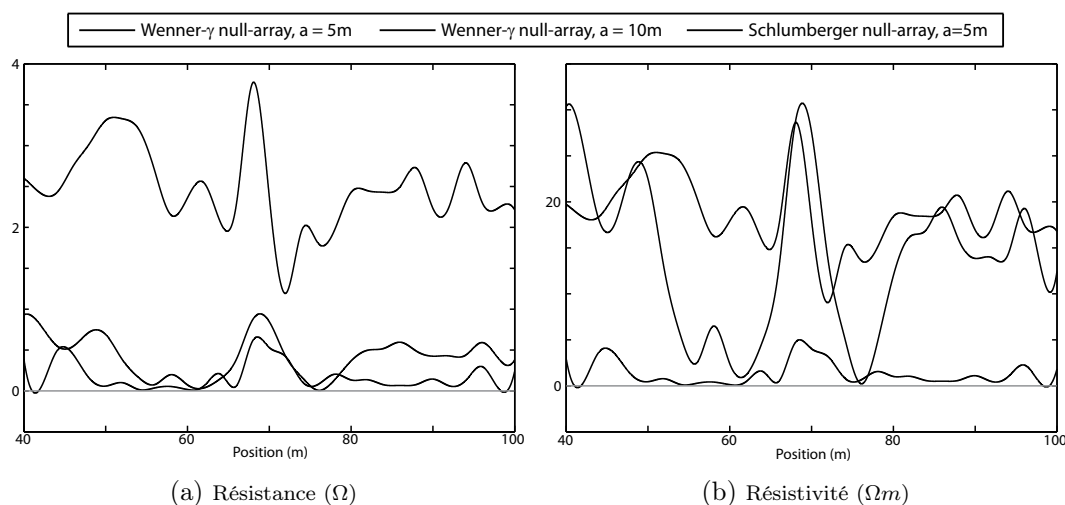


FIGURE 3.3 – Différence entre a) résistance and b) résistivité, mesuré sur le profil  $P2$  à Buix.

différents null-arrays et différents espacements entre les électrodes.

*Dorénavant, le terme "signal" sera toujours associé à une valeur de "résistivité", bien qu'elle ne représente pas de vraie résistivité dans le cas des null-arrays.*

### 3.2.2 Contraste de résistivité

Dans un cas de terrain, le contraste de résistivité entre le sol et une faille, par exemple, peut être très élevé. Les simulations numériques pourraient mener à un résultat erroné si de forts contrastes provoquent des divergences de calcul. Une petite étude des contrastes de résistivité est dès lors très utile, pour s'assurer de la convergence des résultats.

La sensibilité aux contrastes de résistivités électriques est ici testé avec le midpoint null-array - qui est le plus facile et donc rapide à mettre effectuer - sur une structure identique à celle présentée à la Fig. 4.1a, dans le chapitre 4. Dans un premier temps, différents profils sont simulés avec différents contrastes de résistivités entre un milieu et une faille, positionnée à  $0m$  sur la Fig. 3.4.

Sans surprise, la Fig. 3.4 montre que plus le contraste est grand, plus fort est le signal. Si le contraste est proche de 1, la structure synthétique est alors un milieu homogène et la simulation donne alors une valeur nulle.

Ensuite, une simulation avec le midpoint null-array a été effectuée à une position donnée, en faisant cette fois varier le contraste de résistivité. La Fig. 3.5 montre ces résultats pour deux espacements d'électrodes différents ( $a = 2m$  and  $a = 4m$ ), sur une faille résistive et sur une faille conductive .

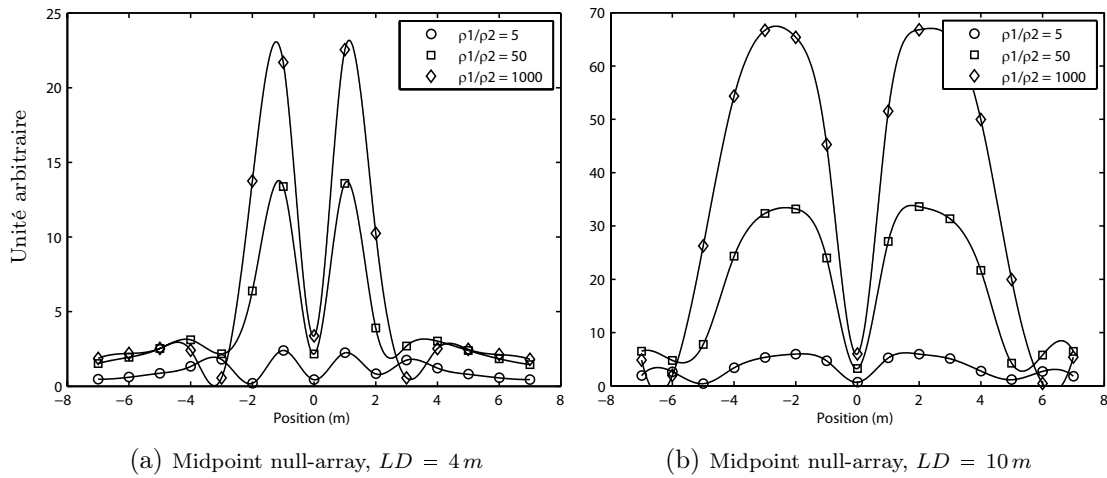


FIGURE 3.4 – Simulations numériques du midpoint null-array pour différents contrastes de résistivité et pour différents espacements des électrodes sur une faille conductive.  $\rho_1$  est la résistivité du milieu et  $\rho_2$  celle de la faille.

Dans les deux cas, il y a convergence pour le contraste jusqu'à une valeur de  $10^{10}$ . Mais un effet de saturation peut être observé, à partir d'un contraste d'approximativement 1000 (ou  $1/1000$ ). Ainsi, les simulations donneraient le même résultat si le contraste était supérieur.

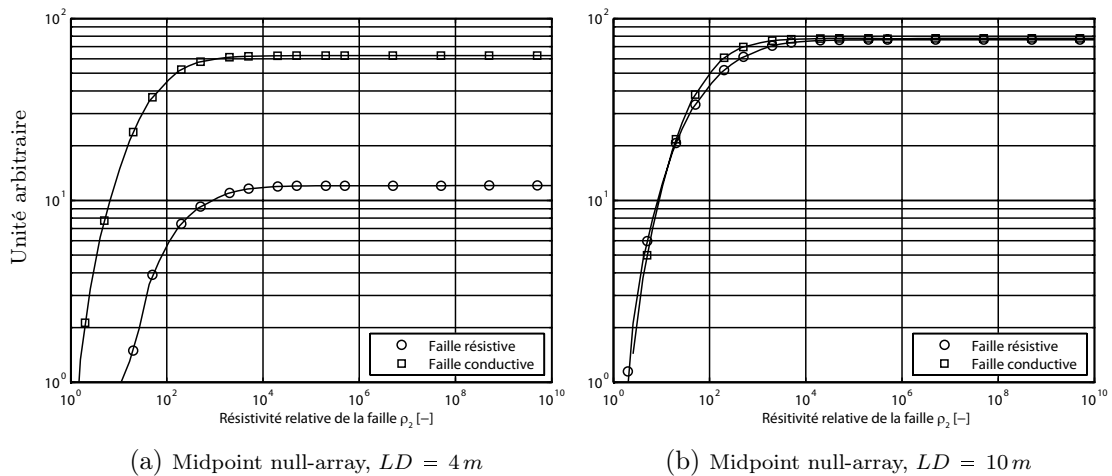


FIGURE 3.5 – Simulations numériques du midpoint null-array proche d'une faille en fonction du contraste de résistivité.  $\rho_1$  est la résistivité du milieu et  $\rho_2$  celle de la faille.

Dans la suite de ce travail, la valeur de 1000 comme contraste de résistivité a été adopté, pour assurer un contraste suffisant reflétant des structures nettes.

### 3.2.3 Correction du maillage

Les simulations numériques ne donnent pas de solution analytique. Ainsi, les résultats peuvent différer légèrement de la "vraie" solution, à cause de la taille des éléments du maillage, des limites du maillage ou de divergences numériques. Deux problèmes principaux se rencontrent en utilisant un maillage fini dans cette étude.

Le premier est l'effet des bords du maillage. S'il est petit pour des simulations traditionnelles, où les valeurs simulées sont grandes en comparaison de cet effet, il devient plus important lorsque l'étude se concentre sur les null-arrays, qui sont justement censés mesurer un signal proche de zéro. De plus, les null-arrays sont aussi censés être sensibles aux anomalies latérales. Dans ce cas, les limites du maillage pourraient être perçues comme des anomalies.

Le second est la taille des éléments du modèle. L'effet d'un puits à un noeud sera légèrement différent si les éléments entourant ce noeud sont de tailles et de formes différentes. La distribution de courant autour de ce noeud changera alors aussi et les mesures seront légèrement perturbées, surtout si elles sont effectuées proche du noeud en question.

Ces deux problèmes sont relativement négligeables lorsque des profils sont simulés. En effet, un maillage régulier peut être utilisé et minimise ainsi l'inégalité de taille des éléments, alors que les effets de bords peuvent être évités en ayant un maillage suffisamment grand.

Par contre, ces problèmes deviennent plus importants lorsque des mesures azimutales sont simulées. Dans ce cas, des noeuds doivent être déplacés pour permettre le positionnement exact des électrodes. La taille des éléments n'est alors plus régulière, en fonction de l'orientation utilisée et génère alors un signal. Les bords vont également jouer un rôle, puisque les mesures azimutales sont effectuées à différentes positions.

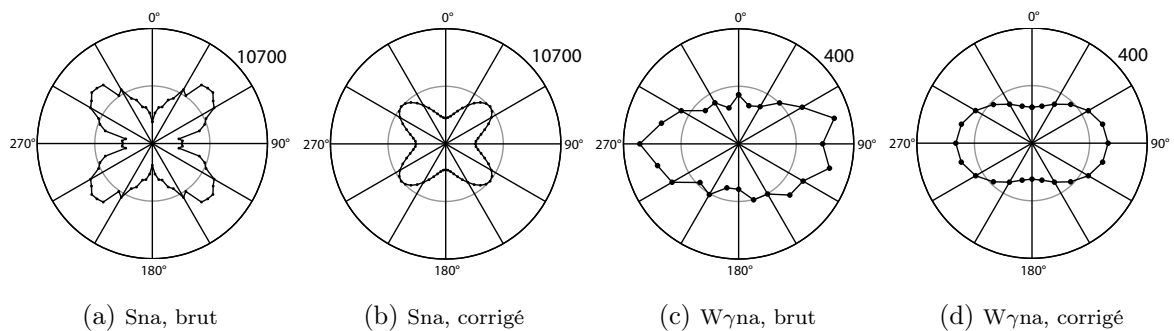


FIGURE 3.6 – Exemples de diagrammes azimutaux avec (Données corrigées) et sans (Données brutes) correction : a) et b) Schlumberger array classique (valeur au centre de  $10300 \Omega m$ ) entre deux failles verticales et c) et d) Wenner- $\gamma$  null-array (valeur au centre de  $0 \Omega m$ ) sur une faille verticale.

Ces deux perturbations vont donc se superposer au signal. Elles seront alors considérées comme du bruit, nommé "bruit de maillage". Ce bruit de maillage peut dès lors être estimé en utilisant le même maillage que celui utilisé mais en y appliquant des paramètres constants de résistivités. La simulation ne donnera alors pas une même valeur identique en tout point comme cela devrait être théoriquement le cas sur un modèle homogène, mais elle donnera la superposition du bruit de maillage et des valeurs théoriquement mesurées. Dans le cas des null-arrays, censés mesurer zéro sur une structure homogène, le résultat mesuré est directement le bruit de maillage. En soustrayant alors ce bruit aux simulations effectuées avec les paramètres initiaux, une valeur corrigée est obtenue sans effet du maillage, comme montré sur la Fig. 3.6.

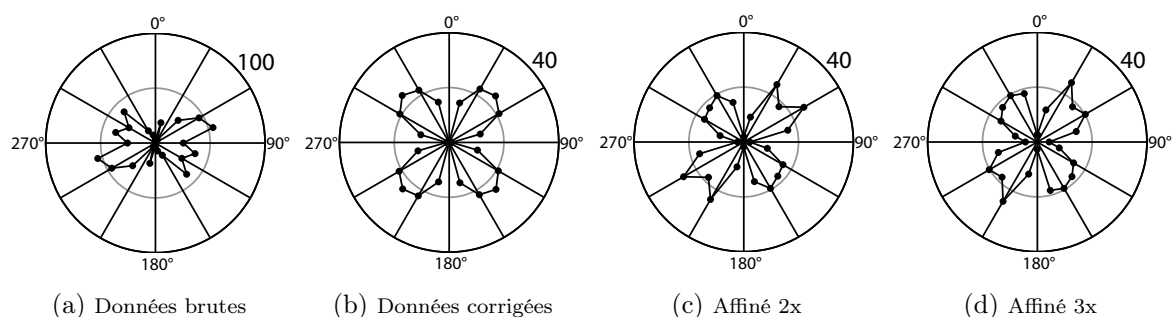


FIGURE 3.7 – Validation de la correction du maillage avec un Schlumberger null-array sur deux failles croisées : a) signal original simulé, b) signal corrigé, c) signal simulé sur un maillage affiné deux fois et d) signal simulé sur un maillage affiné trois fois.

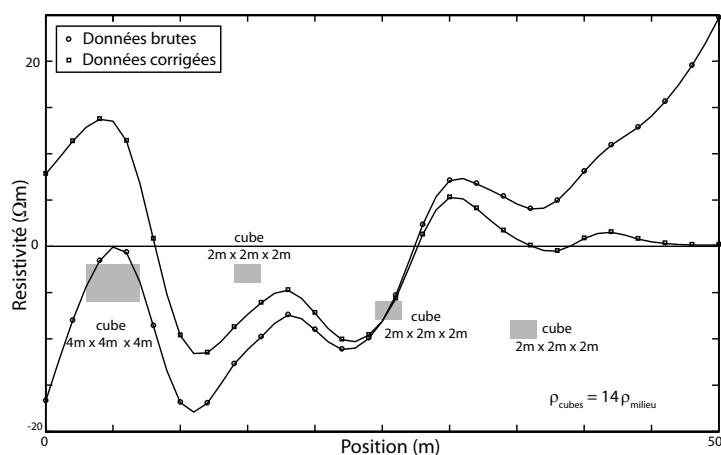


FIGURE 3.8 – Correction du maillage sur un profil avec le midpoint null-array sur la structure composée de cavités (voir section 4.2.4) : Profil brut (ligne traitillée) et profil corrigé (ligne pleine). Les rectangles gris montrent la position des cavités.

Cette correction n'est pas exacte, puisque la transmissivité des lignes de courant entre deux éléments de même résistivité n'est pas exactement la même que celle entre deux mêmes éléments de résistivités différentes. Mais le résultat est malgré tout plus proche de la réalité et permet de diminuer l'effet du bord du maillage ainsi que l'effet lié aux différences de tailles des éléments du maillage. Elle peut donc être effectuée pour n'importe quel dispositif, que ce soit pour des null-arrays ou pour des dispositifs classiques. De par la nature particulière des null-arrays, il est évident que l'effet relatif du bruit de maillage sera nettement plus important pour les null-arrays que pour les autres dispositifs. Cette correction peut être évitée en créant un maillage plus fin. Mais sans compter qu'il est laborieux de déplacer chaque noeud aux positions désirées et de raffiner le maillage autour de ces noeuds par la suite (dans le cas des mesures azimutales), cela engendre ainsi un maillage très grand en terme de noeuds et donc de temps de calcul, d'où l'intérêt de cette correction.

*Cependant, pour toutes les simulations effectuées et présentées par la suite, les corrections du bruit de maillage ont été effectuées.*

Pour les configurations classiques, le principal effet de la correction est de lisser les diagrammes azimutaux, alors que pour les null-arrays la forme du diagramme peut drastiquement changer. La Fig. 3.6 montre des simulations avec et sans correction, dans un cas classique et un cas null-array, sur des mesures azimutales.

Pour valider cette méthode, un affinement du maillage a été effectué sur le même modèle synthétique, le but étant de montrer que les résultats correspondent, ou du moins qu'ils convergent, comme illustré sur le Fig. 3.7. Dans ce cas, il n'était pas possible d'affiner davantage, étant limité par la puissance de calcul de l'ordinateur. Il est malgré tout possible d'observer que les signaux simulés avec des maillages plus fins convergent vers le signal simulé avec un maillage grossier et corrigé.

Le principal avantage de cette méthode est un gain de temps de calcul. Bien qu'il faille effectuer la simulation deux fois, les simulations sont bien plus rapides puisque les maillages sont composés de moins d'éléments. Par exemple, si un maillage est affiné une fois, son temps de calcul sera plus que doublé. L'utilisation de cette méthode permet donc un gain de temps lors du travail de simulation.

Pour les profils, l'effet du maillage étant moins important et surtout plus régulier et doux, la correction peut également être effectuée, même si elle n'est pas toujours nécessaire. Les structures étudiées se situent souvent au centre du modèle. Les simulations effectuées proches des bords du maillage sont censées tendre vers zéro pour les null-arrays, correspondant donc aux extrémités (début et fin) des profils. Les erreurs liées au bruit du maillage sont alors faciles à détecter et la correction pourrait alors n'être appliquée que lorsque cela est nécessaire, comme illustré dans la Fig. 3.8.

# MODÉLISATION NUMÉRIQUE SYNTHÉTIQUE

---

Le développement analytique des null-arrays étant rapidement complexe voire même impossible, les simulations numériques sont vite apparues comme étant la seule solution pour prédire le comportement de ceux-ci sur le terrain. Ces simulations servent alors comme bases pour cette étude et pour l'interprétation des données de terrains, présentées au chapitre 5.

Les logiciels commerciaux de simulations géoélectriques ne permettent généralement pas de simuler les null-arrays, étant souvent limités à quelques configurations traditionnelles, typiquement cinq dans le cas du Res2dmod/Res3dmod de Loke (1999). De plus, la géométrie bidimensionnelle des null-arrays, appliquée sur des structures elles aussi bidimensionnelles, oblige la création de modèles tridimensionnels. Les modèles numériques sont alors rapidement énormes, même dans des cas basiques et simples.

Une approche basée sur l'analogie entre les théories hydraulique et électrique (chapitre 3.1), utilise donc un logiciel de simulation numérique hydrodynamique - Feflow (WASY, Berlin) dans ce cas - pour simuler ces données géoélectriques. Afin d'éviter les effets de bord, un modèle suffisamment grand est utilisé, impliquant ainsi un nombre élevé de noeuds et nécessitant donc un temps de calcul long et un ordinateur suffisamment puissant pour les effectuer.

Dans ce chapitre, les modèles synthétiques étudiés sont tout d'abord présentés, suivi par les profils simulés avec les null-arrays sur ces structures, puis les mesures azimutales. Une première conclusion présentera alors les premiers éléments et résultats de cette étude numérique.

Cette étude numérique a donc été effectuée dans deux modes, mesures en profil et mesures azimutales :

- **Le mode en profil** , où le dispositif d'une dimension donnée est déplacé en surface d'un incrément constant. Les variations latérales de résistivité (géoélectrique classique) ou du signal (null-arrays) sont ainsi observées.
- **Le mode azimutal** , où le dispositif d'une dimension donnée est tourné autour de son centre de symétrie. Les variations de résistivité (géoélectrique classique) ou du signal (null-arrays) en fonction de l'orientation sont ainsi observées sur un diagramme polaire.

En tout, environ 200 simulations ont été effectuées pour mener à bien cette partie, utilisant les dispositifs différents, de tailles différentes, sur différentes structures et à différentes positions par rapport aux structures. Les dispositifs utilisés sont le *midpoint null-array*, noté **MAN**, le *Schlumberger null-array*, noté **Sna** et le *Wenner- $\gamma$  null-array*, noté **W $\gamma$ na**. De plus, certaines simulations ont été effectuées avec un *Schlumberger array classique*, noté **Sac**, et le mode *dipôle-dipôle*, noté **DD**<sup>1</sup>.

## 4.1 Modèles investigués

Les structures choisies représentent des situations idéales et ne seront bien sûr jamais rencontrées sur le terrain. Elles permettent ainsi d'observer le comportement théorique des null-arrays, sachant pertinemment qu'un tel cas ne se rencontrera jamais en situation pratique. Trois familles principales de structures sont utilisées ici : les structures composées de faille(s), les structures avec des cavités ou une grotte, et les structures de zones de contact. Les sept structures différentes étudiées synthétiquement sont présentées dans la Fig. 4.1. Dans ce chapitre, à l'exception de la "faille oblique", le terme de faille sous-entend toujours une faille verticale. Ainsi, le terme "vertical" n'est alors pas systématiquement ajouté.

La Fig. 4.1a est une structure composée d'un sol homogène traversé par une faille verticale. La faille a soit une résistivité 1000 fois supérieure dans le cas de la faille résistive, soit une résistivité 1000 fois inférieure dans le cas de la faille conductive. La résistivité du milieu est de résistivité de  $\rho = 10'000 \Omega m$ . Le choix de cette valeur est uniquement d'ordre informatique, puisque la valeur absolue ne change rien au comportement, seul le contraste de résistivité va influencer les résultats. La faille verticale a une épaisseur de  $0.2 m$  et n'atteint pas la surface. Une couche de sol de  $2.5 m$  d'épaisseur ayant la même résistivité que le reste du milieu recouvre la faille. Cette structure est appelée la "structure de faille" dans ce travail.

La Fig. 4.1b est une structure similaire à la structure de la Fig. 4.1a, à la différence que la faille n'est pas verticale. Elle a été étudiée avec différentes pentes et est appelée la "structure de faille oblique" dans ce travail.

1. Ce dernier n'a été utilisé qu'une seule fois en mode profil et a sinon été utilisé pour des ERT.

La Fig. 4.1c est composée de deux failles verticales ayant chacune exactement les mêmes caractéristiques que celle de la "structure de faille". Cette structure est scindée en deux cas : 1) celui où les deux failles verticales sont parallèles et distantes de  $20\text{ m}$ , appelé la "structure à deux failles" dans ce travail, 2) celui où les deux failles verticales ne sont pas parallèles, se croisant ainsi en un endroit donnée, formant un angle de  $60^\circ$ , appelé la "structure de failles en X" dans ce travail.

La Fig. 4.1d est composée de cavités vides de tailles différentes, se trouvant à différentes profondeurs dans un sol homogène. Ces cavités sont donc résistives et ont une forme cubique, pour simplifier le modèle synthétique. La première cavité est un cube de  $4\text{ m}$  d'arête, le sommet du cube se trouvant à  $2\text{ m}$  de profondeur. La deuxième cavité a son sommet à la même profondeur, mais son arête n'est que de  $2\text{ m}$ . Les deux dernières cavités ont aussi une arête de  $2\text{ m}$  mais ont leur sommet respectif à  $6\text{ m}$  et  $8\text{ m}$  de profondeur. Le contraste électrique est ici de 15, le sol ayant une résistivité  $\rho_1 = 200\ \Omega\text{m}$  et les cavités une résistivités  $3000\ \Omega\text{m}$ . Cette structure est appelée la "structure de cavités" dans ce travail.

La Fig. 4.1e est une structure composée d'un milieu homogène traversé par une grotte horizontale. Le sommet de la grotte est à  $2.5\text{ m}$  de profondeur et la section de la grotte est de  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ . La résistivité du milieu est de  $10'000\ \Omega\text{m}$  et celle de la grotte est  $10'000$  fois supérieure. Cette structure est appelée la "structure de grotte" dans ce travail.

La Fig. 4.1f est une structure composée de deux milieux homogènes en contact sur une limite verticale. Les résistivités de ces zones sont de  $50\ \Omega\text{m}$  et  $700\ \Omega\text{m}$ . La première pourrait ainsi correspondre à des marnes, alors que la seconde pourrait être des calcaires karstifiés, par exemple. Cette structure est appelée la "structure en deux zones" dans ce travail.

La Fig. 4.1g est une structure ressemblant à une structure de "horst", sans les failles. Cette structure est composée d'un milieu résistif ayant une résistivité de  $700\ \Omega\text{m}$  posée sur un milieu plus conducteur de résistivité de  $30\ \Omega\text{m}$ . Ce deuxième milieu a subi des décrochements, formant des marches, de  $3\text{ m}$  de hauteur et de  $15\text{ m}$  de largeur. Cette structure est appelée la "structure en horst" dans ce travail.

Ainsi, à l'exception de la "structure de cavités", toutes ces structures sont donc des problèmes bidimensionnels.

Cette étude sera donc menée pour les trois différents null-arrays, avec deux tailles de dispositif différentes dans chaque cas. Toutes ces structures ne seront pas étudiées de manière équivalente avec tous les dispositifs. La raison première est que certaines structures ont été ajoutées après coup, par rapport aux situations rencontrées sur le terrain. Une autre raison est la faisabilité de certaines situations particulières dans le modèle, les null-arrays étant exigeant sur le positionnement des électrodes.

Sur les sept modèles présentés, seulement trois d'entre eux (les structures de faille, à deux

zones et de grotte) seront étudiés de manière "approfondie" et équivalente, c'est-à-dire que les profils et les mesures azimutales à cinq positions différentes par rapport aux structures seront simulés. La structure de faille oblique ne sera étudiée qu'en profil avec les trois null-array, le comportement azimutale ne devant logiquement que peu changer par rapport à la faille verticale. La structure à deux failles ne sera étudiée qu'en profil avec les trois null-arrays et avec le Sna en azimutal au centre, le but de cette structure étant d'observer le recouvrement et le lien entre l'espacement des failles en fonction de la taille du dispositif. La structure de failles en X ne sera étudiée qu'en azimutal avec deux des trois null-arrays (le  $W\gamma na$  est dans cette situation très délicat à mettre en oeuvre), le but étant de déterminer l'orientation des deux failles (alors que le profil rejoint la situation des deux failles parallèles). La structure de cavités n'étant pas bidimensionnelle, elle ne sera étudiée qu'en profil, tout comme la structure en horst qui devrait se comporter de manière semblable à la structure à deux zones.

En tout, environ 200 simulations seront effectuées.

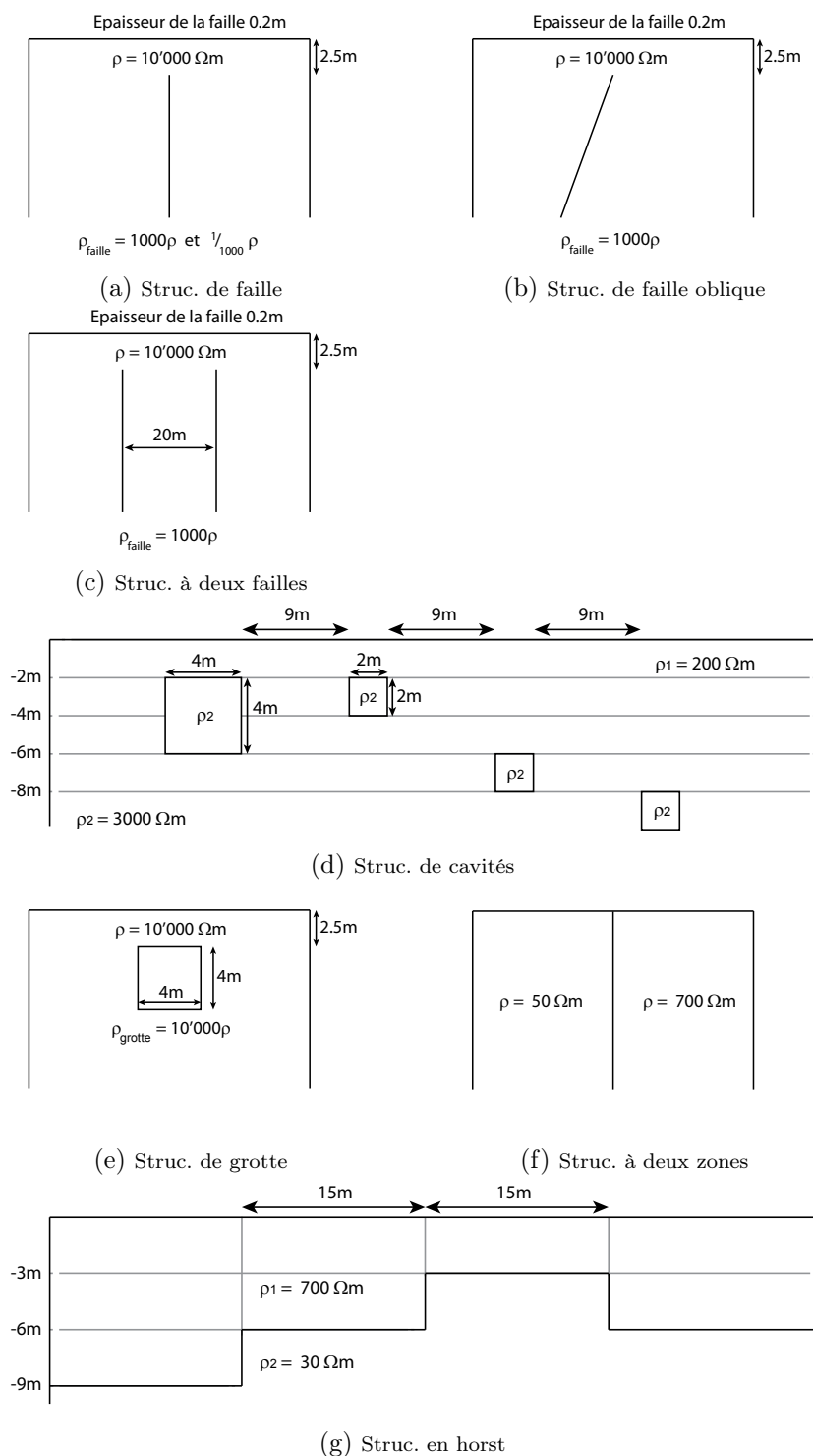


FIGURE 4.1 – Schémas des structures synthétiques utilisées pour les simulations numériques : **a)** structure de faille, **b)** structure de faille oblique, **c)** deux failles, avec des failles parallèles pour la "structure à deux failles" et des failles non parallèles pour la "structure de failles en X", **d)** structure de cavités, **e)** structure de grotte, **f)** structure à deux zones et **g)** structure en horst.

## 4.2 Profils avec les null-arrays

Le fait d'utiliser les null-arrays en profil permet de localiser les hétérogénéités, comme des failles ou des interfaces entre deux milieux. La réponse des mesures change en fonction du choix du dispositif, de sa taille et du contraste électrique de ladite structure. Ces simulations vont servir pour comprendre le comportement des null-arrays, mais aussi pour interpréter les mesures de terrain effectuées plus tard.

### Offset des mesures en profil

Pour mener à bien une mesure en profil, il faut choisir un dispositif et sa taille, et le déplacer pas à pas d'un incrément choisi. Ainsi, des fluctuations latérales pourront être mises en évidence.

Comme la plupart des structures étudiées sont bidimensionnelles, leur symétrie implique une mesure nulle pour tous les null-arrays ayant leur dispositif parallèle à ces structures. Dans le cas particulier du Sna, à cause du principe de réciprocité<sup>2</sup> (Lanczos, 1961; Van Nostrand et Cook, 1966), une valeur nulle sera aussi obtenue lorsque le dispositif est perpendiculaire à ces structures. Ainsi, un offset de  $45^\circ$  est appliqué à tous les dispositifs, c'est-à-dire que l'axe de la ligne  $AB$  fait un angle de  $45^\circ$  avec la direction du profil, comme montré sur le Fig. 4.2.

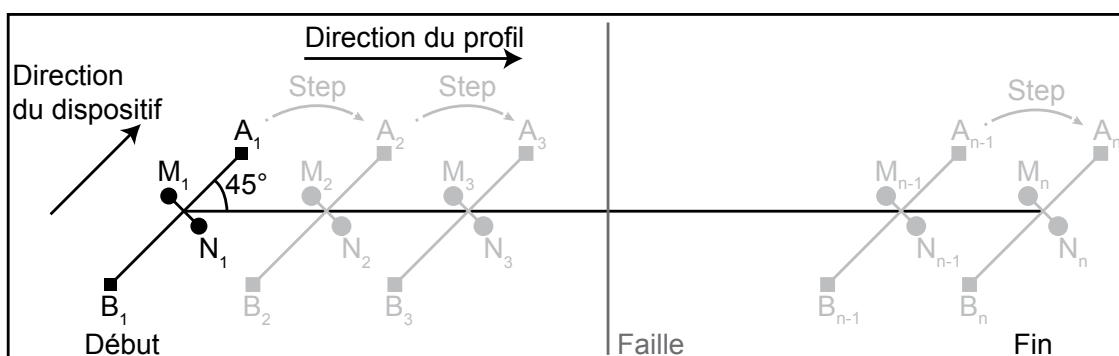


FIGURE 4.2 – Schéma du déroulement d'une mesure en profil, en appliquant un offset en fonction de l'orientation de la structure. Le profil est mené en déplaçant le dispositif de taille donnée d'un "step" donné.

### 4.2.1 Profil sur une faille

Ce paragraphe a été repris dans l'article "Fracture characterisation using geoelectric null-arrays", dans l'annexe D (Falco *et al.*, 2013).

2. Le principe de réciprocité dit que si les rôles des électrodes  $A$  et  $B$  sont intervertis avec ceux des électrodes  $M$  et  $N$ , la même mesure doit être obtenue.

Le signal simulé des null-arrays sur une faille résistive et sur une faille conductive (Fig. 4.1a), avec une longueur du dispositif de  $10\text{ m}$  sont présentés dans la Fig. 4.3. La faille est localisée à  $0\text{ m}$  sur le profil.

Pour le MAN (Figs. 4.3a et 4.3d), la localisation correspond exactement au point d'inflexion, où un zéro est mesuré sur le signal, alors que pour les deux autres null-arrays, la position est localisée exactement au maximum du pic. L'amplitude du  $W\gamma_{na}$  (Figs. 4.3b et 4.3e) et du  $Sna$  (Figs. 4.3c et 4.3f) sont environ les mêmes, alors que l'amplitude du MAN est légèrement plus élevée. Comme observé sur le figure, la forme des courbes ne change pas si la faille est résistive ou conductive, seules les amplitudes varient légèrement.

Les null-arrays paraissent donc sensibles au contraste électrique, indépendamment du fait que la faille soit plus ou moins résistive que le milieu. Il ne paraît du coup pas possible de différencier les deux cas.

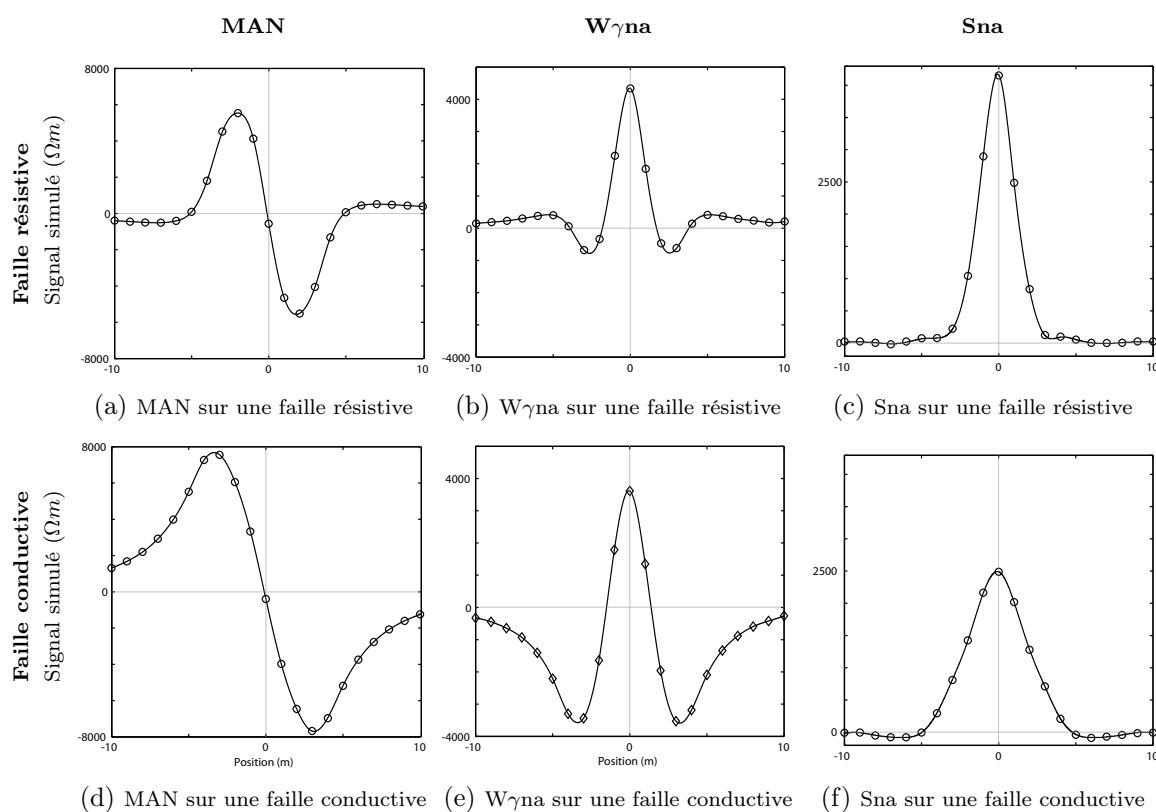


FIGURE 4.3 – Simulations numériques des null-arrays sur une faille résistive et une faille conductive : a) MAN sur une faille résistive, b)  $W\gamma_{na}$  sur une faille résistive, c)  $Sna$  sur une faille résistive, d) MAN sur une faille conductive, e)  $W\gamma_{na}$  sur une faille conductive, et f)  $Sna$  sur une faille conductive. La longueur du dispositif est de  $10\text{ m}$  pour tous les null-arrays. La faille est localisée à  $0\text{ m}$ .

### 4.2.2 Profil sur une structure de faille oblique

La structure de faille oblique a été simulée pour différentes valeurs de pente de la faille. Comme dans le cas de la faille verticale, cette faille n'atteint pas la surface et s'arrête à 2.5 m de profondeur. Si elle était prolongée, la faille atteindrait la surface à la position 70 m pour toutes les pentes simulées, comme montré sur la Fig. 4.4. Les simulations n'ont ici été menées que pour une faille résistive, au vu du peu de différence entre les deux cas.

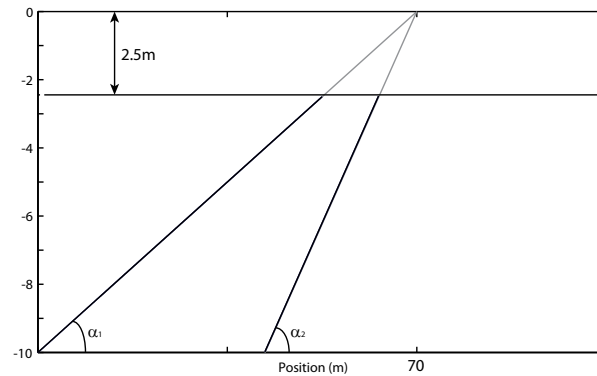


FIGURE 4.4 – Modèle schématique de la structure de faille oblique.

Les résultats simulés des null-arrays sur une faille oblique, avec une pente de 1.5, équivalent à un angle of  $56.3^\circ$  avec l'horizontale, est présenté dans la Fig. 4.5.

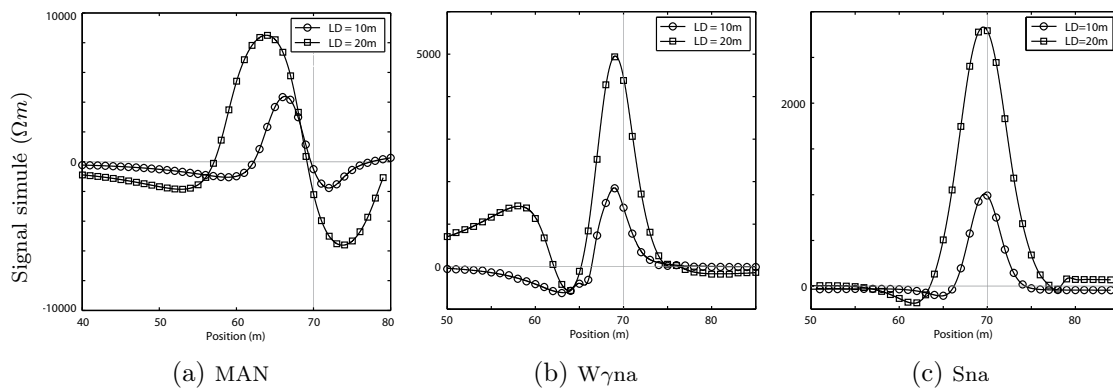


FIGURE 4.5 – Simulations numériques des null-arrays sur une faille oblique (pente de 1.5) : a) MAN, b)  $W\gamma na$  et c)  $Sna$ . La faille s'arrête à 2.5 m de profondeur, mais atteindrait la surface à la position de 70 m. LD est la longueur du dispositif.

Comme dans le cas de la faille verticale, le MAN (Fig. 4.5a) donne la position de la faille par le point d'inflexion, qui correspond aussi à une valeur nulle, même si la courbe n'est ici plus parfaitement asymétrique. Le  $W\gamma na$  (Fig. 4.5b) et le  $Sna$  (Fig. 4.5c) donnent toujours la position par leur pic. Ces positions se situent légèrement avant les 70 m, permettant ainsi de supposer que la position détectée est la partie supérieure de la faille.

Le  $S_{na}$  et le  $W_{\gamma na}$  donnent quasiment la même position pour les deux longueurs de dispositif, alors que pour le MAN, un léger déplacement s'observe. Les paragraphes suivants vont légèrement approfondir ce dernier point au sujet du MAN uniquement.

Il faut noter que dans le cas de la pente de 1.5, les positions détectées se trouvent quasiment à  $70m$ , ou légèrement avant. Il y a même un point - pour le plus petit dispositif - où le zéro se situe après la position de  $70m$ . Ce résultat est surprenant, puisque si la faille s'arrête à  $2.5m$  de profondeur, cela signifie qu'elle s'arrête à la position  $68.3m$ . Il semblerait alors que la position détectée est ici shiftée du côté où il n'y a plus de faille. Comme montré dans les paragraphes suivant, ce shift s'observe également pour les autres valeurs de pente. Il pourrait être dû au fait que le contraste est plus net lorsque le dispositif arrive d'un milieu homogène sur une faille, que lorsqu'il se déplace au dessus de la faille oblique jusqu'à son extrémité. Il n'est malgré tout pas possible de trouver ici une réelle explication et compréhension de ce shift.

Dans la Fig. 4.6, les profils ont été effectués pour six différentes longueurs de dispositifs sur cette même faille oblique. Dans chaque cas, un décalage peut être observé comme "position" présumée de la faille : plus le dispositif est long, plus le décalage est important. Exprimé différemment, plus l'écartement des électrodes est élevé, plus la faille est détectée "tôt" dans le profil. Une explication simple et intuitivement logique à ce comportement est que plus le dispositif est grand, plus il est sensible et détecte des structures profondes et donc plus tôt il sera sensible à la faille.

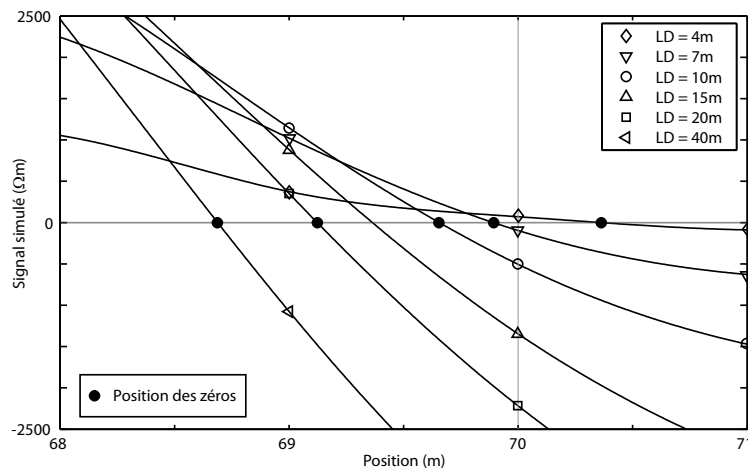


FIGURE 4.6 – Zoom de la Fig. 4.5a, montrant les positions des zéros du MAN sur une faille oblique pour différentes longueurs de dispositif  $LD$ .

En partant du principe que la longueur du dispositif est liée directement à la profondeur de la mesure, et en observant ce décalage en fonction de la profondeur (ou de la longueur du dispositif), la Fig. 4.7 met en avant le fait que les points sont relativement alignés, à l'exception du dernier point pour le plus grand dispositif (peut-être à cause de l'effet du fond du maillage). Les profondeurs d'investigation pour la géoélectrique classique est théoriquement connue et définie, notamment par les courbes caractéristiques de profondeur d'investigation normalisée ("Normalised Depth of Investivation Characteristic" curves, ou "NDIC" curves) (Szalai *et al.*, 2009a), la comparaison de la géoélectrique classique aux null-arrays pourraient faire croire que ces derniers ont eux aussi un maximum de sensibilité à une profondeur déterminée (ou plutôt "à déterminer"). Pour le pôle-dipôle classique, qui est l'équivalent du MAN, cette profondeur est connue et vaut  $0.235 a$  (Szalai *et al.*, 2009a). Malheureusement, appliquer cette valeur aux mesures du MAN ne permettent pas de retrouver la vraie valeur de la pente. Par contre, à l'exception du cas où la pente vaut 0.85, toutes les mesures étaient alignées sur une droite. Il est alors possible de déterminer une profondeur pour chacun des cas en prenant le rapport entre la pente déterminée et la vraie pente. Le problème étant que cette profondeur est fonction de la pente.

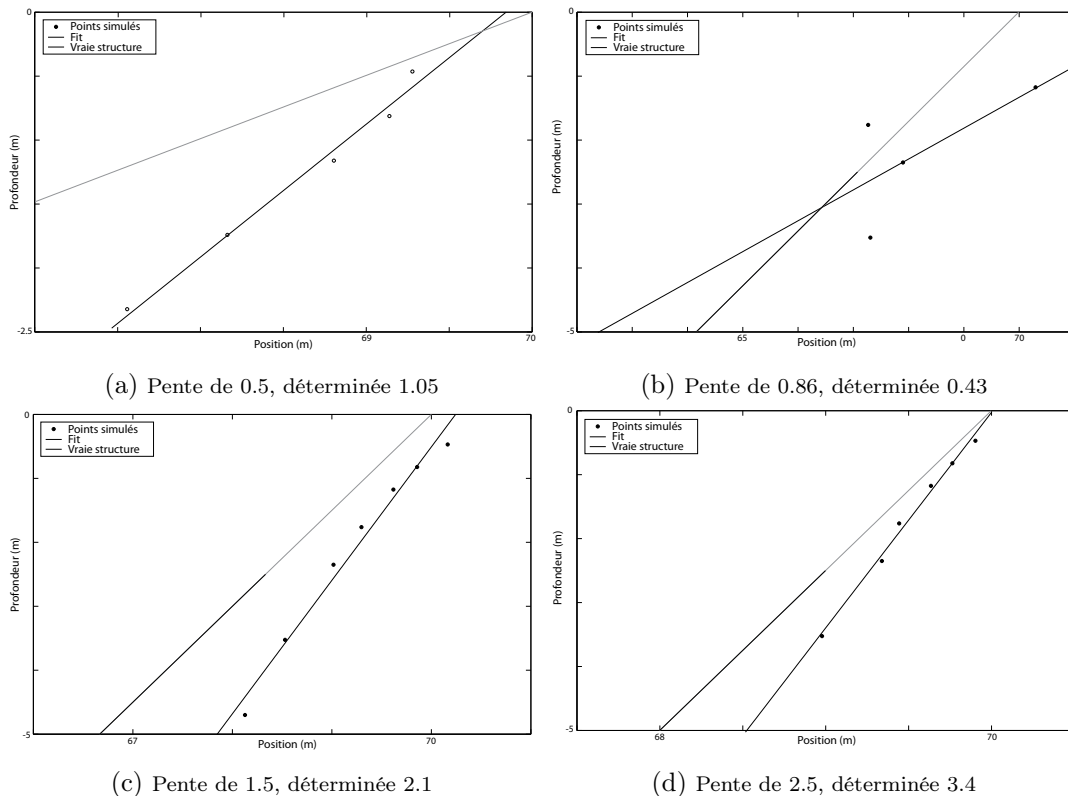


FIGURE 4.7 – Détermination de la pente d'une faille oblique, pour différentes valeurs de pente. Les valeurs déterminées sont : a) 1.05 dans le cas d'une pente de 0.5, b) 0.43 dans le cas d'une pente de 0.85 c) 2.1 dans le cas d'une pente de 1.5 et d) 3.4 dans le cas d'une pente de 2.5.

Si les null-arrays se comportent comme leur équivalent classique, cette méthode pour déterminer la pente d'une faille oblique devrait donc être tout-à-fait explicable. Le point d'inflexion et zéro donné par le MAN ne donnerait ainsi pas la position la plus haute de la faille, mais la position de la position où ce maximum de sensibilité croise la faille. Ainsi, si elle descend vers la gauche, le MAN la sentira plus à gauche plus sa longueur est grande.

La table 4.1 montre les résultats pour les différentes pentes, ainsi que les profondeurs d'investigation déterminées pour chacun des cas

TABLE 4.1 – Détermination de la pente d'une faille oblique avec le MAN.

	Vraie pente	Pente calculée	Prof. d'investigation
a)	0.5	1.05	0.476 <i>LD</i>
b)	0.86	–	–
c)	1.5	2.09	0.718 <i>LD</i>
d)	2.5	3.37	0.742 <i>LD</i>

Les résultats peuvent énormément varier, mais ils sont dans trois des quatre cas très bien alignés. Le fait que ce problème soit plus complexe que dans le cas classique n'est pas surprenant : l'effet de la pente sera d'autant plus importante qu'elle sera proche de la verticale. A l'inverse, d'après les simulations sur la faille verticale, le signal des null-arrays décroît rapidement lorsqu'ils sont décalés par rapport à la structure. Ainsi, on peut s'attendre à ce que la profondeur d'investigation du MAN (et des null-arrays en général) varient en fonction de la perturbation. L'explication de ce phénomène est difficile. Pour une taille de dispositif donné, qui aurait un maximum de sensibilité à une profondeur donnée, le volume engendré par la faille à cette profondeur va varier en fonction de la pente de la faille. L'effet d'un volume plus grand étant logiquement plus important, il est censé de supposer que la profondeur va varier en fonction de la pente de la faille. Ainsi, plus la faille est proche de la verticale, plus la profondeur d'investigation calculée est grande.

Il faut noter que la valeur calculée est toujours plus grande que la vraie valeur. Si d'autres simulations avaient été effectuées, il aurait alors été possible de déterminer, ou du moins d'observer, l'évolution de la profondeur d'investigation, qui serait déterminée par le rapport entre la pente calculée et la vraie pente.

### 4.2.3 Profil sur une structure à deux failles

Cette structure est composée de deux failles résistives. Dans ce cas, seulement le Sna a été simulé. Les deux failles sont localisées à 65 *m* et 85 *m*. La Fig. 4.8 montre les simulations pour différentes longueurs de dispositifs *LD*.

Pour des longueurs de dispositifs plus petits que la distance entre les failles (Fig. 4.8a), les deux failles sont clairement distinguables et localisées par des pics clairs. Pour les dispositifs

ayant des longueurs égales ou plus grandes que la distance entre les failles (Fig. 4.8b), les pics sont moins évidents à identifier. Lorsque la taille du dispositif est le double de la distance, on observe même un décalage de la position des pics par rapport à la vraie position des failles. Malgré tout, dans tous les cas, il est possible de localiser la position des failles de manière plus ou moins précise.

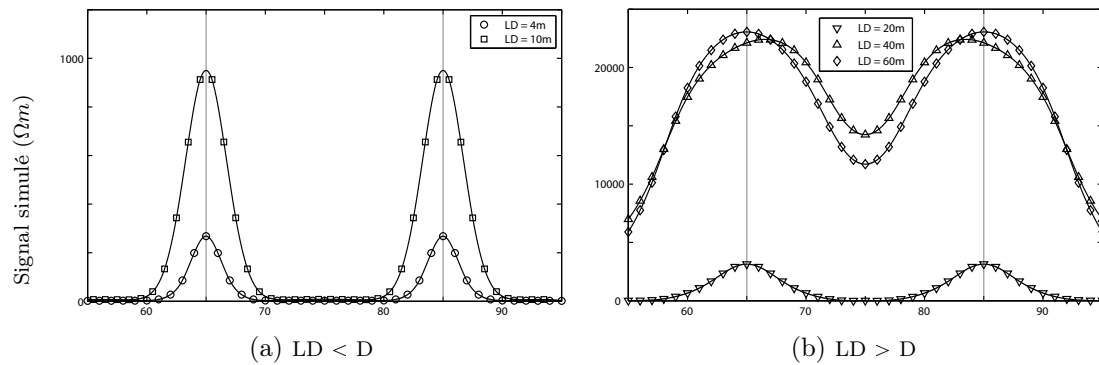


FIGURE 4.8 – Simulation numériques du Sna sur une structure à deux failles : a) dispositifs plus petits que la distance entre les failles et b) dispositifs plus grands que la distance entre les failles. Les failles se trouvent à 65 m et 85 m. LD est la longueur du dispositif et D la distance entre les failles.

#### 4.2.4 Profil sur une structure de cavités

La Fig. 4.9 montre la structure de cavités cubiques, de tailles et profondeurs différentes, utilisées pour les simulations des null-arrays. Cette structure est la seule structure qui n'est pas bidimensionnelle parmi toutes celles simulées dans ce travail. Les cavités cubiques ont une arête de 4 m pour la première à gauche et de 2 m pour les suivantes.

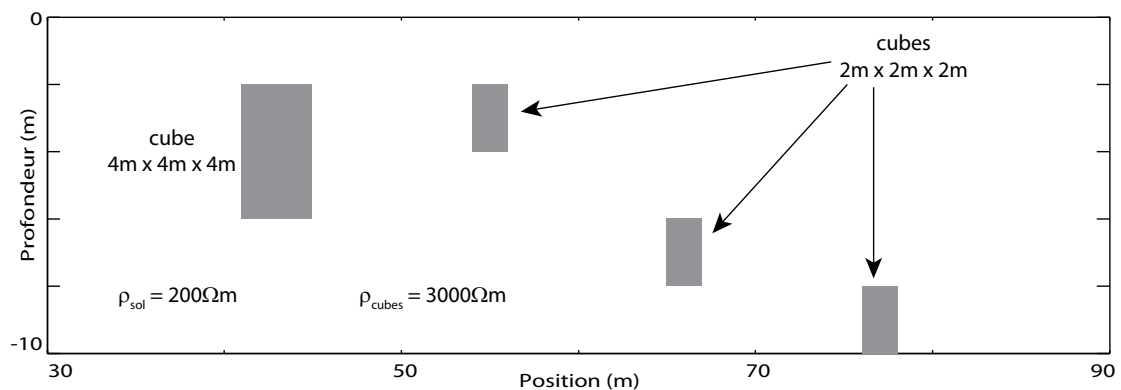


FIGURE 4.9 – Schéma de la structure de cavités, avec leur taille, position, profondeur et résistivité.

Les résultats simulés pour un profil de null-arrays sur cette structure sont montrés dans la Fig. 4.10. Les positions des cavités sont indiquées par les lignes grises hachurées.

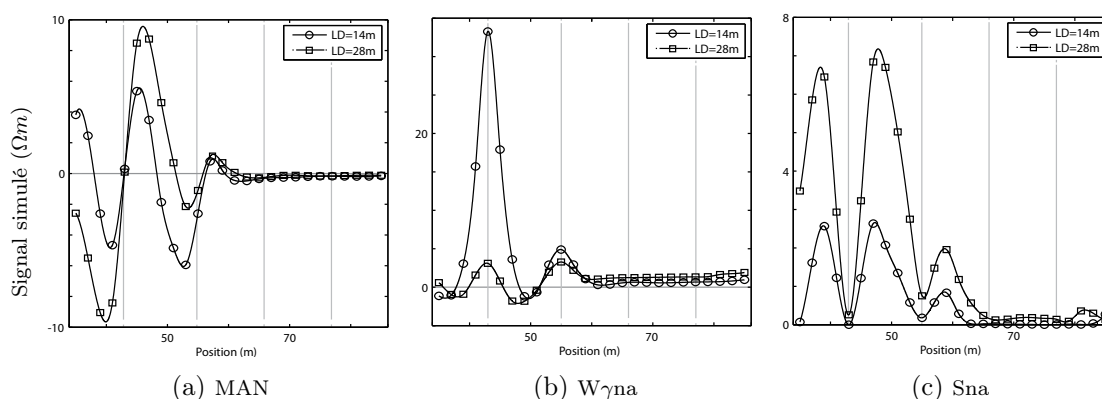


FIGURE 4.10 – Simulations numériques des null-array sur une structure de cavités : a) MAN, b)  $W\gamma na$  et c) Sna. Les cavités sont positionnées entre 41 m et 45 m, entre 54 m et 56 m, entre 65 m et 67 m, et entre 76 m et 78 m (lignes grises hachurées). LD est la longueur du dispositif.

La structure de cavités est géométriquement proche de celle de grotte : dans le modèle, la grotte est supposée infinie dans sa direction et les cavités ne le sont pas. Ainsi, un résultat similaire en forme et plus faible en amplitude pourrait être attendu ici.

Pour les deux longueurs de dispositif, le MAN est capable de détecter les deux premières cavités, qui sont les plus proches de la surface, mais aucun signal n'est obtenu pour les deux dernières cavités, plus profondes. Le signal est aussi plus important pour la première cavité, qui est la plus grande. Le signal permet de localiser la position du centre de la cavité, par le point d'inflexion et le "zéro" du signal.

Le  $W\gamma na$  (Fig. 4.10b) est également capable de détecter les deux premières cavités, qui ont leurs centres exactement sur les pics du signal. Ici aussi, aucun signal n'est obtenu pour les deux dernières cavités, et ici aussi le signal de la première cavité, plus grande, est plus important.

Le Sna (Fig. 4.10c) est dans ce cas aussi apte à détecter les deux premières cavités. Comme le dispositif est symétrique, le signal mesuré exactement au dessus du centre des cavités est ici zéro. Ainsi, la localisation du centre des cavités se fait par le minimum localisé entre deux pics théoriquement symétriques. Ici aussi, aucun signal n'est obtenu pour les deux dernières cavités, et le signal de la deuxième cavité est plus faible que celui de la première.

Les structures les plus profondes ne sont pas détectables, quelle que soit la longueur des dispositifs utilisés (il en sera de même pour la structure en horst). Les perturbations provoquées par ces anomalies profondes sont donc trop faibles pour être détectables ; cela donne une idée de la profondeur d'investigation des null-arrays.

En terme d'amplitude, ces cavités sont nettement moins faciles à être senties par les null-arrays. Alors que dans le cas de la grotte les amplitudes atteignent un ordre de grandeur de  $2000 \Omega m$ ,

dans le cas des cavités ils n'atteignent plus qu'un ordre de grandeur entre 10 et 30  $\Omega m$ . Il est donc plus que probable que dans un cas de terrain, de telles structures ne soient pas détectables et que ces signaux soient mêlés au bruit de fond, aux signaux générés par d'autres anomalies et aux erreurs de mesure.

Ces signaux sont donc très semblables aux autres signaux simulés ; il paraît donc difficile de vouloir identifier ces structures depuis des profils de null-arrays. Si de telles structures étaient attendues, leur localisation et leur dénombrement devient alors possible.

#### 4.2.5 Profil sur une structure de grotte

Les résultats simulés avec les null-arrays sur une structure de grotte sont présentés dans la Fig. 4.11. La grotte a une section de 4 m x 4 m et est positionnée entre 58 m et 62 m (donc centrée sur 60 m). Le sommet de la grotte se trouve à une profondeur de 2.5 m. Les longueurs de dispositifs utilisés sont ici de 14 m et 28 m.

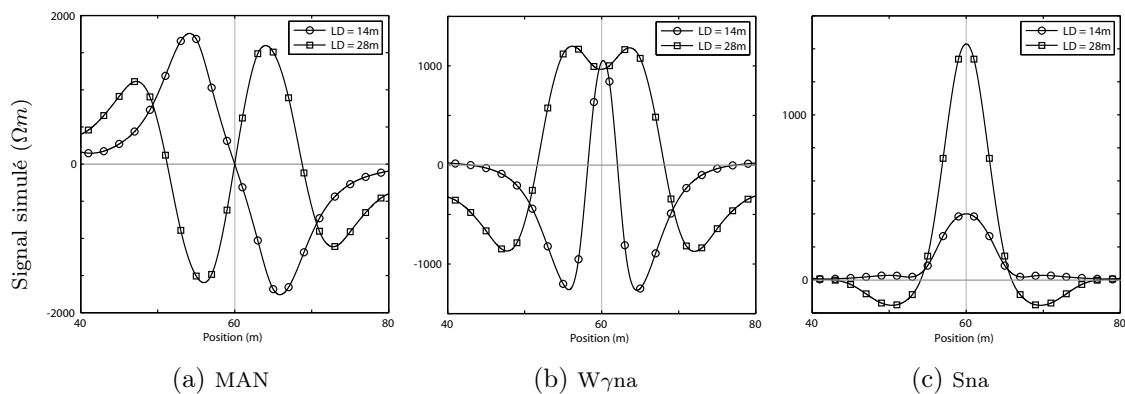


FIGURE 4.11 – Simulations numériques des null-arrays sur une structure de grotte, en utilisant deux longueurs différentes des dispositifs : a) MAN, b)  $W\gamma na$  et c) Sna. La grotte est délimitée par la ligne grise verticale hachurée (entre 58 m et 62 m). Le terme "LD" est la longueur du dispositif.

Une grotte est géométriquement quasiment similaire à une faille, à la différence qu'elle est légèrement plus large et que son expansion verticale n'est pas infinie. Ainsi, les résultats devraient être relativement similaires à ceux obtenus lors de la structure de faille.

Le signal simulé avec le MAN (Fig. 4.11a) est semblable à celui obtenu avec la structure de cavité et a plus ou moins la même forme que celui obtenu avec la faille. Mais en fonction de la longueur du dispositif, une inversion du signe est observée. Cette inversion est certainement provoquée par la taille relative du dispositif par rapport à celle de la grotte : si le dispositif est petit il sentira un milieu résistant (la grotte) perturbé par un milieu conducteur, alors que s'il est grand il sentira un milieu conducteur perturbé par un milieu résistant (la grotte). Dans les deux cas, le centre de la grotte correspond au point d'inflexion de la courbe, qui est également une valeur nulle de la mesure. Le signal du  $W\gamma na$  (Fig. 4.11b) a une forme qui varie aussi

en fonction de la longueur du dispositif, puisqu'un pic apparaît pour le petit dispositif, qui est alors similaire au résultat obtenu sur la faille, mais deux pics apparaissent pour le long dispositif. Dans le premier cas, le centre de la grotte correspond à la position du pic, alors que dans le second cas le centre de la grotte correspond au "centre" de ce double pic. Cette différence de comportement est aussi certainement liée à la taille du dispositif par rapport à celle de la grotte : pour le petit dispositif les deux électrodes centrales peuvent se trouver en même temps au dessus de la grotte, ce qui n'est pas le cas pour le grand dispositif. Le Sna (Fig. 4.11c) donne un pic clair, similaire à celui obtenu dans le cas de la faille, qui correspond à la position du centre de la grotte.

Pour tous les null-arrays, la petite configuration a donné plus ou moins le même résultat que dans le cas de la faille, alors que pour les dispositifs plus longs les résultats diffèrent plus. Cela peut se comprendre par le fait que les dispositifs de tailles différentes seront sensibles à des profondeurs différentes, et donc à des structures différentes. Ainsi, dans ce cas, en supposant que la grotte doit donner des résultats similaires à ceux obtenus avec la faille, les petits dispositifs paraissent plus sensibles à la grotte que les longs.

Pour tous les dispositifs et toutes les longueurs, la détermination de la localisation du centre de la grotte est néanmoins possible. Une estimation de son expansion latérale ne paraît par contre pas possible, même si une étude plus poussée sur ce cas pourrait peut-être mener à des résultats positifs. En effet, il paraît raisonnable de penser que le moment où les signaux simulés avec les  $W\gamma na$  et MAN changent de comportement est lié à la taille de la grotte. Il pourrait aussi être possible de déterminer cette expansion avec des dispositifs plus courts, qui verraient alors "l'entrée" et "la sortie" de la grotte comme deux événements indépendants.

#### 4.2.6 Profil sur une structure à deux zones

Les résultats des simulations des profils effectués avec les null-arrays sur une structure à deux zones sont présentés dans la Fig. 4.12. La zone de transition est située à  $0 m$  et la longueur du dispositif est de  $10 m$ .

La détermination de la position de la zone de transition est ici moins claire que dans le cas de la structure de faille. Le MAN (Fig. 4.12a) a un minimum juste avant le position et pic maximum dans la partie résistive qui est "shiftée" d'une distance " $a$ " (donc d'une demi longueur du dispositif). Le  $W\gamma na$  (Fig. 4.12b) a un pic légèrement shifté du côté résistif, qui est suivi d'un pic négatif. Le Sna (Fig. 4.12c) a un maximum, également shifté du côté résistif.

Dans ce cas, il est plus compliqué d'interpréter les données dans un cas idéal. Il sera alors encore plus difficile de le faire dans un cas pratique, où des erreurs et d'autres anomalies s'ajoutent aux signaux mesurés. Si ce type de structure est recherché ou attendu dans une situation de terrain, il est malgré tout possible d'estimer la position de la zone de transition, en combinant le MAN avec au moins un des deux autres null-arrays.

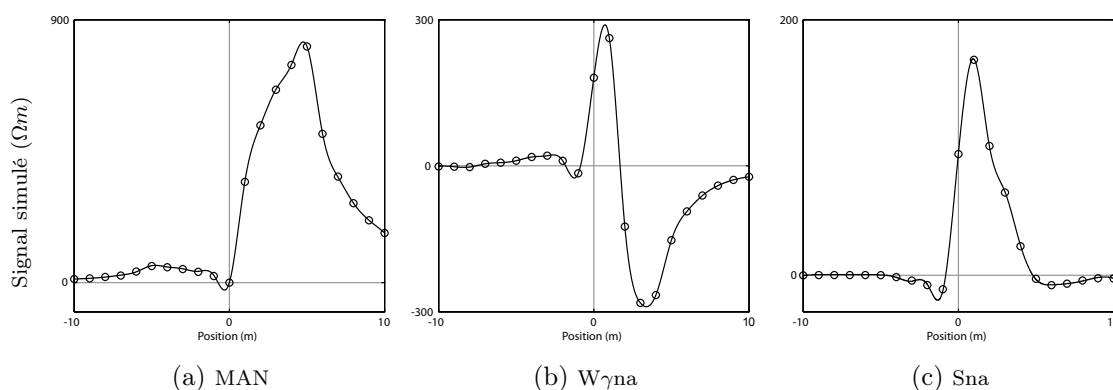


FIGURE 4.12 – Simulations numériques des null-arrays sur une structure à deux zones, avec la zone de transition localisée à  $0\text{ m}$  : a) MAN, b)  $W\gamma na$  et c) Sna. La longueur du dispositif est de  $10\text{ m}$ .

#### 4.2.7 Profil sur une structure en horst

La Fig. 4.13 montre la structure en horst (Fig. 4.13a) ainsi que des simulations effectuées avec un Sac sur cette structure (Fig. 4.13b). Cette structure n'étant pas rigoureusement verticale, des mesures géoélectriques classiques pourraient suffire pour la caractériser. Mais comme observé sur la figure, le Sac ne permet pas de déterminer la position des "marches"<sup>3</sup> de la structure, bien qu'une variation latérale soit observée. Les null-arrays apportent donc un aspect complémentaire aux mesures classiques.

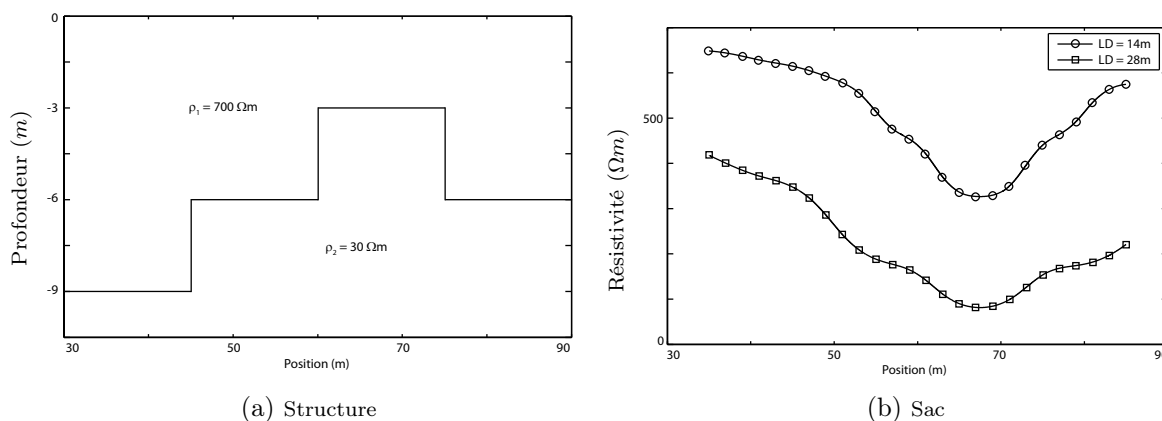


FIGURE 4.13 – a) Structure en horst avec la position des marches ( $45\text{ m}$ ,  $60\text{ m}$  et  $75\text{ m}$ ) et leurs profondeurs ( $6\text{ m}$ ,  $3\text{ m}$  et  $6\text{ m}$  respectivement) et b) Simulation numérique d'un profil avec le Schlumberger array classique sur cette structure. LD est la longueur du dispositif.

3. Ces "marches" sont en fait des failles bordières de la structure en horst.

Le MAN (Fig. 4.14a) ne semble pas capable de détecter et localiser la position des marches, quels que soient les longueurs des dispositifs. Bien que des signaux soient observés, une quelconque identification paraît très compliquée et discutable, voir même impossible.

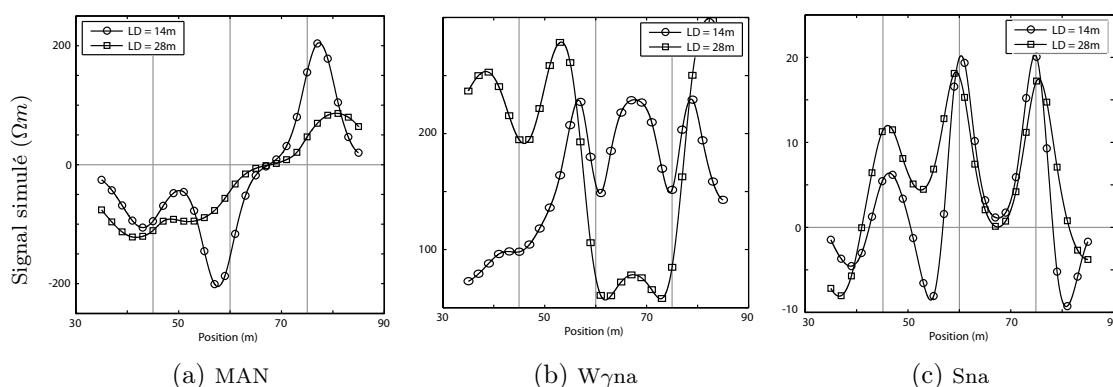


FIGURE 4.14 – Simulation numérique des null-arrays sur une structure en horst : a) MAN, b)  $W\gamma na$  et c) Sna. LD est la longueur du dispositif et les lignes grises verticales dénotent la position des marches.

Le  $W\gamma na$  (Fig. 4.14b) paraît plus approprié pour localiser la position de ces marches, puisque les minima correspondent aux positions des marches, avec un léger décalage. Le dispositif le plus court donne des résultats plus précis, évitant un mélange des structures et des signaux. Par contre sa sensibilité semble décroître rapidement avec la profondeur, puisque la marche localisée à 6 m de profondeur ne produit quasiment plus aucun signal.

Le Sna (Fig. 4.14c) donne clairement les meilleurs résultats dans ce cas, puisque les deux longueurs de dispositif sont capables de détecter la position des marches, avec une meilleure précision que pour le  $W\gamma NA$ . Il est intéressant de noter qu'avec le Sna sur la marche profonde le décalage le plus grand se produit avec le petit dispositif, alors que sur la marche supérieure le décalage le plus grand se produit avec le grand dispositif. Bien que ces décalages soient parfois faibles et difficilement quantifiables à cause de la résolution de une mesure par mètre, cette situation illustre les multiples perturbations et l'importance d'un choix adapté de la taille du dispositif pour éviter des interprétations erronées.

Deux des trois null-arrays sont ici capables de localiser la position des marches sur une structure en horst. Le choix de la longueur du dispositif en fonction de la dimension de la structure paraît ici très importante et pourrait donc mener à une interprétation erronée. Néanmoins, les null-arrays dévoilent un aspect complémentaire aux dispositifs classiques, qui sont a priori incapables de détecter ces positions (d'après la simulation du Sac).

## 4.3 Mesures azimutales avec les null-arrays

Utiliser les null-arrays en mode azimutal permet de déterminer l'orientation des structures bidimensionnelles, comme des failles ou des interfaces entre deux zones. La réponse des mesures change en fonction de la taille du dispositif, du contraste électrique ou de la position de la mesure par rapport à la structure. Ces simulations aident à interpréter les données de terrain et à comprendre le comportement des null-arrays.

Comme toute roche fracturée, ou karstifiée, est par définition anisotrope, la théorie de la résistivité doit en tenir compte. En tournant un dispositif géoélectrique classique autour de son centre de symétrie au-dessus d'un réseau de failles et en représentant les résistivités apparentes mesurées sur un diagramme polaire, une forme d'ellipse apparaît. Il en va de même pour les null-arrays, bien que le diagramme polaire obtenu ne soit pas forcément en forme d'ellipse.

### 4.3.1 Paradoxe anisotrope

Une mesure azimutale est une mesure effectuée en faisant tourner le dispositif utilisé autour de son centre. Les différents signaux mesurés sont alors représentés sur un diagramme polaire, où la valeur du rayon représente l'intensité du signal (donc la résistivité apparente mesurée). Le paradoxe anisotrope est le fait que lorsqu'une mesure azimutale est effectuée sur un terrain fracturé, ou multi fracturé comme c'est souvent le cas dans les situations de terrain, l'orientation de l'ellipse obtenue ne peut pas être prédite. Autrement dit, en fonction de la taille du dispositif utilisé et de sa position par rapport à la structure étudiée, l'ellipse obtenue aura son grand axe soit parallèle soit perpendiculaire à la structure. C'est cette "inconnue" qui sera ici nommée "paradoxe anisotrope".

Ce paradoxe anisotrope a été abordé par Taylor et Fleming (1988). D'après ces auteurs et pour un dispositif géoélectrique classique, le grand axe de l'ellipse mesurée sur un réseau régulier de failles est parallèle aux failles. Mais la vraie résistivité du milieu environnant est donnée par la mesure de la résistivité perpendiculaire aux failles  $\rho_{\perp}$ . Ainsi, le petit axe de l'ellipse, et non pas celle parallèle aux failles  $\rho_{//}$ , donne la résistivité "vraie" du milieu. Ceci est valable que la mesure se fasse entre les fractures ou sur une fracture. Ce phénomène a été nommé "paradoxe anisotrope" (Keller et Frischknecht, 1966). Il faut donc rappeler que cette définition est valable pour un sol multi-fracturé, donc composé d'un nombre infini de fractures parallèles toutes espacées d'une même distance. La distance entre les fractures doit être petite par rapport à la taille du dispositif utilisé, ce qui veut dire que le courant électrique doit obligatoirement traverser plusieurs fractures. Le rapport entre le grand et petit axe de l'ellipse donne le coefficient d'anisotropie  $\lambda$ , défini dans l'équation 4.1.

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_{//}}{\rho_{\perp}}} \quad (4.1)$$

Les termes de résistivité de cette équation ne sont pas des résistivités vraies, mais des termes de résistivités apparentes.

D'un point de vue théorique, ce phénomène découle de l'utilisation du courant électrique au lieu de la densité de courant dans le calcul de la résistivité apparente. Le fait que ce paradoxe ait lieu est lié au nombre de fractures traversées par le dispositif et à sa position par rapport à ces fractures. (Szalai *et al.*, 2010a)

Bien que ce phénomène ne soit ni précisément connu ni expliqué, un des paramètres expliquant le fait que ce paradoxe se produise ou non est donc la position du dispositif par rapport aux structures, plus précisément les positions des électrodes de courant.

Ce paradoxe ne joue pas toujours un rôle important en géoélectrique classique, puisque les valeurs mesurées ne varient pas forcément énormément. Il devient par contre très important pour les null-arrays, puisque le diagramme azimutal mesuré va être interprété en terme d'orientation.

Dorénavant, dans ce travail, le terme de "paradoxe anisotropique" décrit le fait que la direction de l'axe majeur de l'ellipse peut changer en fonction de la distance entre le dispositif et la structure étudiée.

Certains null-arrays ne produisent pas un diagramme en forme d'ellipse lorsqu'une mesure azimutale est effectuée, mais un diagramme composé de plusieurs lobes, typiquement quatre, comme c'est le cas du Sna. La direction du grand axe de l'ellipse doit alors être imaginée à partir de l'ellipse circonscrite au diagramme, comme illustré sur la Fig. 4.15.

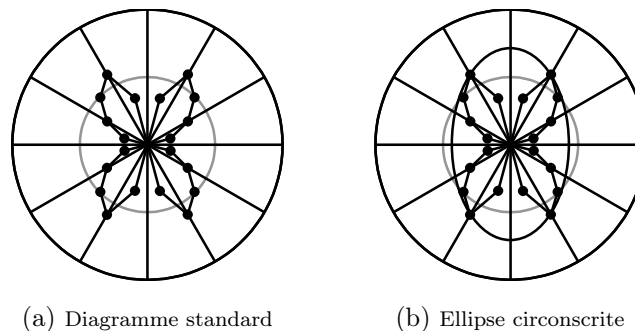


FIGURE 4.15 – a) Sna sur la structure à deux zones et b) ellipse circonscrite au diagramme en fleur.

### Le cas particulier du MAN

En situation de terrain, les électrodes ne peuvent pas être plantées de manière rigoureusement précise. Si ces erreurs de positionnement ne sont pas trop importantes dans la plupart des cas, elles jouent un rôle très important dans le cas du MAN. En effet, dans ce cas, un paradoxe anisotropique se produit. Ce dernier n'est ici pas lié à la position du dispositif par rapport à la structure, mais à l'erreur de distance entre les électrodes. (Szalai *et al.*, 2010a) Ce MAN utilisé sur le terrain, ayant donc un espacement  $M - A$  légèrement différent de  $A - N$ , est appelé le MAN-modifié, noté **mMAN**. Cette différence de comportement est due au fait qu'une électrode  $B$  doit être placée "à l'infini", typiquement quelques centaines de mètres par rapport au dispositif. Comme mentionné précédemment, le fait que le paradoxe anisotropique se produise ou non dépend notamment des structures se trouvant entre les deux électrodes de courant  $A$  et  $B$ . Ainsi, à cette distance et en situation de terrain, un sol a dans presque tous les cas une anisotropie directionnelle claire. Cette dernière peut être due à un nombre "infini" de fractures entre  $A$  et  $B$  (donc un sol multi-fracturé) ou à anisotropie liée à la structure du sol.

Afin de s'approcher de cette situation, une simulation a alors été effectuée en prenant une structure avec une anisotropie directionnelle claire : la structure a une valeur de résistivité dans la direction de l'axe  $y$  (qui correspond à un  $N0^\circ$  sur le diagramme polaire) étant 20% supérieure à la valeur de résistivité dans la direction de l'axe  $x$  (qui correspond à un  $N90^\circ$  sur le diagramme polaire). Une électrode  $B$  a été utilisée, à plus de 100 m de la position de mesure.

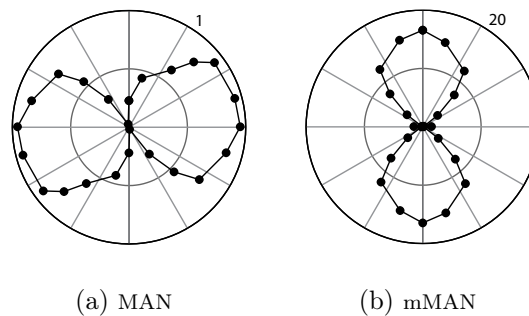


FIGURE 4.16 – Simulations numériques du paradoxe anisotropique pour le mMAN sur une structure anisotropique. La structure est 20% plus résistive dans la direction  $N0^\circ$  (ligne grise) que perpendiculairement. Les signaux sont simulés en  $\Omega m$ . La valeur donnée à côté du diagramme est la valeur sur le cercle extérieur, l'échelle étant linéaire.

Il est alors possible d'observer que le MAN "théorique" et le mMAN (donc le MAN qui est utilisé sur le terrain) ont leurs grands axes tournés de  $90^\circ$  l'un de l'autre.

La légère distorsion observée sur la Fig. 4.16a est liée à la distance de l'électrode  $B$ , trop proche dans le modèle numérique.

Ces simulations montrent alors qu'en situation de terrain, à cause de l'erreur, inévitable, de positionnement des électrodes, le paradoxe anisotropique se produit toujours pour le MAN, qui se comporte alors comme le mMAN avec son ellipse pivotée de  $90^\circ$ .

Bien que ces simulations justifient ce résultat, qui a été observé et vérifié sur les mesures de terrain, comme par exemple aux Breuleux (voir la section 5.2), aucune explication théorique satisfaisante n'a été trouvée à ce jour à ce phénomène.

Dans les sections 4.3.2 - 4.3.6, les simulations ont été effectuées pour le MAN, sans électrode  $B$ . Toutes ces simulations ont donné comme résultat que la structure était parallèle au petit axe de l'ellipse. C'est pourquoi, pour les mesures de terrain, où le MAN utilisé est en fait un mMAN, la structure sera interprétée selon le grand axe de l'ellipse puisque les simulations avec le MAN montreront le petit axe.

Il faut noter qu'un essai a été effectué avec un sol homogène composé de seulement trois failles. Dans ce cas, l'occurrence de ce paradoxe pour le mMAN par rapport au MAN n'a pas été observé à tous les coups, puisque ce paradoxe se produit ici seulement dans le cas où le mMAN ne traverse pas une des failles. Ceci peut peut-être s'expliquer par le fait que le nombre de failles est ici trop faible pour pouvoir assimiler cette structure à un sol multi-fracturé. La Fig. 4.17 montre ces simulations pour le MAN et le mMAN, localisé à trois mètres de la première faille, la distance entre les failles étant de  $5\text{ m}$ . Cette simulation a été effectuée pour deux tailles de dispositif :  $LD = 4\text{ m}$  et  $LD = 10\text{ m}$  avec une erreur de  $5\%$  sur l'espacement des électrodes. Une électrode  $B$  a été placée à plus de  $100\text{ m}$  de la position de mesure.

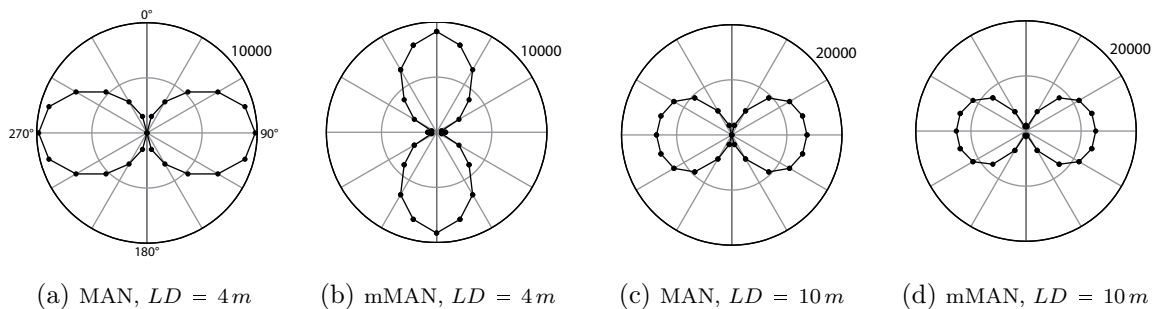


FIGURE 4.17 – Simulations numériques du paradoxe anisotropique pour le mMAN sur une structure composée de trois failles. L'orientation des failles est de  $0^\circ$  (lignes grises) et le dispositif se trouve à  $3\text{ m}$  des failles. La valeur donnée à côté du diagramme est la valeur sur le cercle extérieur, l'échelle étant linéaire.

Une incertitude est donc toujours présente sur ces résultats lorsque le milieu n'est pas suffisamment fracturé, ne pouvant alors pas être assimilé à un milieu anisotrope.

### 4.3.2 Mesure azimutale sur une structure de faille

Ce paragraphe a été repris dans l'article "Fracture characterisation using geoelectric null-arrays", dans l'annexe D (Falco *et al.*, 2013).

Les mesures simulées sur une faille conductive (Fig. 4.18) et sur une faille résistive (Fig. 4.19) ont été effectuées à cinq positions différentes par rapport à la faille avec une longueur du dispositif  $LD = 10\text{ m}$ . De plus, à titre comparatif, des simulations avec le Sac ont été effectuées. La faille est toujours couverte par un sol de  $2.5\text{ m}$  d'épaisseur.

#### Mesure azimutale sur une faille conductive

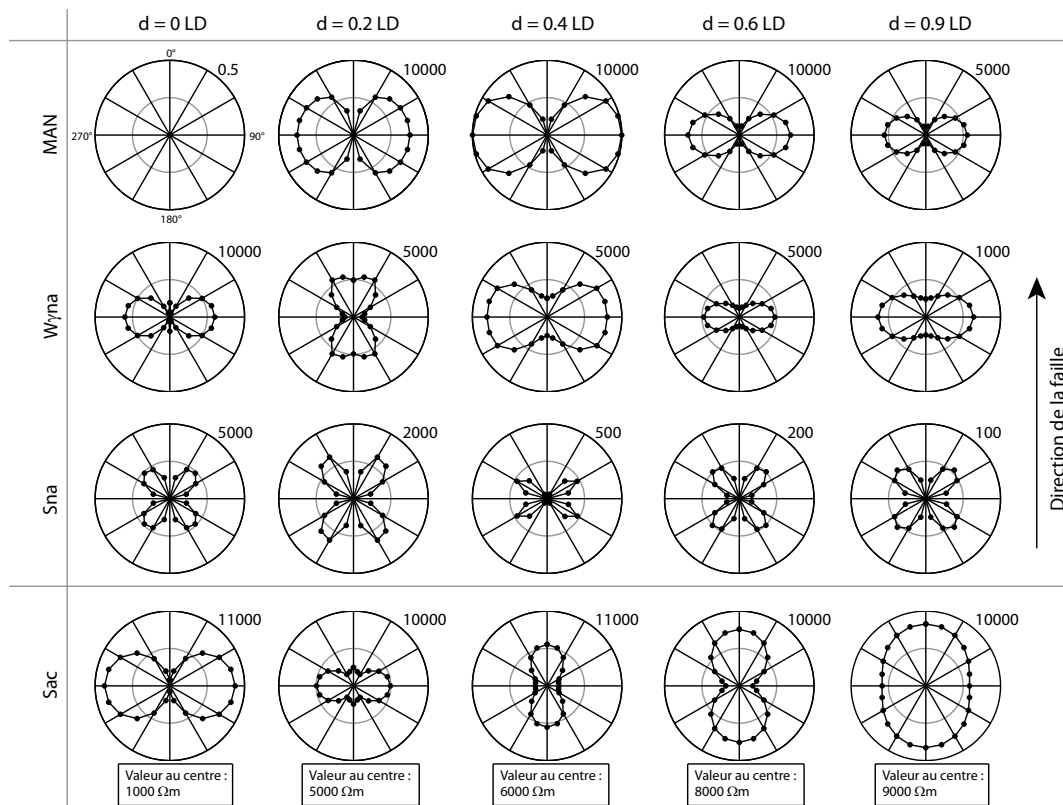


FIGURE 4.18 – Simulations numériques des mesures azimutales avec les null-arrays et le Sac sur une faille conductive, la faille étant orientée  $N0^\circ$ . La distance relative donnée, en terme de  $LD$ , est entre le centre du dispositif et la position de la faille. La valeur donnée à côté du diagramme est la valeur sur le cercle extérieur (et la résistivité pour le Sac), l'échelle étant linéaire. La longueur du dispositif est  $10\text{ m}$ .

La Fig. 4.18 montre les diagrammes polaires pour les null-arrays et le Sac, simulés sur une faille conductive à cinq positions différentes. La résistivité de la faille est ici  $\rho_{\text{fault}} = 10\ \Omega\text{m}$  et celle du milieu environnant est de  $\rho = 10'000\ \Omega\text{m}$ . Pour les null-arrays, le centre du diagramme

a une valeur de zéro, alors que le centre du Sac est donné sous chaque diagramme.

Pour des raisons de symétrie, le MAN a une valeur nulle dans toutes les directions lorsqu'il se trouve précisément sur la structure. Pour toutes les autres positions, la direction de la faille correspond à la direction de l'axe le plus petit.

Pour le  $W\gamma$ na, l'orientation de la faille correspond toujours à l'axe mineur, sauf dans le cas où il se trouve à une distance de  $0.2LD$  de la faille. Ce résultat est problématique pour les cas de terrain, puisqu'une précision de  $0.2LD$  ne peut pas être assurée dans cette situation.

Le Sna est capable de donner des directions avec précision, mais les directions données sont soit celle de la faille, soit sa perpendiculaire. Ce dispositif semble alors efficace pour des résultats précis, mais il doit être utilisé en parallèle à d'autres mesures pour permettre de lever l'indétermination. Pour ce dispositif, un paradoxe anisotropique se produit. En effet, si on regarde la forme globale de ces figures, en imaginant une ellipse circonscrite au signal simulé, le grand axe est orienté parallèlement à la direction de la faille pour les deux premières positions, perpendiculairement à cette direction lorsque le dispositif se trouve à une distance de  $0.4LD$ , et à partir de  $0.6LD$ , le signal est plus ou moins inscrit dans un cercle.

Pour le Sac, le grand axe de l'ellipse est perpendiculaire à la faille pour les mesures effectuées plus ou moins sur la faille, alors que le paradoxe anisotropique se produit à partir d'une distance de  $0.4LD$ , l'ellipse étant alors tournée de  $90^\circ$ .

### Mesure azimutale sur une faille résistive

La Fig. 4.19 montre les diagrammes polaires pour les null-arrays et le Sac, simulés sur une faille résistive à cinq positions différentes. La résistivité de la faille est ici  $\rho_{fault} = 10'000'000 \Omega m$  et celle du milieu environnant est de  $\rho = 10'000 \Omega m$ . Pour les null-arrays, le centre du diagramme a une valeur de zéro, alors que le centre du Sac est toujours de  $10'000 \Omega m$ .

Le MAN donne exactement les mêmes résultats que dans le cas conducteur (sauf à  $0.4LD$  où la forme diffère très légèrement), à l'exception du fait que les amplitudes sont environ deux fois plus élevées.

Le  $W\gamma$ na donne aussi plus ou moins les mêmes résultats que dans le cas conducteur. Les amplitudes des signaux est ici environ cinq fois plus faible. La sensibilité au positionnement semble par contre plus grand, puisqu'un comportement bizarre semble s'observer pour les deux positions  $0.2LD$  et  $0.4LD$ .

Le Sna est le plus différent des trois null-arrays, en comparaison du cas conducteur. A l'exception de la position qui est exactement sur la faille, pour lequel le signal est environ deux fois celui du cas conducteur, tous les signaux ont un niveau plus faible. Le comportement en rapport avec le paradoxe anisotropique est également compliqué, puisque l'ellipse circonscrite a un grand axe dans la direction de la faille, sauf lorsque le dispositif se trouve à une distance de  $0.2LD$ . A une distance de  $0.9LD$ , le diagramme est quasiment inscrit dans un cercle, l'effet de la faille étant suffisamment faible. Malgré tout, le Sna reste capable de déterminer avec

précision la direction de la faille résistive, même s'il n'est toujours pas possible de différencier la direction de la structure de sa perpendiculaire.

Pour le Sac, le comportement est le même que dans le cas conducteur pour les positions proches de la faille. A partir de  $0.6 LD$  de distance, le paradoxe anisotropique apparaît, puisque le grand axe de l'ellipse est de nouveau perpendiculaire à la direction de la faille.

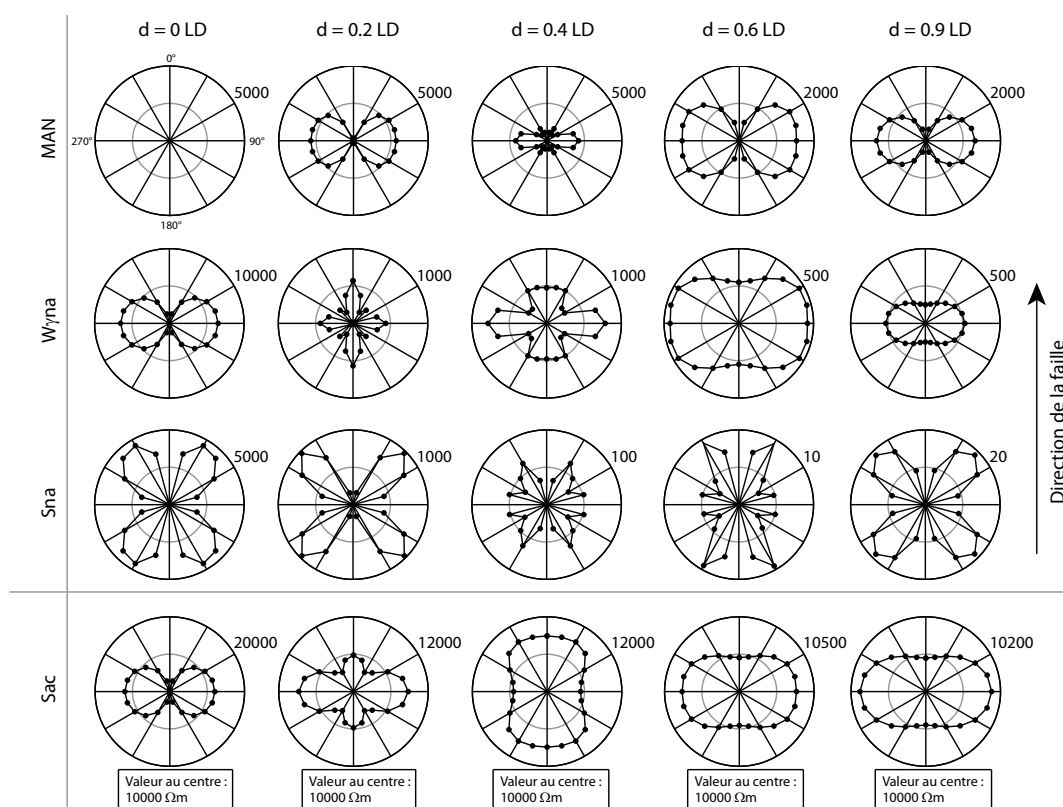


FIGURE 4.19 – Simulations numériques des mesures azimuthales avec les null-arrays et le Sac sur une faille résistive, la faille étant orientée  $N0^\circ$ . La distance relative donnée, en terme de  $LD$ , est entre le centre du dispositif et la position de la faille. La valeur extérieure est la valeur du signal sur le cercle extérieur (et la résistivité pour le Sac). La longueur du dispositif est  $10 m$ .

### 4.3.3 Mesure azimuthale sur une structure à deux failles

Les simulations sur une structure composée de deux failles résistives parallèles, montrées sur la Fig. 4.20, ont été effectuée seulement avec le Sna et sa version classique, avec cinq différentes longueurs de dispositif ( $LD$ ), et centrés entre les deux failles. Les failles sont séparées de  $D = 20 m$  et couvertes par un sol de  $2.5 m$  d'épaisseur.

Le Sna donne plus ou moins le même résultat que dans le cas d'une faille simple. Le plus petit dispositif, avec  $LD = 5 m$  a un comportement bizarre lorsque le dispositif est perpendiculaire

aux failles. Cela pourrait être provoqué par une divergence numérique, puisque le dispositif est composé de seulement quelques éléments du maillage.

Un autre comportement bizarre se produit lorsque le dispositif a exactement la même taille que l'espacement entre les failles. Dans ce cas, huit lobes apparaissent sur le diagramme, ajoutant ainsi une "nouvelle" direction symétrique où le null-array mesure un signal nul. Aucune explication n'a pu être trouvée pour ce phénomène.

Le Sac donne une ellipse avec un grand axe perpendiculaire aux failles pour les dispositifs plus petits que la distance séparant les failles. Le paradoxe anisotropique commence à apparaître à partir d'une taille de dispositif égale à cette distance. Pour le plus grand dispositif ( $LD = 50m$ ), le grand axe de l'ellipse est de nouveau perpendiculaire aux failles.

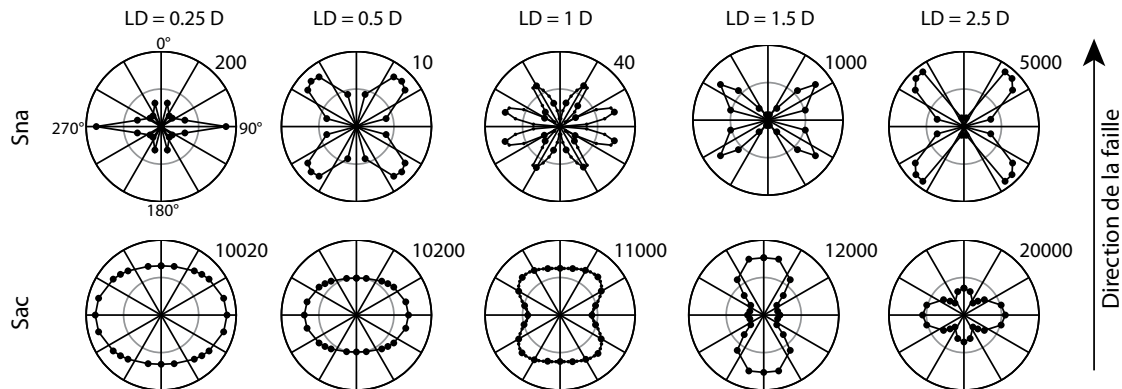


FIGURE 4.20 – Simulations numériques des mesures azimuthales avec le Sna et le Sac sur une structure composée de deux failles parallèles, les failles étant orientées  $N0^\circ$ , pour cinq longueurs de dispositif différentes (LD). La distance entre les failles est de  $D = 20m$ . Les valeurs au centre du diagramme pour le Sac est toujours  $10'000\Omega m$ , alors que cette valeur est de  $0\Omega m$  pour le null-array. La valeur donnée à côté du diagramme est la valeur sur le cercle extérieur (et la résistivité pour le Sac), l'échelle étant linéaire.

#### 4.3.4 Mesure azimuthale sur une structure de failles en X

Seulement le MAN et le Sna ont été étudiés sur cette structure. Ce choix a été pris pour deux raisons. La première est que les résultats du  $W\gamma na$  étaient difficilement interprétables jusque là en terme de mesures azimuthales. La seconde raison est d'ordre numérique : cela aurait compliqué considérablement la en nécessitant la création d'un maillage par position du dispositif. La longueur des dispositifs utilisés est de  $LD = 10m$ . Les simulations du Sac ont aussi été effectuées à titre comparatif.

Les simulations sur cette structure de failles en X (Fig. 4.21) ont été effectuées à cinq positions différentes, par rapport au point d'intersection des deux failles. Les distances indiquées se trouvent sur la bissectrice de l'angle aigu ( $60^\circ$ ) entre les failles. Ces failles sont aussi couvertes

d'un sol de  $2.5\text{ m}$  d'épaisseur et elles sont 1000 fois plus résistives que le milieu environnant. Elles sont orientées dans les directions  $N60^\circ$  et  $N120^\circ$ .

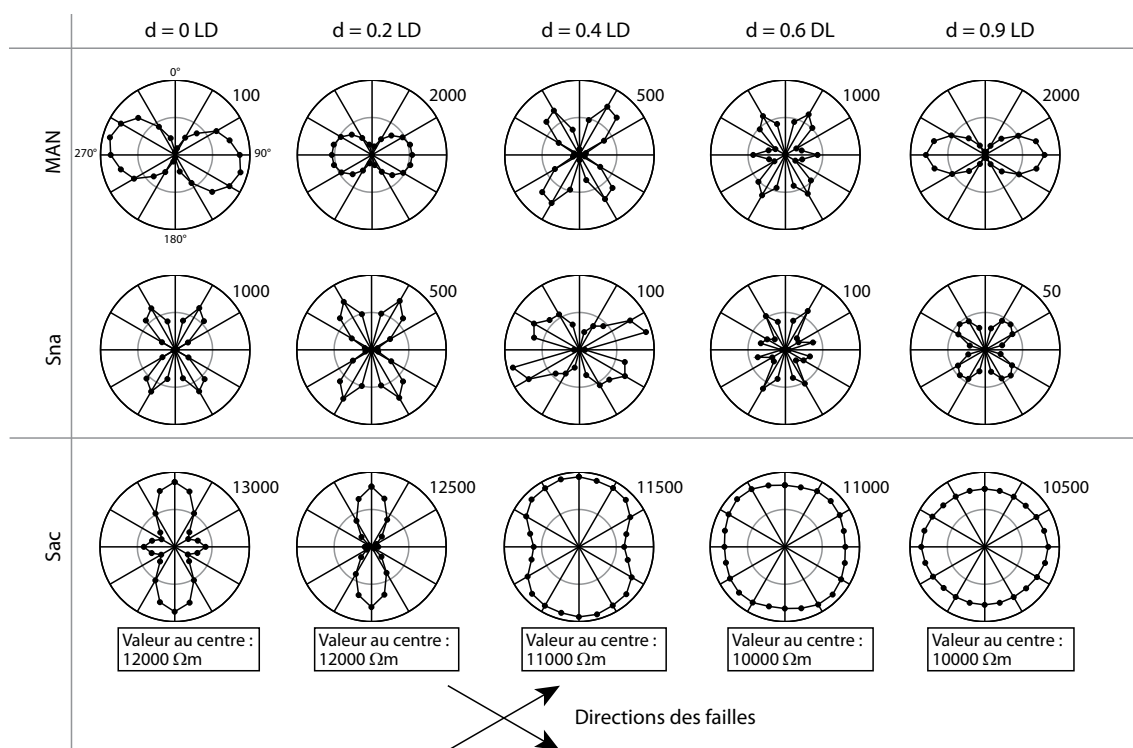


FIGURE 4.21 – Simulations numériques des mesures azimuthales sur une structure de failles en X, orientées selon  $N60^\circ$  et  $N120^\circ$ . Les positions sont mesurées depuis le point d'intersection des failles, dans la direction  $N90^\circ$ . La longueur du dispositif est de  $10\text{ m}$ . La valeur donnée à côté du diagramme est la valeur sur le cercle extérieur (et la résistivité pour le Sac), l'échelle étant linéaire.

Pour trois des cinq positions, le MAN se comporte presque comme si la structure était composée d'une simple faille. La direction obtenue correspond ici à la bissectrice de l'angle obtus entre les deux failles. Mais un comportement plus complexe se produit pour les positions  $0.4\text{ LD}$  et  $0.6\text{ LD}$ . A ces positions, la distance entre les failles et les électrodes de courant est quasiment la même que la distance entre les électrodes. A  $0.4\text{ LD}$ , le diagramme a une forme similaire au Sna, avec un diagramme composé de quatre lobes. A  $0.6\text{ LD}$ , deux nouveaux minima apparaissent, sur ce qui semble être une situation de transition vers un "retour à la normale" à la position suivante. Ainsi, ce genre de figure sur un diagramme azimuthal obtenu à partir d'un MAN pourrait être un indicateur de structure non-bidimensionnelle.

Le Sna donne la direction des deux bissectrices avec la direction de ses zéros, soient les directions  $N0^\circ$  et  $N90^\circ$ . Comme dans le cas du MAN, à  $0.6\text{ LD}$ , deux minima supplémentaires semblent apparaître dans la direction des deux failles. Ce fait peut être une simple coïncidence ou une réalité, mais dans les deux cas l'interprétation de ces minima en terme de direction des failles

serait une surinterprétation.

Le Sac donne, dans ce cas, peut-être les meilleurs résultats lorsque le dispositif est exactement sur le point d'intersection des failles, puisque le diagramme a deux minima correspondant aux directions des failles. Pour les autres positions, aucune information ne semble pouvoir être déduite de ce dispositif.

Les simulations sur cette structure montrent le complexité des null-arrays et des mesures azimutales. Cet exemple illustre que des surinterprétations sont facilement réalisables, qui peuvent bien sûr mener à une interprétation erronée d'une réalité structurale. Quelles que soient les configurations utilisées, il ne paraît ici pas possible de détecter avec certitude les orientations de ces failles en X.

#### 4.3.5 Mesure azimutale sur une structure de grotte

Les simulations des mesures azimutales sur une structure de grotte (Fig. 4.22) ont été effectuées à cinq positions différentes par rapport à la position du centre de celle-ci, perpendiculairement à la direction de la cave. La longueur du dispositif utilisé est  $LD = 10m$ . Ces simulations ont aussi été effectuées avec le Sac. Comme dans le cas des mesures en profil, et pour les mêmes raisons, les résultats devraient être très semblables à ceux obtenus sur une faille.

La grotte est orientée dans la direction  $N0^\circ$ , a une section de  $4m \times 4m$ , et son toit arrive à une profondeur de  $2m$ . La résistivité de la grotte est  $10'000$  plus grande que celle du milieu homogène dans lequel elle se trouve.

Comme dans le cas de la faille, le MAN donne zéro dans toutes les directions lorsque le dispositif est exactement sur l'axe du centre de la grotte, c'est-à-dire le centre de symétrie de la structure. En dehors de cette position, le diagramme a la même forme que dans le cas de la faille, avec un minimum dans la direction de la grotte. Les amplitudes sont plus ou moins les mêmes que dans le cas de la faille résistive, ce qui peut laisser penser que la taille de la structure influence peu la mesure du MAN.

Pour le  $W\gamma na$ , comme dans le cas de la faille (résistive et conductive), le diagramme donne une ellipse avec un grand axe perpendiculaire à la grotte, sauf lorsque le dispositif se trouve à une distance  $d = 0.2LD$  où une forme bizarre est obtenue. Cette position correspond au moment où le dispositif se trouve exactement au dessus de la limite de la grotte. Les amplitudes sont ici environ deux fois plus élevées que dans le cas de la faille résistive.

Le Sna est ici aussi toujours capable de détecter avec précision deux directions, mais il n'est toujours pas possible de choisir entre ces deux directions avec sa seule mesure. Les deux premières mesures, effectuées au dessus de la grotte, donnent des ellipses circonscrites dans la même direction que la grotte, mais ces ellipses tournent de  $90^\circ$  et deviennent donc perpendiculaires à la direction de la grotte dès que le centre du dispositif n'est plus au dessus de la grotte, due au paradoxe anisotropique. A  $0.9LD$ , l'ellipse est plus ou moins un cercle. Globalement,

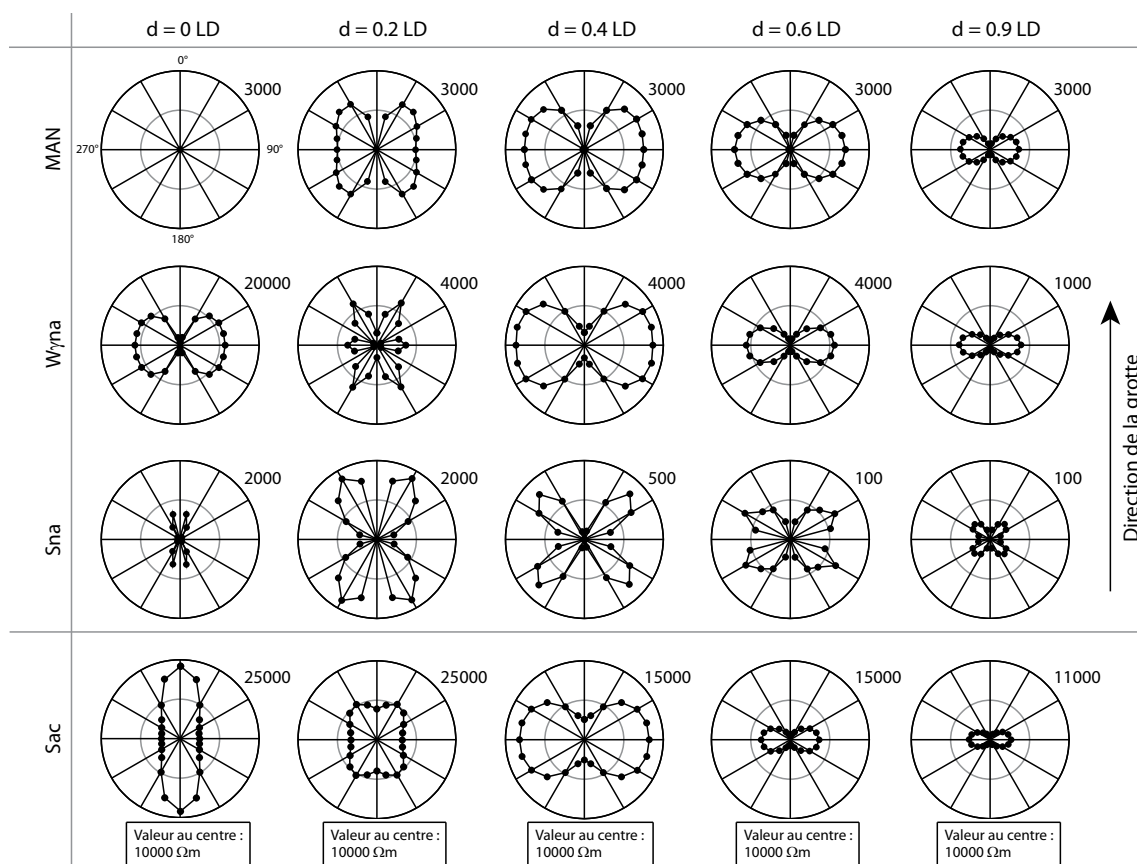


FIGURE 4.22 – Simulations numériques des mesures azimuthales sur une structure de grotte. Les distances indiquées sont les distances entre le centre du dispositif et le centre de la grotte. La résistivité est 10'000 fois plus grande que celle du milieu. La longueur du dispositif est de 10 m et la grotte est orientée dans la direction  $N0^\circ$ . Elle a une section de 4 m x 4 m et son toit est à une profondeur de 2 m. La valeur donnée à côté du diagramme est la valeur sur le cercle extérieur (et la résistivité pour le Sac), l'échelle étant linéaire.

les amplitudes sont ici aussi plus élevées, entre deux et dix fois, que dans le cas de la faille résistive, sauf pour la mesure effectuée exactement sur la grotte où elle est ici environ cinq fois plus faible.

Comme pour le Sna, et en opposition au cas de la faille simple (résistive ou conductive), le Sac donne des ellipses avec un grand axe parallèle à la grotte pour les mesures effectuées au-dessus de celle-ci, alors que le grand axe est perpendiculaire à la grotte dès que le dispositif est à côté. Ici aussi, le paradoxe anisotropique est clairement observable.

Bien que cette structure aurait dû être similaire au cas d'une faille simple, comme c'était le cas dans les mesures en profil, plusieurs différences de comportement ont été clairement observées. Ces différences sont certainement liées aux dimensions latérales de la grotte, par rapport à la taille des dispositifs utilisés.

### 4.3.6 Mesure azimuthale sur une structure à deux zones

Les simulations sur une structure à deux zones (Fig. 4.23) ont été effectuées à cinq différentes positions par rapport à la zone de transition, qui a une direction de  $N0^\circ$ , avec une longueur de dispositif ( $LD = 10\text{ m}$ ). En plus des trois null-arrays, les simulations ont aussi été effectuées avec le Sac.

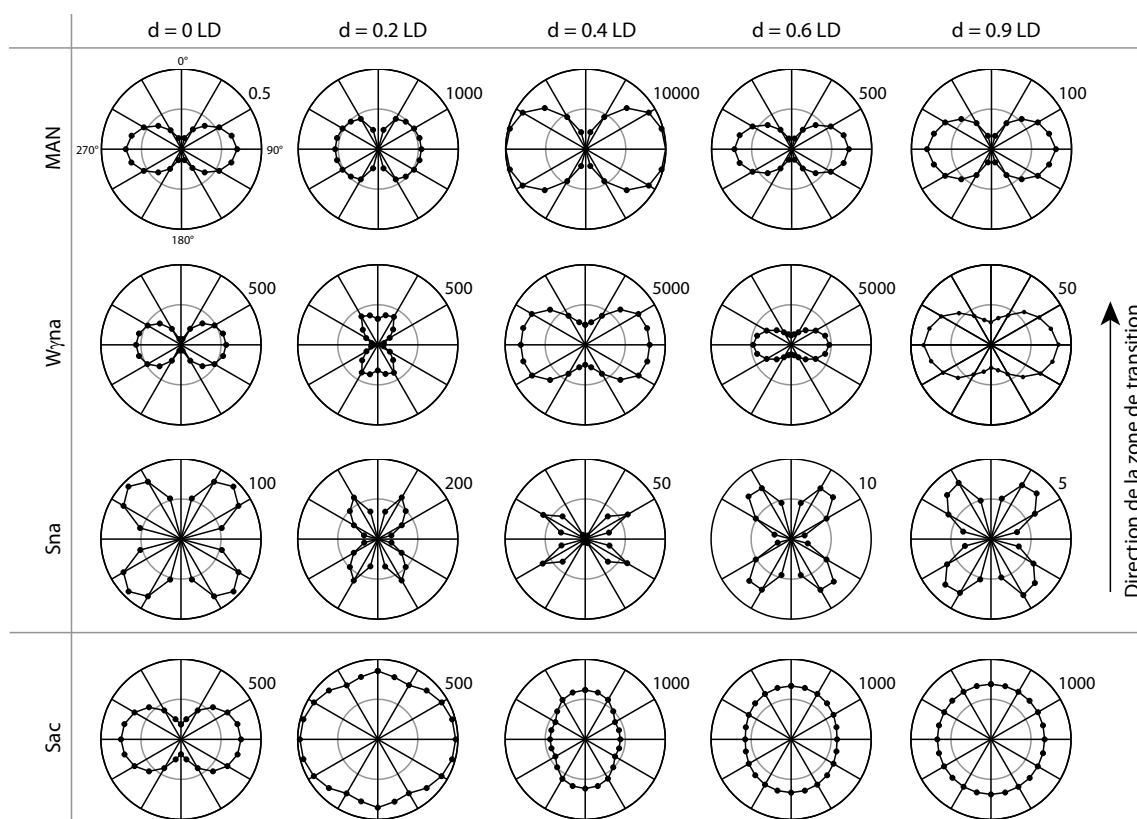


FIGURE 4.23 – Simulations numériques des mesures azimuthales sur une structure à deux zones, avec l'orientation de l'interface  $N0^\circ$ , pour cinq positions différentes par rapport à l'interface. La longueur du dispositif est de  $10\text{ m}$ . La valeur donnée à côté du diagramme est la valeur sur le cercle extérieur (et la résistivité pour le Sac), l'échelle étant linéaire.

Comme dans le cas d'une faille simple, le MAN donne une valeur nulle dans la direction de la transition à toutes les positions, même lorsque le dispositif est exactement sur l'interface. Bien que ce dernier cas ne soit pas symétrique, le MAN est malgré tout capable de détecter l'orientation de la structure. Les amplitudes des signaux augmentent surprenamment jusqu'à une distance de  $0.4\text{ LD}$  de l'interface, pour ensuite décroître une fois que le dispositif ne traverse plus l'interface. Ces amplitudes sont globalement plus faibles que celles obtenues avec une simple faille, même si elles dépendent du contraste résistif, et donc des valeurs de résistivités appliquées au modèle.

Le  $W\gamma_{na}$  se comporte exactement comme dans le cas d'une simple faille conductive, où à l'exception de la position  $0.2LD$ , les diagrammes ont leur grand axe de l'ellipse perpendiculaire à l'interface. Les amplitudes sont ici identiques pour les positions  $0.4LD$  et  $0.6LD$ , mais sont significativement plus basses pour les autres positions.

De la même manière, le  $S_{na}$  se comporte comme dans le cas d'une simple faille conductive, puisque les ellipses circonscrites ont leur grand axe dans la direction de l'interface, à l'exception de la position  $0.4LD$ . Par contre, les amplitudes de leur signal sont toutes entre dix et vingt fois plus basses que dans le cas de la faille conductive. Ici aussi, deux directions sont obtenues avec une bonne précision à toutes les positions, mais il est toujours impossible de déterminer laquelle est "la bonne".

Le  $S_{ac}$  se comporte plus ou moins comme dans le cas de la faille conductive, puisque son grand axe est perpendiculaire à l'interface lorsque le dispositif est exactement sur celui-ci. Ensuite, le paradoxe anisotropique se produit et une transition est faite avec une ellipse tournée de  $90^\circ$  pour les positions suivantes. A  $0.9LD$ , l'ellipse est quasiment un cercle. Il faut noter que les valeurs au centre sont nulles, puisque le sol est séparé en deux zones de résistivités très différentes. Ainsi, les valeurs sur les diagrammes polaires du  $S_{ac}$  sont des vraies résistivités apparentes.

## 4.4 Profondeur d'investigation des null-arrays

La détermination de la profondeur d'investigation (DOI pour "Depth Of Investigation") d'une méthode géophysique a toujours été compliquée, puisqu'une profondeur claire, nette et précise ne peut être définie. Ce "problème" est vrai pour toutes méthodes géophysiques, qu'il s'agisse de courant électrique, d'électromagnétisme ou de sismique, puisque les ondes n'empruntent pas un chemin bien défini mais se propagent dans toutes les directions dans le milieu considéré. Ainsi, la définition d'une *profondeur d'investigation* est seulement une définition et une grandeur conceptuelle, permettant de comparer les sensibilités entre différentes méthodes en fonction de la profondeur.

Pour les méthodes géoélectriques classiques, l'effet d'un cube infiniment petit est relativement facile à calculer analytiquement, basé sur le fait que le moment dipolaire électrique est proportionnel au courant électrique dans le volume considéré multiplié par ce même volume (Roy et Apparao, 1971). En intégrant alors cet effet sur tout le plan  $xy$ , la sensibilité d'une mesure à une couche infinie et infiniment fine peut être analytiquement obtenue, en fonction de la profondeur (voir Annexe B.1 pour plus de détails sur ce calcul). Roy et Apparao (1971) ont ainsi défini la profondeur d'investigation par la profondeur à laquelle le plan  $xy$  produit un maximum d'effet, alors qu'Edwards (1977) l'a défini par la profondeur médiane, c'est-à-dire par la profondeur pour laquelle l'aire sous la courbe vaut la moitié de l'aire totale. L'équation 4.2, appelée "*Profondeur Normalisée d'Investigation Caractéristique*" (Guérin, 2007), ou Normalised Curve of Investigation Characteristics (NDIC), montre ce résultat et permet alors de

le calculer pour n'importe quelle configuration géométrique (Allen, 2007) :

$$NDIC(z) = dz 4z \frac{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{(r_i^2 + 4z^2)^{3/2}}}{\sum_{i=1}^n \frac{p_i}{r_i}} \quad (4.2)$$

où

- $z$  : est la profondeur en mètres
- $dz$  : est un petit incrément de  $z$
- $\sum_{i=1}^n$  : est la somme sur les  $n$  électrodes (habituellement,  $n = 4$ )
- $r_i$  : est la distance entre les électrodes
- $p_i$  : donne le signe du terme (vaut donc 1 ou  $-1$ )

Cette relation est utilisée comme base pour le calcul de la profondeur d'investigation et pour comparer les différents dispositifs géoélectriques.

Avec les null-arrays, cette relation ne fonctionne plus, puisque l'effet d'une structure horizontale, une fine couche horizontale dans ce cas, est nulle. Il est alors utile de reprendre le calcul depuis le début afin de trouver une manière d'estimer une profondeur d'investigation pour ces dispositifs.

Un milieu homogène peut se diviser en un nombre fini de petits éléments de volume, où chacun contribue au signal mesuré. Roy et Apparao (1971) ont montré que pour chaque élément de volume, le potentiel dû à chaque source de courant est (Allen, 2007)

$$V(x, y, z) = \frac{\rho}{2\pi} \frac{I_c}{\sqrt{(x - x_c)^2 + y^2 + z^2}} \quad (4.3)$$

où

- $x, y, z$  : les coordonnées de la position de l'élément de volume
- $V(x, y, z)$  : la valeur du potentiel de l'élément de volume localisé en  $(x, y, z)$
- $x_c$  : les coordonnées des électrodes de courant, avec un dispositif supposé être aligné sur la ligne ( $y = 0, z = 0$ )
- $I_c$  : le courant injecté, en prenant en compte son signe

De cette équation, Roy et Apparao (1971) ont ainsi montré que le moment dipolaire électrique  $\vec{p}$  pour chaque élément de volume est proportionnel au champ électrique.

$$\vec{p} = \frac{1}{2\pi} \nabla V dx dy dz \quad (4.4)$$

De cette relation, ils ont dérivé le potentiel résultant  $dV_P$  à chaque électrode de potentiel

$$dV_p = (\vec{p} \cdot \nabla) \left( \frac{1}{\sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2 + z^2}} \right) \quad (4.5)$$

où  $x_p$  et  $y_p$  sont les coordonnées  $(x, y)$  des électrodes de potentiel.

En utilisant le principe de superposition, l'équation finale peut être obtenue donnant l'effet pour n'importe quelle configuration d'électrodes de potentiel et de courant

$$dV = \frac{\rho I}{4\pi^2} dz \sum_{i=1}^n \frac{p_i [(x - x_{c_i})(x - x_{p_i}) + y(y - y_{p_i}) + z^2]}{[(x - x_{c_i})^2 + y^2 + z^2] [(x - x_{p_i})^2 + (y - y_{p_i})^2 + z^2]^{3/2}} dx dy \quad (4.6)$$

où  $x_c$  et  $y_c$  sont les coordonnées des électrodes de courant  $(x, y)$  (Allen, 2007). L'indice  $i$  correspond au nombre de couples d'électrodes, donc dans le cas de n'importe quel quadripôle  $ABMN$ ,  $i = 1, \dots, 4$  ( $AM$ ,  $AN$ ,  $BM$  et  $BN$ ).

La valeur  $p_i$  est le signe correspondant à la contribution et vaut donc 1 ou  $-1$ . De l'équation (4.7), l'équation (4.6) est alors obtenue avec les notations en terme de  $A$ ,  $B$ ,  $M$  et  $N$

$$dV = \frac{\rho I}{4\pi^2} dz \left[ \frac{(x - x_A)(x - x_M) + y(y - y_M) + z^2}{[(x - x_A)^2 + y^2 + z^2] [(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + z^2]^{3/2}} + \frac{(x - x_B)(x - x_N) + y(y - y_N) + z^2}{[(x - x_B)^2 + y^2 + z^2] [(x - x_N)^2 + (y - y_N)^2 + z^2]^{3/2}} - \frac{(x - x_A)(x - x_N) + y(y - y_N) + z^2}{[(x - x_A)^2 + y^2 + z^2] [(x - x_N)^2 + (y - y_N)^2 + z^2]^{3/2}} - \frac{(x - x_B)(x - x_M) + y(y - y_M) + z^2}{[(x - x_B)^2 + y^2 + z^2] [(x - x_M)^2 + (y - y_M)^2 + z^2]^{3/2}} \right] dx dy \quad (4.7)$$

Cette équation peut ainsi être intégrée sur un volume, et pourrait donc donner l'équation 4.2 avec les notations  $ABMN$ . Mais cette équation peut aussi être considérée ainsi pour estimer la signal généré par une petite perturbation de volume infiniment petit.

L'équation 4.7 a alors été appliquée aux trois null-arrays, pour calculer l'effet d'un petit élément de volume localisé à différentes distances du centre du dispositif, en fonction de la profondeur de ce petit élément. Sa position est donnée avec un "offset"  $45^\circ$  par rapport à la direction du dispositif, pour éviter de tomber sur un axe de symétrie qui donnerait alors un signal nul pour toutes positions et profondeurs. La position considérée ici est donc du type  $(x, x, z)$ , en prenant comme origine  $(0, 0, 0)$  le centre du dispositif considéré. La Fig. 4.24 illustre la position de l'élément de volume dans le cas du MAN.

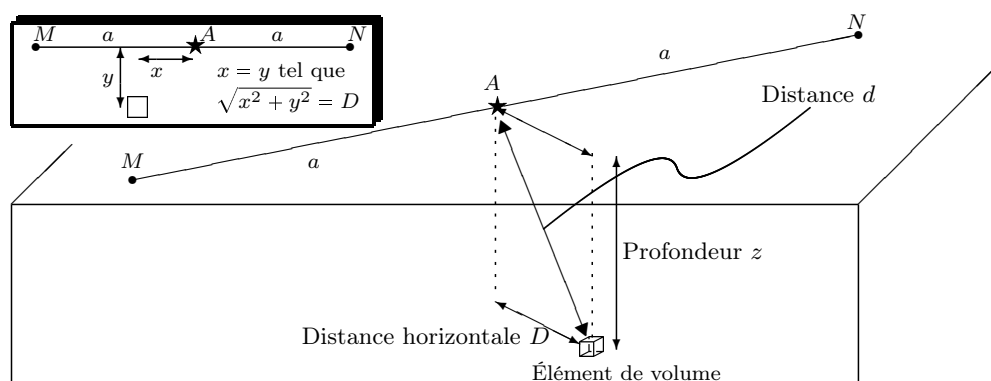


FIGURE 4.24 – Setup de la position d'un élément de volume par rapport au null-array, le MAN dans ce cas, pour le calcul analytique de la profondeur d'investigation.

La distance  $D$  est la distance horizontale entre l'élément de volume et le centre du dispositif, donc la position théorique de la mesure, et la distance  $d$  la "vraie" distance entre l'élément de volume et le centre du dispositif. En appliquant l'équation 4.7 pour différentes distances  $D$  de l'élément de volume en fonction de la profondeur  $z$ , il est alors possible de comparer les null-arrays entre eux. Cela mène alors à une définition de la profondeur d'investigation pour les null-arrays.

La Fig. 4.25 montre les courbes calculées pour six différentes distances  $D$  pour le MAN (les figures équivalentes pour les deux autres null-arrays se trouvent dans l'annexe B.2). L'évolution de l'effet d'un cube de dimension infinitésimale en fonction de la profondeur est alors observé lorsque ce cube est éloigné du centre du dispositif. Il est ici possible d'observer qu'un maximum de sensibilité ne se produit pas à chaque distance  $D$ .

A partir de ces courbes, la position de ces maximums de sensibilité en fonction de la distance  $D$  a donc été déterminée, puis reporté sur un nouveau graphe. Un fit a alors été effectué dans le but d'obtenir une valeur à la distance  $D = 0$ , où l'effet est théoriquement nul pour les dispositifs symétriques (donc pour le MAN et le Sna). Il est ainsi possible de définir la "profondeur d'investigation" théorique des null-arrays dans ce travail, représentant la profondeur à laquelle un maximum de sensibilité est observé lorsque un volume infiniment petit se trouve exactement sous le centre de symétrie du dispositif.

La Fig. 4.26 montre ces courbes de maximums de sensibilités en fonction de la distance  $D$  pour les trois null-arrays. Toutes les distances sont données en fonction de la longueur du dispositif (LD). Il est donc ici possible de voir que seul le  $W\gamma_{na}$  possède une valeur calculée à  $D = 0$ .

La table 4.2 donne les profondeurs d'investigations pour  $D = 0$ .

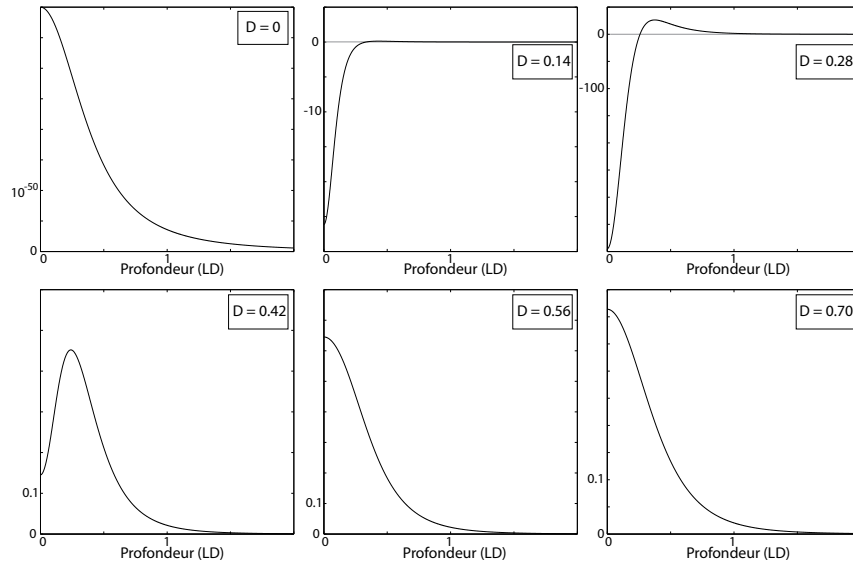


FIGURE 4.25 – Courbes de profondeur d’investigation caractéristique pour le MAN pour différentes distances  $D$  (par rapport au centre du dispositif) à un infiniment petit élément de volume. L’axe vertical représente la force du signal généré avec des unités arbitraires, proportionnelles entre elles.

Les valeurs classiques (NDIC) de ce tableau ont été calculé par la même méthode que pour les null-arrays, et comparées aux valeurs classiques dans la littérature, pour valider la méthode. Il faut noter que la valeur calculée pour le «MAN classique», donc le pôle-dipôle, ne correspond pas à celle de la littérature. L’explication est très simple : dans ce calcul classique, le pôle-dipôle a été considéré avec une distance  $AM = MN$ , alors la distance  $MN$  peut être plus grande que la distance  $AM$ .

En plus des valeurs de profondeur, d’autres informations concernant le comportement de ces null-arrays peuvent être déduites des courbes de la Fig. 4.26 :

- Le MAN atteint une profondeur plus faible.
- Le Sna a une très bonne profondeur d’investigation mais est le plus sensible aux perturbations latérales. Un grand risque de mélange de structure est alors encouru en utilisant ce dispositif, dans les cas où les structures se trouveraient suffisamment proches les unes des autres.
- Le  $W\gamma na$  a en même temps la plus grande profondeur d’investigation (légèrement plus grande que celle du Sna) et la plus faible sensibilité latérale, ce qui fait de ce dispositif le plus approprié, d’un point de vue analytique, pour détecter et identifier des structures verticales petites et proches.

Comme présenté dans le chapitre 5, ces résultats sont vérifiés sur le terrain, où le  $W\gamma na$  est le meilleur pour détecter et localiser des failles (proches), le Sna donne de bons résultats même

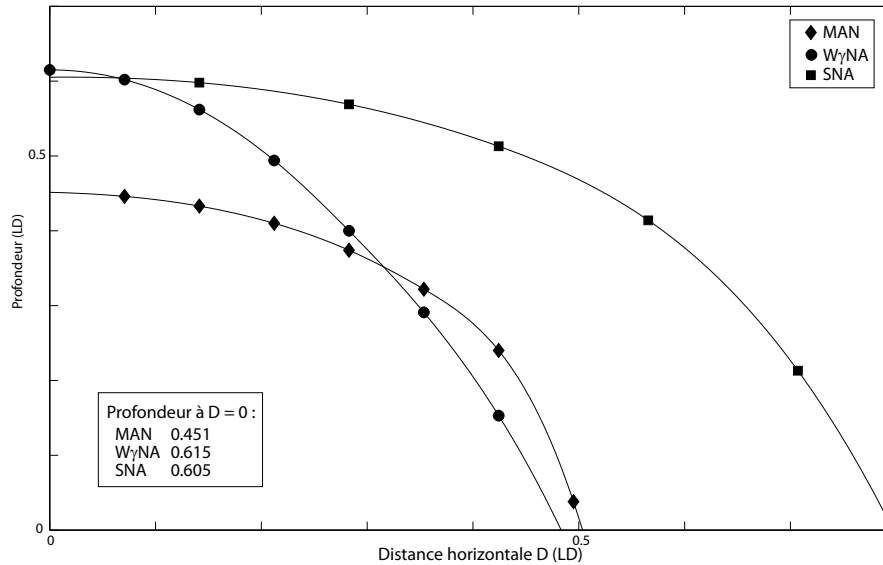


FIGURE 4.26 – Courbes de profondeur d'investigation caractéristique pour les trois null-arrays : le MAN, le Sna et le  $W\gamma$ na. Les profondeurs et distances sont données en fonction de la longueur du dispositif  $LD$ .

TABLE 4.2 – Profondeur d'investigation relative calculée analytiquement pour les null-arrays (colonne 1) et leur équivalent classique (colonne 2). Les équivalents classiques du MAN,  $W\gamma$ na et Sna sont les pôle-dipôle, Wenner-Schlumberger et Schlumberger arrays, respectivement. La colonne 3 donne les profondeurs trouvées dans la littérature, avec les références suivantes : 1 : (Apparao *et al.*, 1992) ; 2 : (Szalai *et al.*, 2009a) et (Szalai *et al.*, 2009b). Les profondeurs sont données en rapport de la longueur du dispositif  $LD$ .

Array	Null-array	Classique (NDIC)	Classique (littérature)
MAN	$0.451 LD$	$0.160 LD$	$0.235 LD^2$
$W\gamma$ NA	$0.615 LD$	$0.116 LD$	$0.11 LD^1$
SNA	$0.605 LD$	$0.123 LD$	$0.125 LD^{1,2}$

s'il n'est pas sensible à toutes les structures et le MAN donne des résultats très difficiles à interpréter.

Cette approche analytique peut être comparée, pour le MAN uniquement, à l'approche effectuée à la section 4.2.2 dans le cas d'une faille oblique. Dans ce cas, une valeur "minimale" (relativement aux choix des pentes) de profondeur d'investigation était obtenue pour la faille la moins abrupte de  $0.476 LD$ . Cette valeur augmentait rapidement pour atteindre  $0.742 LD$  dans le cas le plus abrupte. Il est alors possible d'imaginer que cette valeur ne pourrait pas descendre sous cette valeur de  $0.451 LD$  calculée analytiquement et plafonnerait à une valeur à déterminer, probablement autour des  $0.8 LD$

## 4.5 Discussion sur les simulations numériques

A ce point de l'étude, plusieurs informations ont déjà été relevées sur le comportement et l'application des null-arrays. Comme l'étude synthétique a été menée dans deux directions, en mesures en profil et en mesures azimutales, cette section est également séparée en deux parties pour chacun des deux types de mesures.

### 4.5.1 Profils

Les null-arrays ont généralement montré leur abilité à localiser des structures. Dans tous les cas, les positions des structures ont été déduites des mesures avec les null-arrays.

#### *Structures de faille(s)*

Tous les null-arrays sont capables de localiser une faille. Même si le MAN semble moins approprié pour la localisation de structures verticales, puisque la position est donnée par un point d'inflexion du signal mesuré et ne fournit donc pas de position précise. Le  $W\gamma_{na}$  et le  $S_{na}$  donnent des résultats avec une bonne précision.

Sur la structure à deux failles, aucune confusion en fonction de la taille du dispositif ne semble apparaître pour le  $S_{na}$ , mais il est le seul null-array testé ici.

La faille oblique donne des résultats peu différents de ceux de la faille verticale. L'idée était ainsi d'arriver à déterminer la pente de la faille. L'étude approfondie de cette structure n'a été effectuée qu'avec le MAN, puisqu'un décalage du côté de la faille semble apparaître lorsque les dispositifs sont de plus en plus grands. Bien que les résultats n'étaient pas impressionnants et que le lien entre ces simulations et la pente reste encore à déterminer, le décalage du signal en fonction de la taille du dispositif semble s'aligner sur une droite qui pourrait être reliée à la pente de la droite. Mais cela reste encore à clarifier et à déterminer dans des études futures.

#### *Structure à deux zones*

Tous les null-arrays fournissent une information pour la structure à deux zones. Le MAN a une valeur proche de zéro sur le côté conducteur et un pic localisé sur le côté résistif à une distance approximative d'une demi longueur du dispositif de la zone de transition. Le  $W\gamma_{na}$  donne un pic positif et un négatif sur le côté résistif de la structure, mais la localisation précise ne semble pas possible. Le  $S_{na}$  ne donne qu'un seul pic, qui est lui aussi décalé sur le côté résistif de la structure. Bien qu'une estimation grossière de la position de la zone de transition semble possible, aucun résultat précis ne peut être déduit avec ces null-arrays sur cette structure.

### *Structures de cavité(s)*

Avec des signaux très semblables à ceux obtenus sur une faille, les null-arrays sont tous capables de localiser la grotte. Malheureusement, la détermination de sa dimension ne semble pas être possible avec les dispositifs, modèles et tailles testés. Il serait peut-être possible avec des null-arrays plus petits, mais des études supplémentaires devraient être menées pour vérifier cette hypothèse, le risque étant que la grotte ne soit plus détectable pour des configurations trop petites. Pour les mêmes raisons que dans le cas de la faille, le MAN est le moins approprié pour cette structure, alors que les deux autres null-arrays donnent des résultats précis.

La structure de cavités, qui se trouve être la seule structure non-bidimensionnelle (avec la structure de failles en X, peu étudiée), donne des résultats une fois de plus similaire à la structure de grotte. Le MAN semble toujours être le moins approprié, toujours pour les mêmes raisons. Le  $W\gamma$ na donne les meilleurs résultats, les cavités étant localisées par la position des pics. Le comportement du Sna donne, pour des raisons de symétrie du dispositif, une valeur nulle lorsqu'il se trouve exactement au-dessus de la cavité. La localisation doit alors se faire par ce zéro, localisé entre deux pics théoriquement symétriques. Pour tous les null-arrays, il n'est par contre pas possible de détecter les deux dernières cavités, plus profondes. Ce profil donne donc une idée de la profondeur d'investigation de ces méthodes, puisqu'à partir d'une profondeur de  $P = 0.6 LD$  plus aucun signal n'est visible (et peut-être même déjà avant).

### *Structure en horst*

La structure en horst donne des résultats compliqués à interpréter pour le MAN et la localisation des marches ne semblent pas être possible. Le  $W\gamma$ na ne permet "que" la détection des structures superficielles, puisque le dispositif  $LD = 14 m$  ne détecte pas la marche la plus profonde. Un décalage des pics se produit pour le grand dispositif ( $LD = 28 m$ ). Ainsi, ce null-array est limité entre une faible sensibilité en profondeur et un décalage de la position pour des dispositifs trop grands. Le Sna donne les meilleurs résultats sur cette structure, puisqu'il est capable de détecter toutes les marches avec précision.

### *En général*

A partir de ces simulations, il apparaît déjà clairement que le  $W\gamma$ na donne les meilleurs résultats pour la localisation de ces structures dans presque tous les cas. Le Sna donne également de bons résultats alors que le MAN ne semble pas le plus approprié pour ce genre de mesures, ayant un signal difficile à interpréter.

### Valeurs absolues dans les mesures de terrain

Sur le terrain, l'appareillage utilisé ne mesure que la valeur absolue du signal. Ainsi, la forme des signaux change par rapport à ceux simulés. Ceci est surtout vrai pour le MAN et va donc influencer l'interprétation des données. En effet, dans le cas du MAN, le point d'inflexion devient un minimum proche de zéro situé entre deux pics théoriquement symétriques lorsque les mesures ne donnent qu'une valeur absolue, comme illustré dans la Fig. 4.27.

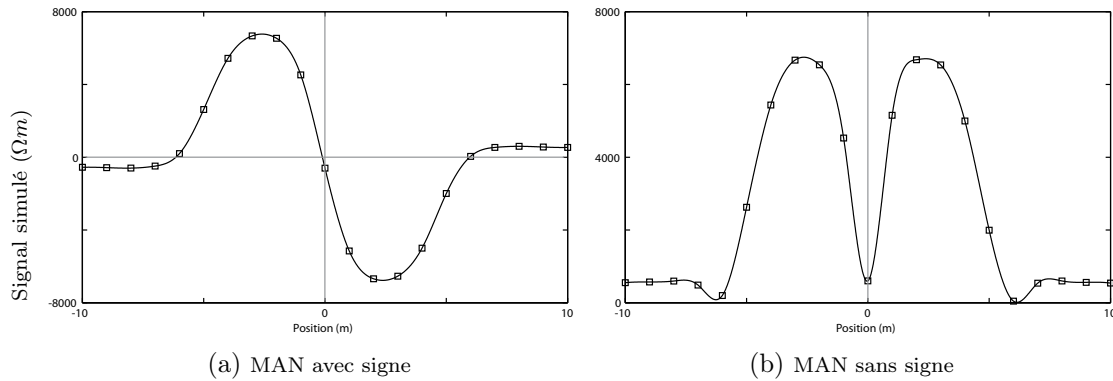


FIGURE 4.27 – Exemple de la différence entre un profil effectué a) avec le signe et b) en valeur absolue. Exemple illustré d'un même set de données : un MAN sur une faille.

### Identification de la structure en situation de terrain

La table 4.3 montre, pour chaque structure synthétique, si la structure considérée est détectée par un maximum ou un minimum (puisque le MAN ne détecte plus de structure par point d'inflexion en valeur absolue).

TABLE 4.3 – Identification de différentes structures avec les null-arrays. La structure à deux zones n'est ici pas considérée, à cause de la non-symétrie de son signal sur les profils.

Structure	MAN	$W\gamma NA$	SNA
Faille	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Max</i>
Cavités	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Min</i>
Grotte	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Max</i>
Horst	<i>Max</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>

La faille et la grotte ont exactement la même combinaison de "maximum" et "minimum", puisque les deux structures sont très semblables. La structure en horst a une combinaison unique de "maximum" et "minimum", tout comme la structure de cavités.

Ainsi, ces combinaisons uniques permettraient d'identifier les différentes structures seulement par profils avec des null-arrays. En situation de terrain, il serait malgré tout très risqué d'interpréter sur cette base les signaux de la sorte. En effet, la liste des structures étudiées dans

l'étude synthétique n'étant pas exhaustive, une telle interprétation pourrait alors mener à une erreur.

### Amplitudes des signaux

Comparer quantitativement les signaux entre eux pourrait être utilisé comme moyen d'interprétation ou d'identification des structures. En effet, en fonction de la nature des perturbations, donc des structures, les effets sur les différents null-arrays ne seront pas identiques. Bien qu'une comparaison entre les structures soient difficilement réalisable, du fait que chacune d'elle a été définie une fois pour toute par plusieurs paramètres (largeur, profondeur, épaisseur, résistivité, ...), il est malgré tout possible de regarder et comparer le comportement des différents null-arrays sur une même structure.

Ainsi, en terme d'amplitudes des pics, deux cas différents sont observés : le cas où un seul pic est observé qui sera alors donné par une valeur positive (par exemple :  $6000 \Omega m$ ) et le cas où deux pics opposés sont observés qui sera alors par une valeur positive-négative (par exemple :  $\pm 6000 \Omega m$  lorsque le signal va de  $-6000$  à  $6000 \Omega m$ ).

Dans le cas de la faille résistive, on observe par exemple que le MAN produit des pics de  $\pm 6000 \Omega m$ , alors que les  $S_{na}$  et  $W\gamma_{na}$  ont eu des pics d'environ  $4000 \Omega m$ . Lorsque la faille est conductive, le MAN a alors des pics de  $\pm 8000 \Omega m$ , le  $S_{na}$  de  $2500 \Omega m$  et le  $W\gamma_{na}$  de  $\pm 4000 \Omega m$ . Bien sûr ces valeurs n'apprennent rien pour un cas pratique, les valeurs en elles-mêmes ou les rapports entre elles pouvant changer dans un cas de terrain en fonction de la géométrie, de l'irrégularité, du bruit, etc. Par contre, il est intéressant de noter que le  $S_{na}$  et le  $W\gamma_{na}$  ont une valeur plus ou moins identique dans le cas résistif, et que ce n'est plus le cas dans le conducteur. Si la mesure avec le signe est effectuée sur le terrain, il faut même noter que le  $W\gamma_{na}$  a un pic positif et un négatif dans le cas conducteur, ce qui pourrait être un important indice pour différencier une faille résistive d'une faille conductrice.

Pour la structure à deux zones, les amplitudes n'apportent pas grande information, d'autant plus que le contraste choisi ici est totalement arbitraire et un changement de ce contraste changerait ces valeurs. Le MAN produit ainsi un pic de  $900 \Omega m$ , le  $S_{na}$  de  $200 \Omega m$  et le  $W\gamma_{na}$  de  $\pm 300 \Omega m$ . On retrouve ainsi des valeurs relatives entre elles proches du cas de la faille conductive, si ce n'est que le MAN n'a pas de pic négatif.

Dans le cas de la grotte, des valeurs proches du cas de la faille résistive sont obtenus, avec le MAN à  $\pm 2000 \Omega m$ , le  $S_{na}$  à  $1500 \Omega m$  et le  $W\gamma_{na}$  à  $\pm 1000 \Omega m$ , la différence est ici que l'amplitude (en valeur absolue) du  $W\gamma_{na}$  est supérieure à celle du  $S_{na}$ .

Pour la structure en horst, seuls les signaux en lien avec la structure la plus superficielle, donc à  $3 m$  de profondeur, ont été pris en compte. Dans ce cas, la MAN a un signal à  $\pm 200 \Omega m$ , le  $S_{na}$  à  $\pm 15 \Omega m$  et le  $W\gamma_{na}$  à  $\pm 25 m \Omega m$ . Il s'agit du seul cas où le  $S_{na}$  a des pics positifs et négatifs, pour des raisons évidentes d'asymétrie de la structure.

La dernière structure discutée ici est celle composée de cavités. Dans ce cas, seule la plus

grande cavité, qui est aussi la plus superficielle, a été considérée. Le MAN a obtenu des pics de  $\pm 10 \Omega m$ , le Sna de  $7.5 \Omega m$  et le  $W\gamma na$  de  $35 \Omega m$ . Il s'agit ici du seul cas où l'amplitude du MAN n'est pas la plus grande.

Cette discussion montre qu'il semble très difficile de pouvoir tirer une quelconque information de ces comparaisons quantitatives, à l'exception peut-être du cas où une faille est attendue comme structure, où il serait alors possible de différencier une faille résistive d'une faille conductrice. Globalement, les signaux du Sna et du  $W\gamma na$  sont toujours plus ou moins du même ordre de grandeur, alors que ceux du MAN sont toujours quelques fois (2 à 10) plus élevés.

Une information utile se trouve dans le signe du signal, par le fait d'avoir un seul pic ou une combinaison d'un pic positif et d'un pic négatif. Dans ce sens, le tableau 4.4 résume ces structures et ces null-arrays avec un simple "+" lorsque le signal généré est théoriquement un simple pic et un " $\pm$ " lorsqu'il s'agit d'une combinaison d'un pic positif et d'un pic négatif. Il faut alors noter que la faille résistive se comporte comme les cavités, que la faille conductive se comporte comme la grotte, et que les autres structures ont un comportement unique.

TABLE 4.4 – Tableau résumant qualitativement les amplitudes des signaux sur les différentes structures : + signifie que seul un pic positif est généré par la structure alors  $\pm$  signifie que deux pics, un positif et un négatif, sont générés par la structure. Le symbole  $\rho$  signifie ici "résistive", et  $\sigma$  "conductive".

	Faille $\rho$	Faille $\sigma$	2 zones	Grotte	Horst	Cavités
MAN	$\pm$	$\pm$	+	$\pm$	$\pm$	$\pm$
Sna	+	+	+	+	$\pm$	+
$W\gamma na$	+	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	+

#### 4.5.2 Mesures azimutales

Les null-arrays ont également montré leur aptitude pour la détermination de l'orientation d'une structure. Avec toutes les structures bidimensionnelles étudiées, l'orientation peut être déduite des mesures azimutales avec les null-arrays.

##### *Structure de faille(s)*

Sur la faille conductive et sur la faille résistive, les mesures azimutales avec les null-arrays ont donné des résultats très similaires, même si les amplitudes sont relativement différentes entre les deux cas. Le MAN est le seul null-array qui n'est pas sensible à la position de la mesure, puisque aucun paradoxe anisotropique ne se produit dans ce cas à cause de la position. Le  $W\gamma na$  donne des résultats plus difficiles à interpréter, sa sensibilité à la position par rapport

à la faille étant élevée. Il paraît ainsi délicat de l'utiliser en situation de terrain pour des mesures azimutales. Le Sna donne des résultats avec une bonne précision, mais fournit toujours deux directions perpendiculaires. Il est alors nécessaire de comparer ces mesures avec d'autres mesures ou observations afin de choisir entre les deux possibilités. Le paradoxe anisotropique se produit presque à la même position, pour une faille conductive ou résistive, mais produit malgré tout des résultats compliqués à interpréter pour le  $W\gamma na$ , pour l'ellipse circonscrite du Sna et pour le Sac.

Pour la structure à deux failles (parallèles), seul le Sna a été testé. À l'exception de la situation particulière où le dispositif a la même longueur que la distance entre les deux failles, ce null-array est toujours capable de déterminer la direction des failles, ou de leur perpendiculaire.

La structure de failles en X a été simulée seulement avec le MAN et le Sna. En effet, le  $W\gamma na$  n'ayant pas fourni de bons résultats jusque là et sa simulation en mesures azimutales nécessitant beaucoup de temps, il n'a pas été jugé utile de procéder à sa simulation ici. Ainsi, les simulations des deux null-arrays et du Sac ont été effectuées et n'ont pas permis d'identifier clairement une direction. Seules les bissectrices des deux failles semblent apparaître dans ce cas. L'étude de cette structure devrait alors être approfondie, en utilisant d'autres angles entre les failles, et en simulant des mesures à d'autres positions que sur les bissectrices des failles.

#### *Structure à deux zones*

Pour la structure à deux zones, le résultat est quasiment le même que dans le cas de la faille, puisque le MAN est toujours capable de déterminer l'orientation de l'interface quelle que soit la position de la mesure. Le  $W\gamma na$  est toujours très sensible à son positionnement et le Sna donne toujours la direction cherchée ou sa perpendiculaire. Ainsi, le  $W\gamma na$  reste difficile à appliquer en situation de terrain. Le paradoxe anisotropique se produit aussi dans le cas du Sac, mais aucune autre information ne peut en être déduite.

#### *Structure de grotte*

Pour la grotte, les résultats attendus devaient être proches de ceux obtenus sur la faille résistive, ce qui était bien le cas. Le MAN donne la bonne orientation quelle que soit sa position. Le  $W\gamma na$  ne donne pas de résultat précis et le choix de la direction recherchée n'est pas possible à cause du paradoxe anisotropique qui se produit. Le Sna donne des résultats précis, toujours avec deux directions perpendiculaires. Le paradoxe anisotropique apparaît aussi pour le Sac, qui ne donne pas d'autre information utile.

*En général*

Avec ces simulations, il apparaît clairement que le  $W\gamma$ na devrait être abandonné pour les mesures azimutales, lorsqu'il s'agit de déterminer l'orientation de la structure. Mais l'application combinée du Sna et du MAN donne alors de bons résultats, le premier apportant de la précision aux mesures et le deuxième confortant le choix de la bonne orientation.

Pour les mesures de terrain, il est encore à rappeler que le MAN sera en fait un mMAN à cause des erreurs de positionnement. Ainsi, l'interprétation des données de terrain devra se faire en considérant le cas du mMAN, qui a une ellipse tournée de  $90^\circ$ . La direction des structures sera alors donnée par le grand axe de l'ellipse du MAN.

### 4.5.3 Comportement du paradoxe anisotropique

Le problème de ce paradoxe est difficile à comprendre. Les simulations azimutales en fonction de la distance à la structure peuvent peut-être aider à comprendre un peu mieux le comportement de ces dispositifs et de déterminer quand ce paradoxe se produit.

Il faut d'abord noter les différences entre les cinq positions où des mesures azimutales ont été simulées. Aux distances de  $0LD$  et  $0.2LD$ , toutes les électrodes en mouvement vont traverser la position centrale de la structure, donc le centre de symétrie de la structure. La différence réside uniquement dans le fait d'avoir une symétrie entre la mesure et la structure ( $0LD$ ) ou non ( $0.2LD$ ). A une distance de  $0.4LD$ , seulement les électrodes "extérieures" vont encore traverser ce centre de symétrie de la structure ; donc les électrodes  $M$  et  $N$  pour le MAN, les électrodes  $A$  et  $B$  pour le Sna et les électrodes  $A$  et  $N$  pour le  $W\gamma$ na. La situation est alors ici déjà différente du premier cas. A partir de  $0.6LD$ , aucune électrode ne traverse plus la structure. A  $0.6LD$ , les électrodes passent malgré tout très proche, voire encore partiellement sur la structure, alors qu'à  $0.9LD$ , elles se trouvent déjà "loin" de la structure.

Le tableau 4.5 résume alors qualitativement le comportement des mesures azimutales avec les null-arrays en terme d'orientation : le symbole  $\cdot$  signifie qu'aucune direction préférentielle n'est donnée par la mesure azimutale, le symbole  $\infty$  signifie que le diagramme a un grand axe "horizontal" ou dans la direction Est, et le symbole  $\delta$  signifie que le diagramme a un grand axe "vertical" ou dans la direction Nord. Les structures sont toujours orientées au Nord : le symbole  $\delta$  est donc parallèle aux structures, alors que le symbole  $\infty$  est perpendiculaire.

A partir de ces comportements, il est alors possible de faire quelques observations générales. La première est que les positions  $0.6LD$  et  $0.9LD$  sont toujours identiques, à l'exception des cas où il n'est plus possible d'estimer une orientation à la position  $0.9LD$ , le signal étant trop faible. Cette première observation est logique : toutes les électrodes se trouvent du même côté de la structure ou de l'interface, le comportement n'a pas de raison de changer, si ce n'est en terme d'intensité.

Il faut noter que le Sac a son grand axe dans la même direction lorsqu'il se trouve exactement

TABLE 4.5 – Orientation des mesures azimuthales sur différentes structures en fonction de la position de la mesure.

Position	$0LD$	$0.2LD$	$0.4LD$	$0.6LD$	$0.9LD$
Faille conductrice					
MAN	.	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$W\gamma na$	$\infty$	8	$\infty$	$\infty$	$\infty$
Sna	.	8	$\infty$	8	.
Sac	$\infty$	$\infty$	8	8	8
Faille résistive					
MAN	.	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$W\gamma na$	$\infty$	8	$\infty$	$\infty$	$\infty$
Sna	8	$\infty$	8	8	.
Sac	$\infty$	$\infty$	8	$\infty$	$\infty$
Structure à deux zones					
MAN	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$W\gamma na$	$\infty$	8	$\infty$	$\infty$	$\infty$
Sna	.	8	$\infty$	8	8
Sac	$\infty$	$\infty$	8	8	.
Structure de grotte					
MAN	.	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
$W\gamma na$	$\infty$	8	$\infty$	$\infty$	$\infty$
Sna	8	8	$\infty$	$\infty$	.
Sac	8	8	$\infty$	$\infty$	$\infty$

sur une faille résistive ou sur une faille conductrice, ce qui n'est intuitivement pas logique.

Bien que difficile à prévoir sur le terrain, le  $W\gamma na$  se comporte de la même manière, pour les quatre structures présentées ici : le grand axe est perpendiculaire à la direction de la structure, sauf à  $0.2LD$ .

Le Sna et le Sac se comportent de la même manière sur une faille conductrice que sur la structure à deux zones (sauf à  $0.9LD$  quand il n'est plus possible de déterminer une orientation pour la structure à deux zones). De plus, le Sna et le Sac se comportent différemment sur une faille résistive et sur une faille conductrice.

Il est intéressant que tous les dispositifs à quatre électrodes (donc sauf le MAN) ont leur orientation qui tourne de  $90^\circ$  entre la position  $0.2LD$  et  $0.4LD$ , donc entre le cas où seules les électrodes extérieures traversent la structure.

Ce résumé de simulations permet ainsi de voir la complexité du paradoxe anisotropique et les problèmes qu'il pose pour les mesures de terrain. Même dans le cas classique, ce phénomène n'est que peu compris et est encore moins prédictible.

Bien qu'il soit possible de comprendre les causes physiques du changement d'orientation (une électrode qui traverse ou ne traverse plus la structure en question changera la situation), il de-

meure néanmoins impossible à appliquer sur le terrain, les structures n'étant jamais régulières comme dans ces cas synthétiques et la détermination de la position étant toujours sujette à des erreurs de mesures.

Dans le cas du MAN (ou du mMAN), la cause n'est plus la position du dispositif mais l'erreur de placement des électrodes. L'électrode  $B$  étant placée à l'infini permet toujours la même supposition pour les mesures de terrain : le sol est anisotrope entre les électrodes de courant. L'orientation change alors toujours entre un MAN théorique et un mMAN pratique. Pour les mesures de terrain, le terme mMAN sera abandonnée puisque le MAN n'est de toute façon pas applicable.

#### 4.5.4 Profondeur d'investigation

Une approche analytique a permis une estimation de la profondeur d'investigation des null-arrays. Ces profondeurs semblent de plus cohérentes avec les simulations numériques de la faille oblique.

Les résultats ont donné que le MAN possède clairement la moins bonne profondeur d'investigation et que le Sna paraît être le plus sensible latéralement. Ainsi, le  $W\gamma na$  semble être le dispositif le plus approprié pour la détection de structure locale, étant à la fois le dispositif ayant la plus grande profondeur de sensibilité (très proche de celle du Sna) et également la moins sensible à des perturbations latérales (très proche de celle du MAN).

## 4.6 Applicabilité des null-array en situations de terrain

De cette étude numérique, une sorte de "recette" peut être proposée sur "comment travailler avec les null-arrays sur le terrain", dans le but de déterminer, localiser et caractériser l'orientation de structures verticales :

- Tout d'abord, un profil avec le  $W\gamma na$  doit être effectué
- Ensuite, le même profil doit être effectué avec le Sna. Étant moins efficace, il est possible de n'effectuer que des morceaux choisis comme intéressants, d'après le premier profil effectué avec le  $W\gamma na$
- Des structures détectées par les profils, des mesures azimutales peuvent être effectuées avec le Sna et le MAN, le premier donnant précision aux résultats mais avec deux orientations alors que le deuxième déterminant la bonne direction à garder. Il paraît plus judicieux de se baser sur le profil Sna pour le choix des positions, pour assurer d'avoir un signal mesurable.

Si le but est d'identifier la nature de la structure, en se basant sur la table 4.3, la "recette" suivante pourrait être plus appropriée :

- Dans un premier temps, un profil avec le MAN doit être effectuée, étant très rapidement fait
- Ensuite, des profils avec le Sna et le  $W\gamma$ na doivent être effectués, aux endroits où le MAN a détectés des "structures" (surtout dans le cas d'un long profil, cela permet ne pas effectuer des mesures inutiles, c'est-à-dire sans signal).
- En fonction de la structure, si son orientation est intéressante à déterminer, des mesures azimutales peuvent être effectuées avec le Sna et le MAN, le premier donnant précision aux résultats mais avec deux orientations possibles et le deuxième déterminant la bonne direction à garder

Le choix des mesures azimutales est sujet à discussion. L'idéal serait d'effectuer une série de mesures azimutales en se positionnant exactement sur le structure, et d'effectuer une autre série en se positionnant à une distance égale, ou légèrement supérieure, à  $0.5 LD$  de la structure (en prenant comme référence le plus long dispositif utilisé). Il est ainsi plus aisé de confirmer les résultats, le paradoxe anisotropique se produisant apparemment entre 0 et  $0.5 LD$ .

De plus, toutes les simulations numériques azimutales effectuées avec le MAN ont donné que l'orientation à suivre était toujours le petit axe de l'ellipse. Mais il a été discuté que sur le terrain le MAN est en fait un mMAN, puisque les espacements entre les élecotrdes ne peuvent pas être rigoureusement les mêmes. Ainsi, sur un terrain anisotrope, le diagramme doit être interprété en prenant le grand axe de l'ellipse pour les mesures de terrain. Dans le prochain chapitre, le MAN sera toujours noté MAN, bien qu'il s'agit en réalité d'un mMAN.



# MESURES DE TERRAIN

---

Les null-arrays ont montré un grand potentiel pour la caractérisation de structures verticales ou subverticales dans le chapitre de modélisation numérique (chapitre 4). Le but est maintenant de les tester de la même manière sur le terrain, en se basant sur les simulations numériques des structures synthétiques.

Trois terrains tests ont dès lors été choisis :

- Les Breuleux (Jura, Suisse) : une carrière de calcaires, où des failles et des fractures peuvent être identifiées, relevées sur le mur de la carrière. Il est aussi possible d’observer une structure plissée du Jura sur cette carrière. Sur ce terrain, les structures de failles subverticales ainsi que la structure à deux zones se retrouvent.
- Vers chez le Brandt (Neuchâtel, Suisse) : un terrain calcaire karstifié, traversé par un réseau de failles et une grotte. Sur ce terrain, la structure de grotte se retrouve.
- Buix (Jura, Suisse) : une plaine alluviale composée de chenaux graveleux. Sur ce terrain, les chenaux peuvent être conceptualisés comme des grottes, avec un contraste électrique plus faible.

Avec ces trois terrains tests, toutes les structures simulées sont représentées, à l’exception de la structure en horst et de celle de cavités pour lesquelles il n’a pas été possible de trouver de terrain approprié.

Les trois dispositifs null-arrays ont été utilisés ici : le *midpoint null-array*, noté **MAN**, le *Schlumberger null-array*, noté **Sna** et le *Wenner- $\gamma$  null-array*, noté **W $\gamma$ na**. De plus, le *Schlumberger array classique*, noté **Sac**, des *tomographies électriques*, notées **ERT** (pour Electrical Resistivity Tomography) et des profils avec le *Very Low Frequency*, noté **VLF** ont aussi été appliqués dans certains cas.

## 5.1 Matériel

Toutes les mesures (ERT, profils classiques et null-arrays) ont été effectuées avec le SYSCAL Junior Swith72 (IRIS Instruments, Orléans), montré sur la Fig. 5.1. Pour les ERT, quatre câbles de 90 m avec 18 connecteurs chacun avec des électrodes en fer ont été utilisés alors que pour les profils des câbles en cuivre étaient reliés aux électrodes en cuivre via les connecteurs *A*, *B*, *M* et *N*.

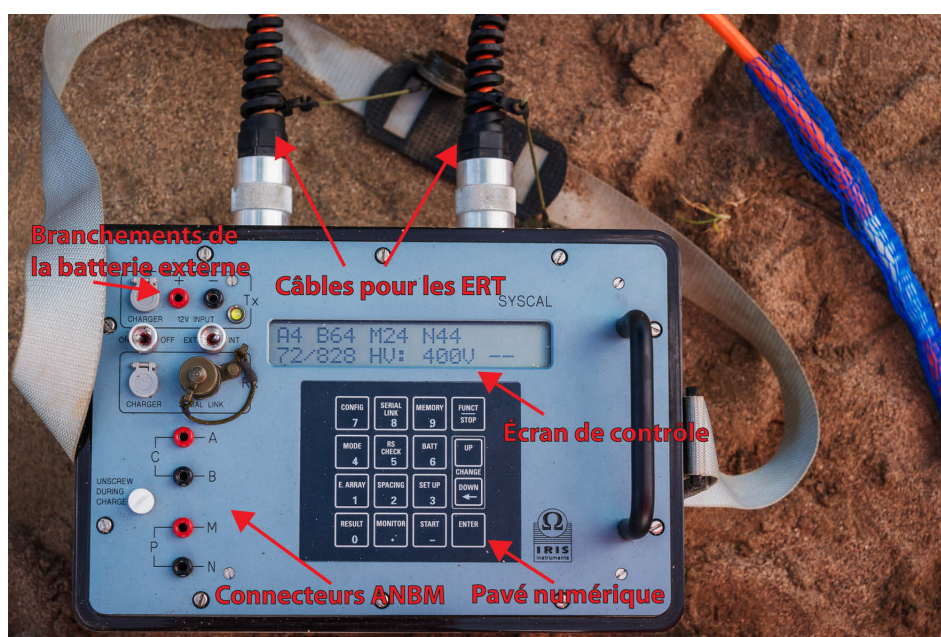


FIGURE 5.1 – Le boîtier SYSCAL et ses commandes.

Un des câbles utilisés pour les ERT, pesant environ 30 kg, est montré sur la Fig. 5.2a

La précision de la mesure du potentiel est d'approximativement 0.5% d'après le fabricant, tout comme la mesure de la résistivité. Le SYSCAL permet d'appliquer une tension maximum de 400 V et d'injecter un courant maximum de 1.25 A. Toutes les mesures de potentiels sont corrigées par une mesure du "self potential". L'acquisition se fait en 3 stacks ; c'est-à-dire qu'un signal positif/négatif de forme rectangulaire est appliqué 3 fois, afin d'éviter une polarisation du sol. Si les mesures ne sont pas sous une variance  $Q$  à définir (typiquement 2%), le nombre de stacks peut être augmenté, à 6 pour ces mesures. Le cycle de mesure est ici de 500 ms. Ces valeurs (cycle de mesure, variance, stacks) ont été définies d'après les conseils du fabricant. Pour les mesures "ABMN", donc pour les profils ou les mesures azimutales, le SYSCAL adapte automatiquement le potentiel et le courant à appliquer pour la mesure. Ainsi, le courant typique injecté lors d'une mesure null-arrays est d'environ 20 mA et le potentiel mesuré

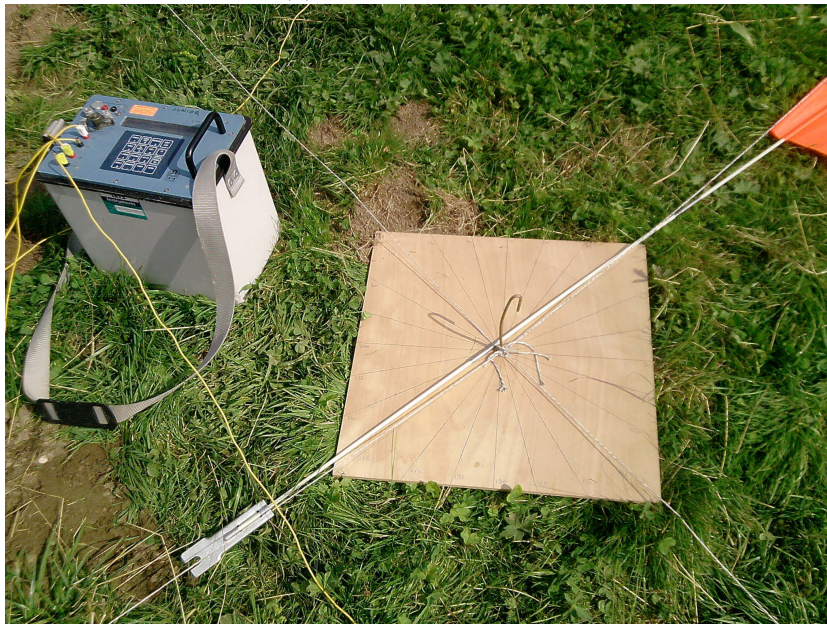
est typiquement autour des  $20\text{ mV}$ . Mais en fonction de la force du signal, les valeurs des courants injectés varient de  $3\text{ mA}$  à  $450\text{ mA}$ , les potentiels appliqués varient eux entre  $5\text{ V}$  lorsque le signal est bon et  $400\text{ V}$  lorsque le signal est faible, alors que les potentiels mesurés varient entre  $1\text{ mV}$  et  $150\text{ mV}$ .

Bien que les mesures azimutales pourraient se faire seul, deux personnes sont nécessaires pour effectuer ce genre de mesure, et une troisième personne ne serait pas inutile, même si elle n'est pas indispensable. En effet, entre les câbles à dérouler, la mesure à effectuer, les électrodes à planter et déplanter, et surtout les alignements des électrodes, deux personnes sont quasiment indispensables pour être efficient et obtenir une précision de mesure suffisante sur le terrain.

Pour les mesures azimutales, un rapporteur a été fabriqué sur une planche de bois de  $50\text{ cm}$  x  $50\text{ cm}$  avec des angles notés tous les  $15^\circ$ , comme montré sur la Fig. 5.2b. Cette planche permet d'effectuer les mesures avec une bonne efficacité et précision, l'erreur de mesure étant estimée à un maximum de  $\pm 1^\circ$ . Le drapeau orange permet de faire du repérage de position et de direction des distances élevées (plusieurs centaines de mètres), où un piquet standard devient en général invisible.



(a) Un câble pour les ERT.



(b) Mode azimutal

FIGURE 5.2 – a) Un câble pour les ERT et b) le SYSCAL en mode azimutal avec le rapporteur dessiné sur la planche de bois pour déterminer les orientations des mesures.

## 5.2 Les Breuleux - Structure fracturée

Dans cette section, le contexte géologique est dans un premier temps présenté, suivi par les méthodes géophysiques classiques appliquées, utilisées pour valider les mesures effectuées avec les null-arrays. Ensuite, les résultats des null-arrays en mode profil sont présentés, puis ceux effectués en mode azimutal. Une discussion sur l'application des null-arrays sur le terrain clôt cette section.

Ce paragraphe a été repris dans l'article "Fracture characterisation using geoelectric null-arrays", dans l'annexe D (Falco *et al.*, 2013).

### 5.2.1 Contexte géologique

La carrière des Breuleux (Jura, Suisse) a été choisie comme terrain test. Cette carrière montre un affleurement bien exposé des calcaires du Malm (Jurassique supérieur) dans un pli du Jura, comme montré sur la Fig. 5.3. La carrière est localisée dans un pli ayant une orientation d'environ  $N80^\circ$ . Les calcaires visibles dans la carrière sont traversés par plusieurs failles subverticales (voir l'Annexe C.2 pour une image "nue" de la carrière) et couverts par plusieurs mètres de sol dans le champ au sud de la carrière, là où les mesures ont été effectuées (Fig. 5.3). Huit familles de failles ont été géologiquement recensées sur le mur de la carrière.

La géométrie des structures géologiques dans la carrière est donc très proche d'une combinaison de deux des structures synthétiques simulées dans le chapitre de modélisation numérique (Fig. 4.1) : la structure de faille et la structure à deux zones. La carrière est considérée comme un demi-espace homogène, sans prendre en compte le fait qu'il y a une petite couverture de sol, traversée par plusieurs failles subverticales sous la surface. Ce terrain peut également être considéré comme une structure à deux zones dans la direction Nord-Sud : une zone résistive au Nord composée par les calcaires affleurants et visibles sur le mur de la carrière et une zone conductive au Sud où les calcaires sont recouverts par des matériaux plus fins et plus conducteurs.

Une campagne de terrain de 10 jours a été effectuée. Durant cette campagne, plusieurs méthodes géophysiques ont été utilisées : des profils électromagnétiques à l'aide du VLF "standard" noté ici VLF-EM<sup>1</sup> et d'une variante appelée le VLF-Grad<sup>1</sup> (Bosch, 2002), ainsi que des profils géoélectriques classiques, des observations et mesures géologiques, des profils avec les null-arrays et des mesures azimutales. Le but de cette campagne multi méthodes était de comparer les résultats des null-arrays avec des mesures de géophysiques classiques, avec comme but, en plus de tester les null-arrays, de les évaluer par rapport aux méthodes pré-existantes. Sur la Fig. 5.3, la ligne noire montre le profil principal  $P1$  de 70 m de long qui a donc été étu-

---

1. Voir l'annexe A pour plus d'information sur la méthode.

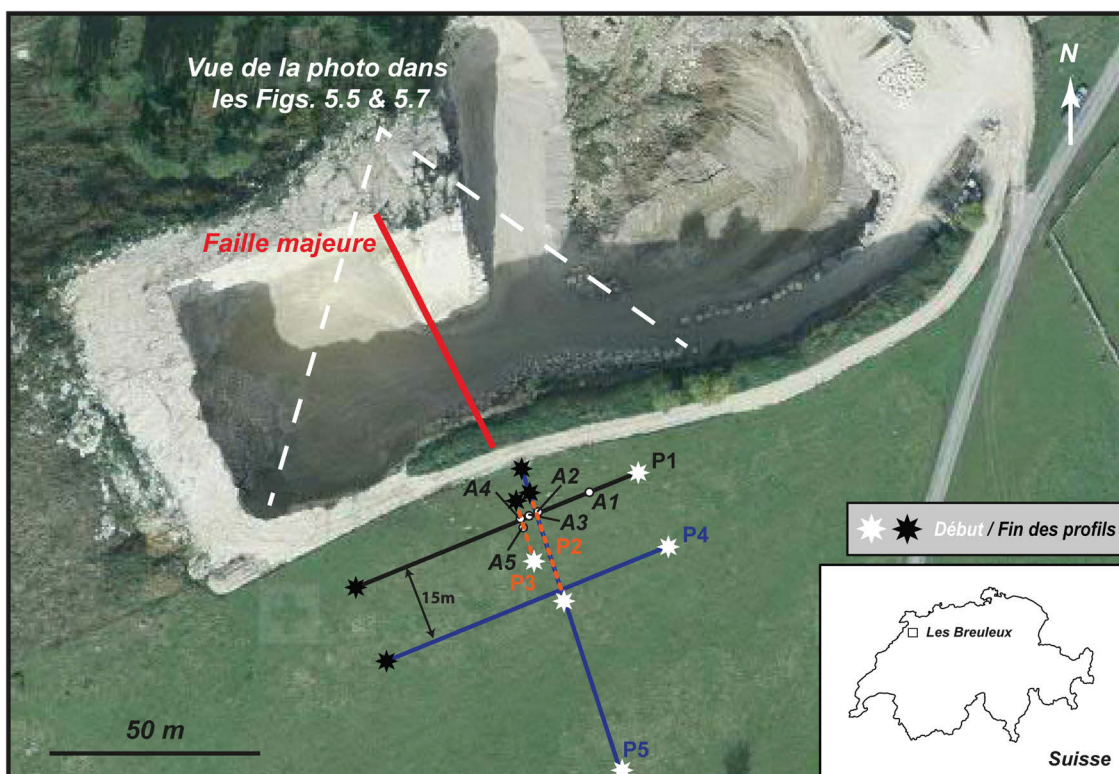


FIGURE 5.3 – La carrière des Breuleux situé dans les montagnes du Jura, Nord-Ouest de la Suisse. La ligne noire montre le profil principal  $P1$  de  $70\text{ m}$  de long, le  $0\text{ m}$  étant situé à l'Est du profil. Les lignes oranges montrent deux profils perpendiculaires  $P2$  et  $P3$ , le  $0\text{ m}$  étant situé au Sud du profil. Les lignes bleues montrent les profils  $P4$  et  $P5$ , le  $0\text{ m}$  étant situé à l'Est pour le profil  $P4$  et au Sud pour  $P5$ . La ligne rouge montre une faille majeure située à environ  $30\text{ m}$  sur  $P1$ . Les lignes blanches hachurées montrent la vue de la carrière sur les Figs. 5.5 et 5.7. Source : Office fédéral de topographie

dié avec toutes les méthodes géophysiques utilisées ici : le VLF-EM, le VLF-Grad, des ERT, des profils géoélectriques classiques, des profils géoélectriques avec les null-arrays profils et des mesures azimutales avec les null-arrays. Les deux profils perpendiculaires à  $P1$ , ( $P2$  et  $P3$  en orange sur la figure) ont seulement été étudiés par des profils de null-arrays, pour voir l'effet éventuel du plissement. Le profil  $P4$ , parallèle à  $P1$ , mais  $15\text{ m}$  au Sud, a seulement été étudié par des ERT, tout comme le profil  $P5$  qui recouvre le profil  $P2$ . Ces derniers ont été faits pour confirmer l'effet de changement géométrique des couches liées au plissement. La position des profils  $P2$  et  $P3$  a été déterminée par rapport au profil  $P1$  :  $P2$  est supposé être à proximité de la faille majeure à environ  $30\text{ m}$  sur le profil  $P1$  (ligne rouge sur la Fig. 5.3) et  $P3$  est supposé être exactement sur cette faille.

Les positions des mesures azimutales sont dénotées par  $A1$  à  $A5$ . La première mesure azimutale  $A1$ , au mètre  $12$  sur le profil  $P1$ , est censé être exactement entre deux failles, à  $\sim 5\text{ m}$  et  $\sim 15\text{ m}$

sur les Figs. 5.5 et 5.7). La mesure  $A2$  au mètre 26 et la mesure  $A4$  au mètre 30 ont été choisies pour les mêmes raisons que les profils  $P2$  et  $P3$ . La mesure  $A3$  au mètre 28 et la mesure  $A5$  au mètre 30, mais  $2m$  au Sud sur le profil  $P3$ , ont été faites pour tester la sensibilité à une erreur de positionnement des mesures. La position "zéro" des profils  $P1$  et  $P4$  est du côté Est du profil, et du côté Sud pour les profils  $P2$ ,  $P3$  et  $P5$ . Ces éléments sont récapitulés dans le tableau 5.1.

TABLE 5.1 – Positions des mesures azimutales sur  $P1$  et des profils perpendiculaires au profil principal  $P1$  aux Breuleux.

Mesure	Position	Remarque
$A1$	12 m	entre deux failles
$A2$	26 m	à proximité de la faille majeure
$A3$	28 m	erreur de position par rapport à $A4$
$A4$	30 m	sur la faille majeure
$A5$	30 m 2 m au Sud	erreur de position par rapport à $A4$
Profil	Position	Remarque
$P2$	28 m	à proximité de la faille majeure
$P3$	30 m	sur la faille majeure
$P5$	30 m	sur la faille majeure

## 5.2.2 Méthodes géophysiques classiques

Comme le profil  $P1$  est le profil principal et le plus intéressant, ce paragraphe est séparé en deux parties : une qui présente les résultats des mesures géophysiques classiques sur le profil  $P1$  et une autre qui présente les résultats des mesures géophysiques classiques sur les autres profils.

### 5.2.2.1 Méthodes géophysiques classiques sur le profil $P1$

Les Figs. 5.4a et 5.4b montrent les profils géoélectriques effectués avec le Sac, une fois avec le dispositif (donc l'axe  $AB$ ) parallèle à la direction du profil (a), et une fois perpendiculaire (b). Chacun des profils ont été effectués avec deux longueurs de dispositif ( $LD = 10m$  et  $LD = 20m$ ). Les anomalies sont identifiées avec comme critère d'identification le fait de trouver un minimum pour les deux longueurs de dispositif, ce qui assure de ne pas interpréter une erreur de mesure ou une petite anomalie locale, mais bien des structures subverticales. Ces anomalies sont alors représentées par des étoiles noires pour les anomalies détectées avec le grand dispositif, des étoiles blanches pour celles détectées par le petit dispositif, et des étoiles rouges correspondant à la faille majeure. Ainsi, le profil effectué avec le dispositif parallèle au profil a son orientation plus ou moins perpendiculaire aux failles. Un mélange de différentes

structures lors de la mesure est plus que probable et aucune information claire et nette ne peut être déduite de ce profil, à l'exception d'une structure à environ 30 mètres, correspondant toujours à la faille majeure. Pour le profil effectué avec le dispositif perpendiculaire à la direction du profil, donc avec le dispositif plus ou moins parallèle aux failles, les mesures seront mieux différenciées entre les différentes failles et plus d'information peut être déduit, puisqu'approximativement huit différentes failles sont relevées. Le but étant de localiser un minimum sur le signal, l'interprétation demeure malgré tout discutable.

La Fig. 5.4c montre le profil géoélectrique effectué avec en mode dipôle-dipôle, avec le dispositif parallèle à la direction du profil. Les profils ont été effectués avec les deux mêmes longueurs de dispositif ( $LD = 10\text{ m}$ ,  $a = 2\text{ m}$ ,  $n = 3$  et  $LD = 20\text{ m}$ ,  $a = 2\text{ m}$ ,  $n = 8$ ). Malgré le fait que ce dispositif est le plus approprié parmi les dispositifs classiques pour détecter des structures subverticales, aucune structure autre que la faille majeure à  $30\text{ m}$  n'apparaît clairement.

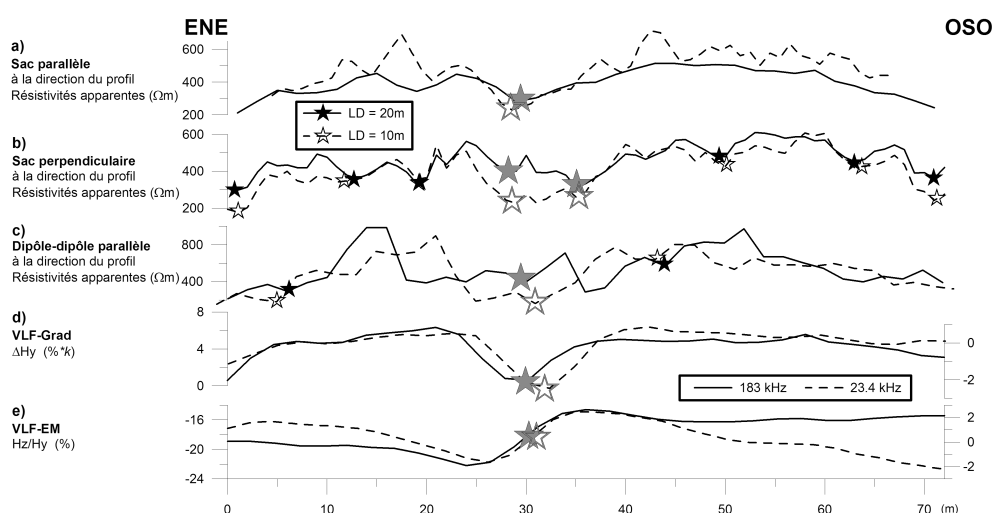


FIGURE 5.4 – Profils géophysiques classiques sur le profil  $P1$  au dessus du mur de la carrière des Breuleux : profil avec le Sac pour deux longueurs de dispositif avec ce dernier a) parallèle et b) perpendiculaire à la direction du profil, c) profil en mode dipôle-dipôle pour deux longueurs de dispositifs, parallèle à la direction du profil et des profils électromagnétiques avec le d) VLF-Grad et le e) VLF-EM pour deux fréquences différentes.

Les Figs. 5.4d et 5.4e montrent les profils VLF effectués le long du profil  $P1$  pour deux fréquences différentes,  $23.4\text{ kHz}$  et  $183\text{ kHz}$ , avec le VLF-Grad et le VLF-EM, respectivement. Le VLF-Grad donne des informations plus superficielles que le VLF-EM (Bosch, 2002). Les mesures VLF sont montrées dans les Figs. 5.4c et 5.4d. Pour interpréter les données VLF, le point d'inflexion d'un profil VLF-EM doit être identifié comme la position d'une structure

subverticale<sup>2</sup>. Pour le VLF-Grad, la position d'un pic donne la position d'une anomalie. Les deux VLF ne détectent ici que la structure principale à environ 30 m sur *P1*. Cette faille est alors la seule information que les méthodes VLF sont capables de donner, par le fait que le contraste résistif de cette structure est certainement beaucoup plus grande que les contrastes des autres failles plus petites.

Des ERT ont aussi été effectuées sur le profil *P1*, avec deux espacements différents entre les électrodes et avec deux configurations différentes : le Wenner et le dipôle-dipôle. Le but d'utiliser ces deux dispositifs était d'essayer d'obtenir des informations sur la "stratification" de la zone avec le Wenner, lequel est meilleur pour détecter des structures horizontales, et d'obtenir en parallèle des informations sur la fracturation de la zone avec le dipôle-dipôle, lequel est le meilleur dispositif géoélectrique classique pour détecter des structures verticales.

Les ERT du profil *P1* sont montrées sur le Fig. 5.5. La hauteur du mur de la carrière est environ 25 m et l'erreur de positionnement est estimée de 2 à 3 m entre les ERT et la photo. "*DD\_1m*" et "*DD\_2m*" montrent les ERT faites en dipôle-dipôle pour les espacements d'électrodes  $a = 1\text{ m}$  et  $a = 2\text{ m}$  respectivement. "*W\_1m*" et "*W\_2m*" montrent les ERT faites en Wenner pour un espacement d'électrodes  $a = 1\text{ m}$  et  $a = 2\text{ m}$ . L'ERT faite en Wenner avec un espacement d'électrodes présente une couche profonde, dès environ 10 – 15 m, plus résistive. Une grosse anomalie conductive apparaît à 30 mètres, correspondant aux anomalies (4) et (5) sur la photo, à une profondeur d'environ 2 à 10 m. Cette anomalie, observée par toutes les ERT, correspond toujours à cette faille majeure qui traverse la carrière plus ou moins dans l'axe Nord-Sud (lignes rouges sur les Figs. 5.3 et 5.5). D'autres structures subverticales peuvent être détectées avec les dipôle-dipôle ERT, comme les failles (1), (3) et (8). Les autres failles n'apparaissent pas et ne semblent dès lors pas détectable avec ces ERT.

---

2. Le signal est similaire à celui d'un MAN sur une faille, avec le signe

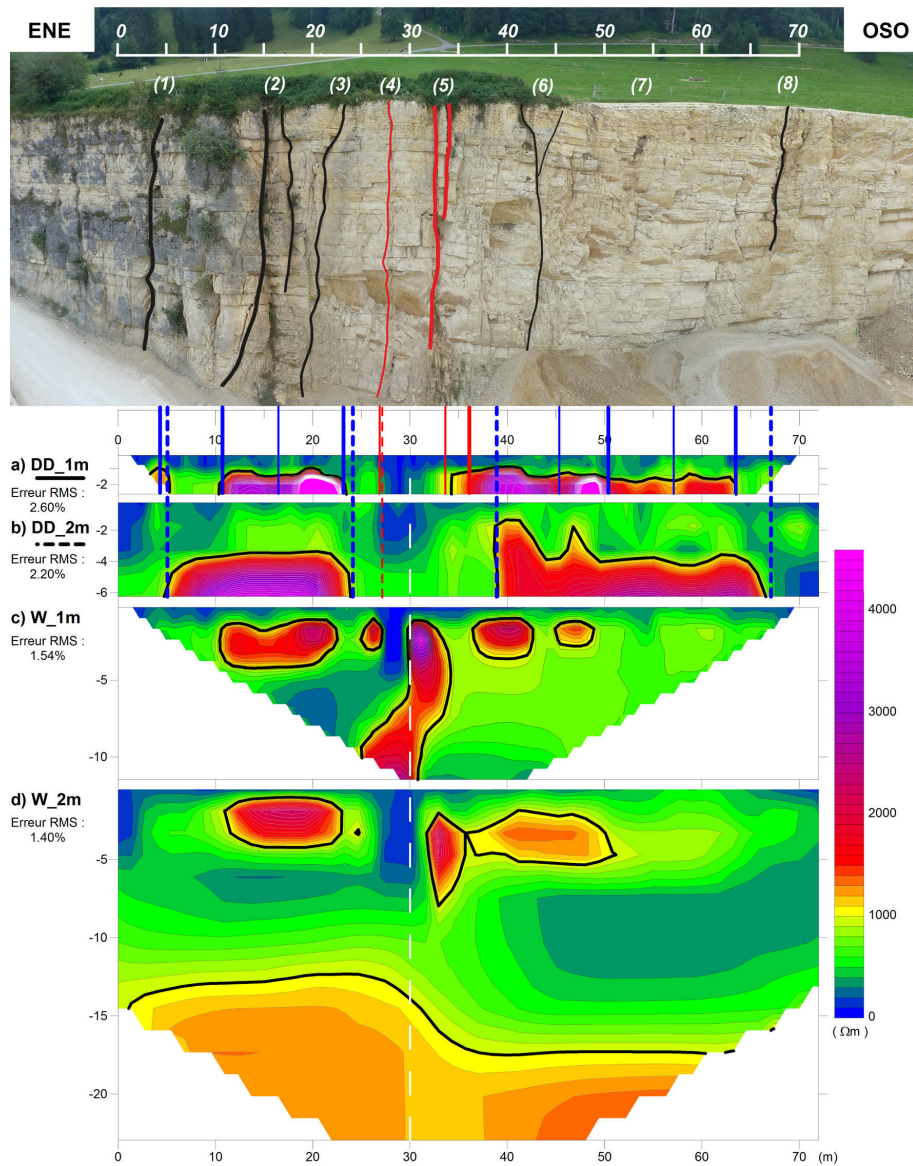


FIGURE 5.5 – Le mur de la carrière des Breuleux et les résultats des ERT effectuées avec le dipôle-dipôle avec un espacement d'électrodes a) de 1 m (DD\_1m), b) de 2 m (DD\_2m), et le Wenner avec un espacement d'électrodes c) de 1 m (W\_1m) et d) de 2 m (W\_2m). Le profil *P1* est situé à environ 15 m du mur de la carrière et plus ou moins parallèle à celle-ci. L'échelle de couleur donne les valeurs de résistivités vraies ( $\Omega m$ ) et l'isoligne noire donne la limite, arbitraire, des 1000  $\Omega m$ . Les lignes rouges représentent la faille principale à environ 30 m, les lignes bleues hachurées les zones de transition détectées par le dipôle-dipôle avec un espacement des électrodes de 2 m, et les lignes bleues pleines les zones de transitions détectées par le dipôle-dipôle et un espacement des électrodes de 1 m.

### 5.2.2.2 Méthodes géophysiques classiques sur les profils P4 et P5

Sur ces deux profils, seulement des ERT ont été effectuées. Le profil *P4* a été fait dans le but d'observer l'effet des plis du Jura sur l'épaisseur de sol et des calcaires karstifiés, et le profil *P5* dans le but de voir le pli en lui-même et son éventuelle pente.

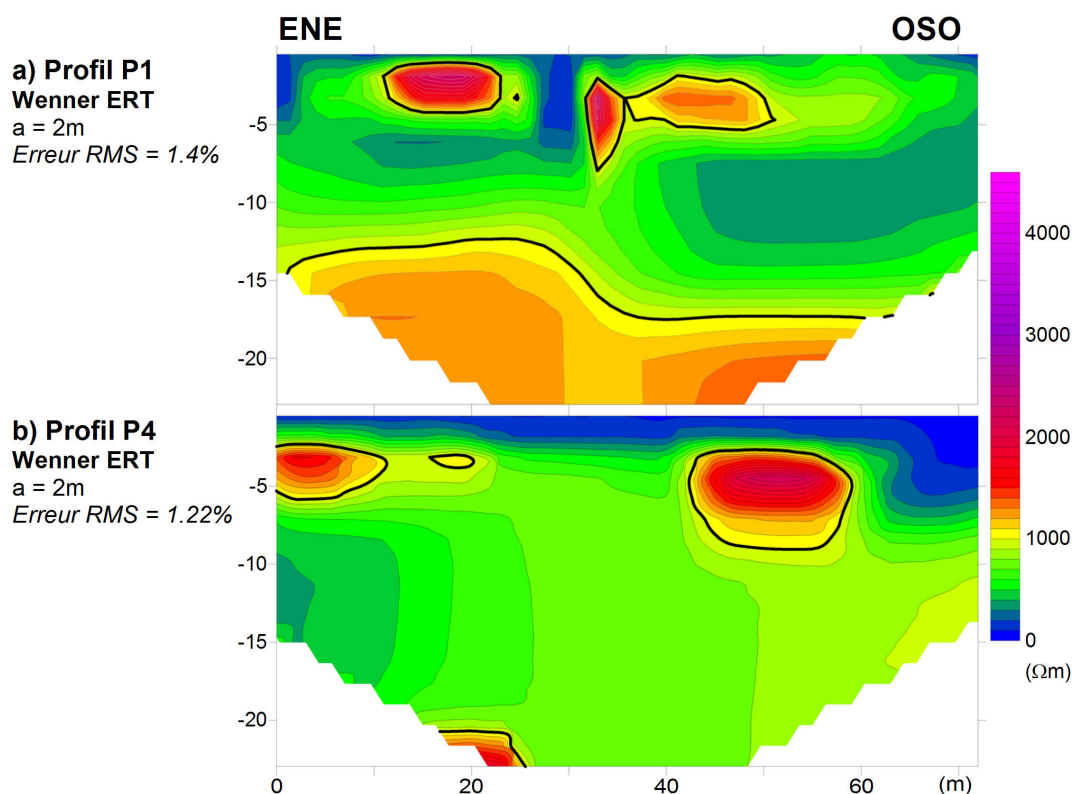


FIGURE 5.6 – Le profil principal (identique à la Fig. 5.5d) a) *P1* et le profil parallèle b) *P4* effectué à 15 m au Sud du premier profil *P1*. Les deux profils ont été effectués en mode Wenner avec un espacement entre les électrodes de 2 m. La ligne noire à environ 10-15 m de profondeur sur *P1* montre la limite entre le calcaire karstifié supérieur (et le sol) et les calcaires compacts plus profonds. Cette seconde couche ne se retrouve plus sur le profil *P4*.

La Fig. 5.6 montre les résultats de l'ERT sur le profil *P4*, qui est parallèle à *P1*, à une distance d'environ 15 m au Sud. La zone résistive, visible sur le profil *P1* au-dessous de 10 à 15 m de profondeur (sous la ligne noire sur la figure), n'est plus visible sur le profil *P4*. Le sol est également plus épais sur *P4* que sur *P1*, ce qui est normal puisque *P4* est situé dans le champ alors que *P1* est quasiment sur le sommet du mur. Ces différences pourraient s'expliquer par la forme des montagnes du Jura, qui sont plissées perpendiculaires à la direction de ces profils, comme il est possible de l'observer dans la carrière. Mais elles pourraient également être un effet du mur de la carrière, qui ne se trouve qu'à une petite vingtaine de mètres du profil *P1*

et à environ 35 m du profil *P4*.

Le profil *P5* a été effectué afin d'observer les plis du Jura, mais la mesure n'a donné aucun résultat, la profondeur de la structure (donc des calcaires compacts) étant trop élevée par rapport à la profondeur d'investigation atteinte par cette ERT. Les résultats sont visibles en Annexe C.1.

### 5.2.3 Profils avec les null-arrays

Comme pour la section 5.2.2, le profil *P1* est le profil principal et le plus étudié. Cette section est donc encore séparée en deux parties : les profils avec les null-arrays sur le profil *P1* et les profils avec les null-arrays sur les autres profils, *P2* et *P3* (ce dernier étant recouvert par le profil *P5*, mais plus court).

D'après les modélisations numériques, comme montré dans la Fig. 4.3, les null-arrays sont capables de détecter des failles. Ces simulations laissent penser que le signal mesuré n'est pas trop faible, comme il est commun de le croire pour l'application des null-arrays sur des mesures de terrain (Szalai *et al.*, 2004). En guise de rappel, pour le MAN, la faille se détermine par un minimum entre deux pics théoriquement symétriques (lorsque le signal est mesuré en valeur absolue), alors que pour le Sna et le  $W\gamma na$ , la localisation de la faille se détermine par la position du pic.

#### 5.2.3.1 Profil P1 avec les null-arrays

Les résultats des mesures de terrain pour les null-arrays sur le profil *P1* sont présentés dans la Fig. 5.7. Ces profils géoélectriques ont été effectués en déplaçant le dispositif avec un pas de un mètre, le dispositif ayant deux longueurs différentes : 10 m et 20 m. Le décalage d'orientation de l'axe *AB* du dispositif par rapport aux mesures et/ou aux structures étudiées, appelé "offset", est approximativement de 45°. Les Figs. 5.7a, 5.7b et 5.7c, montrent ces profils effectués avec les trois null-arrays, chaque fois pour deux longueurs de dispositifs : le MAN, le Sna et le  $W\gamma na$  respectivement. Les Figs. 5.7d et 5.7e montrent les profils effectués avec le Sac, la Fig. 5.7f montre le profil effectué en mode dipôle-dipôle et les Figs. 5.7g et 5.7h les profils effectués avec les VLF, présentés et discutés à la section 5.2.2.1. Les étoiles pleines montrent les positions où des anomalies ont été détectées avec une longueur de dispositif  $LD = 20$ , alors que les étoiles vides montrent les anomalies détectées avec une longueur de dispositif  $LD = 10$ . Les failles principales, (4) et (5), sont mises en évidence par la couleur rouge. Les ellipses et flèches montrent les différents groupes, ou différentes familles, de failles, c'est-à-dire celles détectées par un et/ou plusieurs null-array/s et qui sont relativement proches. Seules les anomalies détectées par les deux longueurs de dispositif ont été recensées, pour éviter d'interpréter des erreurs de mesure ou du bruit.

La Fig. 5.7a, montre le profil  $P1$  fait avec le MAN et révèle trois anomalies. La plus importante est détectée à  $28\text{ m}$  et est ainsi supposée appartenir à la structure majeure (4) et (5), qui peut être observée sur le mur. Les deux autres anomalies détectées semblent correspondre aux failles (6) et (7). Ainsi, le MAN n'a été capable de déterminer que trois des huit structures subverticales observées.

Dans la Fig. 5.7b, qui montre le profil  $P1$  effectué avec le Sna, cinq anomalies peuvent être clairement distinguées. L'amplitude pour la longueur de dispositif de  $10\text{ m}$  a été amplifiée d'un facteur 2, pour pouvoir les comparer graphiquement sur le même axe. Ici encore, l'anomalie principale détectée avec le plus fort signal se trouve à  $30\text{ m}$ . Quatre autres anomalies sont détectées, correspondant aux failles (1), (6), (7) et (8). Ainsi, le Sna est plus approprié que le MAN pour l'identification et la détection de failles.

La Fig. 5.7c montre le profil  $P1$  effectué avec le  $W\gamma na$ . Huit anomalies peuvent être identifiées ici, cinq d'entre elles étant plus marquées, ayant des pics hauts et fins. Deux de ces cinq sont attribuées aux failles (4) et (5), appartenant à la structure majeure (étoiles grises dans la Fig. 5.7c). Les trois autres structures correspondent aux structures géologiques (1), (2) et (3) observées sur le mur. Les trois anomalies moins marquées correspondent aux structures moins clairement identifiables (6), (7) et (8). Ainsi, toutes les failles observées ont été identifiées et détectées avec le  $W\gamma na$ . Le  $W\gamma na$  paraît donc le plus approprié pour la détection et localisation de structures subverticales, comme des failles ou des fractures, puisque des pics clairs et nets sont mesurés et qu'aucun signal n'est mesuré entre les structures. L'utilisation de ce dispositif seul avec une seule longueur pourrait donc être suffisante, même s'il est préférable de multiplier les mesures pour confirmer les résultats obtenus.

Les Figs. 5.7d-h correspondent aux profils montrés et discutés dans la Fig. 5.4.

En résumé, la zone de faille (1) est clairement détectable par deux des null-arrays et le dipôle-dipôle, alors que les zones (2) et (3) le sont seulement par le  $W\gamma na$ . La zone (3) est en plus détectée par le Sac. Les deux zones (4) et (5), caractérisées par un déplacement vertical, observables sur la photo, correspondent à la structure majeure située à environ  $30\text{ m}$  et sont détectées par toutes les méthodes, null-arrays ou géophysiques classiques. Les zones (6)-(8) sont identifiées par au moins deux des null-arrays, alors qu'aucune de ces structures ne sont clairement détectées par le Sac et seule la (6) l'est par le dipôle-dipôle. La zone (7) est hautement et finement fracturée sur une largeur d'environ  $15\text{ m}$  sur la partie supérieure des calcaires karstifiés (ellipse grise hachurée dans la Fig. 5.7).

Les mesures de terrain sur le profil  $P1$  ont donc déjà montré que les null-arrays ont un potentiel considérable dans la détection de la position de failles. Comme montré dans la Fig. 5.7, les profils avec les null-array profils sont bien plus sensibles aux structures de tailles différentes que les profils VLF qui ne détectent que la structure principale, les failles (4)-(5). Le  $W\gamma na$  semble être le plus sensible des trois null-arrays testés, et de toutes les méthodes appliquées ici.

Parmi les méthodes géophysiques classiques, le Sac, utilisé perpendiculairement à la direction du profil, et donc plus ou moins parallèlement aux failles, est clairement le plus sensible pour l'identification de ces structures, même si sa détection ne correspond pas aussi bien que les null-arrays aux structures observées. Le dipôle-dipôle ne donne pas de meilleur résultat que le Sac. Il aurait par contre fallu l'effectuer perpendiculairement à la direction du profil pour pouvoir pleinement juger de ce résultat.

D'après ces premières données, la taille du dispositif devrait, d'un côté, ne pas être trop long pour éviter la superposition de différentes structures et devrait d'un autre côté être suffisamment long pour atteindre une profondeur suffisante. Ainsi, idéalement, la longueur du dispositif devrait être similaire, ou légèrement supérieure, à la distance entre les structures. Sur le terrain, où ces distances sont généralement inconnues, il est alors recommandé d'effectuer le même profil avec deux, ou plus, longueurs différentes, afin d'assurer d'avoir un profil effectué à la longueur optimale. A l'échelle géologique du Jura, des longueurs de dispositifs minimales et maximales de 5 m et 40 m semblent raisonnables.

La profondeur d'investigation des null-arrays est difficile à déterminer. Comme aucune inversion des données n'est effectuée, une évaluation précise est de toute façon impossible. Il faut soit se baser sur l'approche analytique pour estimer cette profondeur (voir section 4.4), ou se référer aux différentes simulations numériques pour avoir une idée de la profondeur atteinte, comme par exemple la structure en horst ou la structure de cavités (voir sections 4.2.7 et 4.2.4).

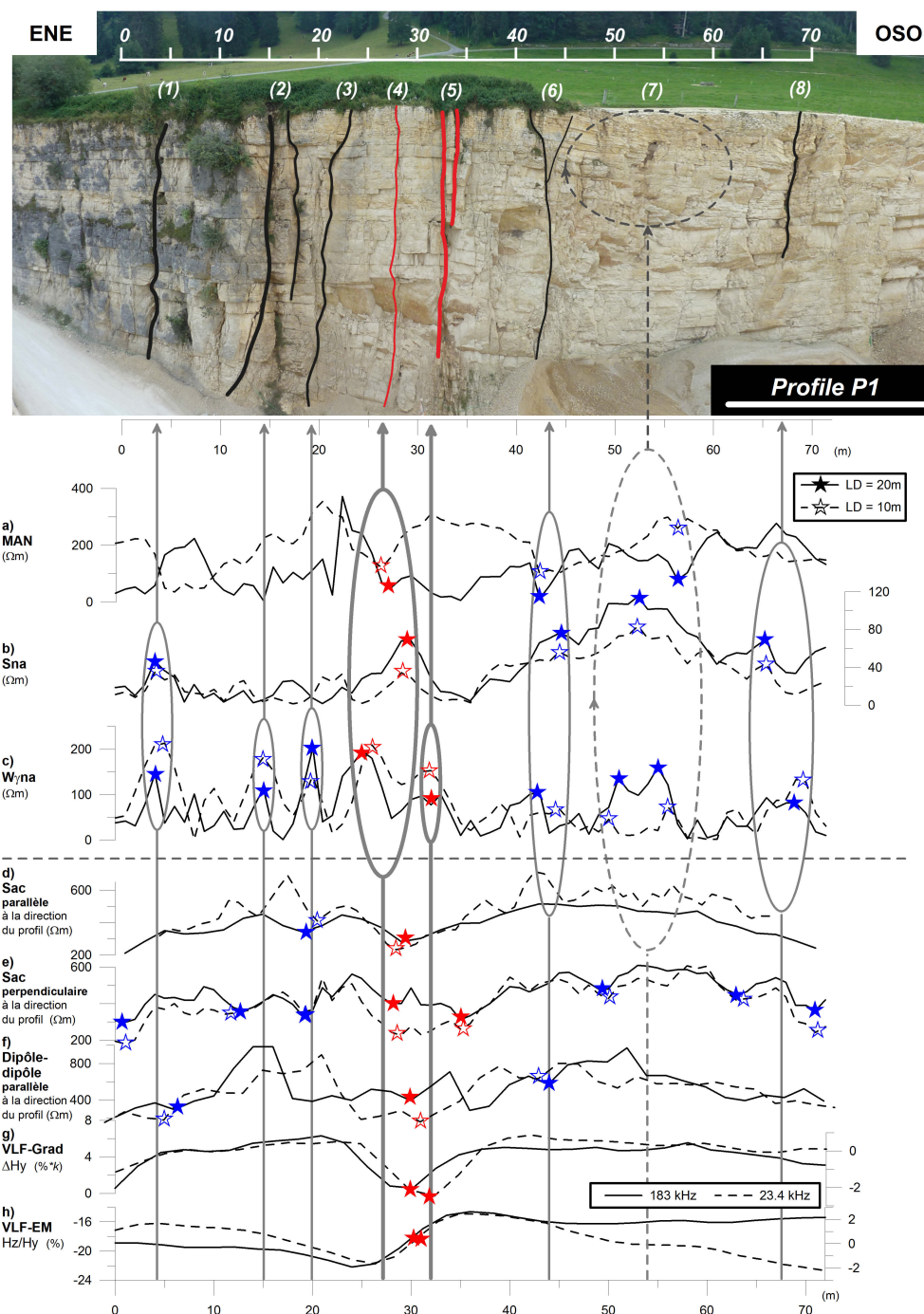


FIGURE 5.7 – Photo du mur de la carrière avec les failles observées (lignes noires) et les failles principales (lignes rouges). Les profils avec les null-arrays effectués avec des longueurs de dispositif de 10 m (lignes hachurées) et 20 m (lignes pleines) : a) MAN, b) Sna, c)  $W\gamma na$ ; d)-h) correspondent aux profils montrés dans la Fig. 5.4. Les étoiles montrent les anomalies détectées par la méthode correspondante. Les étoiles rouges mettent en évidence les signaux liés à la structure principale à environ 30 m (identifiée ici par les deux failles (4) et (5)), les étoiles bleues indiquent les autres structures détectées. Les ellipses grises regroupent les anomalies qui peuvent être reliées à des familles de failles observées par les flèches grises. L'ellipse hachurée correspond à la zone plus finement fracturée (7).

### 5.2.3.2 Profils P2 et P3 avec les null-arrays

La Fig. 5.8 montre les profils perpendiculaires  $P2$  et  $P3$  effectués avec les null-arrays. Ces profils ayant été fait avant l'interprétation des simulations numériques,  $P2$  a été fait uniquement avec le MAN (choix arbitraire), pour différentes longueurs de dispositif, croisant  $P1$  au mètre 26 (ligne noire sur la Fig. 5.8a) alors que  $P3$  a été fait avec le Sna (choix arbitraire) pour différentes longueurs de dispositif, croisant  $P1$  au mètre 30 (ligne noire sur la Fig. 5.8b). Pour les deux profils, le  $0m$  est du côté Sud du profil.

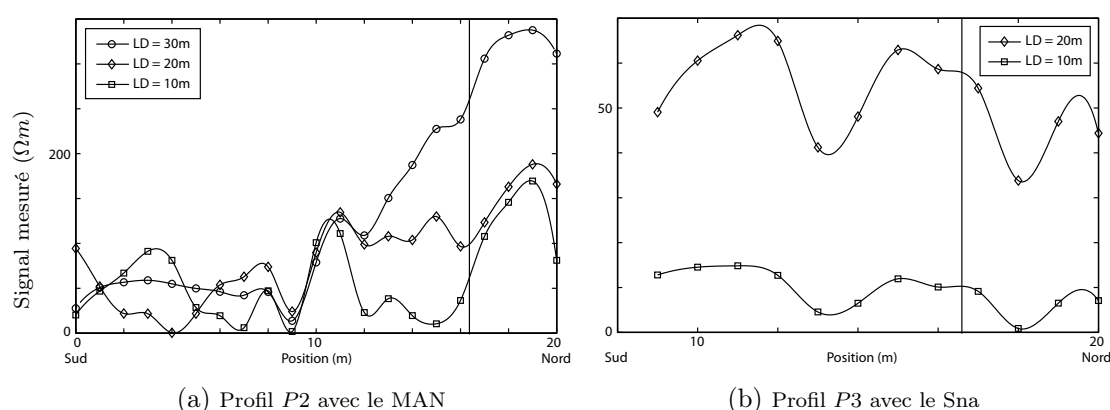


FIGURE 5.8 – Profils a)  $P2$  et b)  $P3$  effectués perpendiculairement au profil  $P1$ .  $P2$  a été fait avec le MAN pour différentes tailles de dispositif et croise  $P1$  au mètre 26 sur  $P1$ .  $P3$  a été effectué avec le Sna pour différentes tailles de dispositif et croise  $P1$  au mètre 30 sur  $P1$ . La ligne noire verticale montre la position de  $P1$  sur chacun des profils. Pour les deux profils, le  $0m$  est du côté Sud.

Ces deux profils étant séparés de seulement  $2m$ , un résultat proche pourrait alors être attendu.

Le profil  $P2$ , montré sur la Fig. 5.8a, a une allure similaire au profil simulé dans le cas de la structure à deux zones (Fig. 4.12a), le signal descendant presque à zéro au même endroit pour toutes les longueurs de dispositif et remontant considérablement plus ensuite. Le signal est globalement faible au début du profil (Sud), correspondant au côté conducteur côté champ du profil, puis grandit par la suite vers la fin du profil (Nord), correspondant au côté résistant côté carrière du profil. Cela correspond à ce qui était attendu, puisque l'épaisseur du sol dans le champ est plus grande, donc plus conducteur, que plus proche de la carrière, comme les ERT de la Fig. 5.6 pourrait le montrer (en supposant que cet effet n'est pas dû au mur de la carrière).

La seule différence majeure est que la position des pics qui suivent ne sont pas à une distance équivalente à une demi longueur de dispositif. Ce dernier point peut s'expliquer par la forme des plis du Jura. En effet, la couche calcaire résistive plonge en direction du Sud, et sera du

coup senti d'autant plus tôt que le dispositif est grand, avec le même raisonnement et principe que le cas de la faille oblique (section 4.2.2).

En supposant cette hypothèse comme vraie, il est alors possible d'estimer la position de la zone de transition entre ces deux zones, donc de la position où le pli calcaire plonge sous le champ. Cette position est approximativement à 9 m au Sud de la position du profil *P1*. Comme montré dans l'annexe C.2, le pli plonge très abruptement et peut donc être assimilé à une structure à deux zones. Ainsi, le profil *P1* semble avoir été effectué dans la zone résistive, donc sur les calcaires.

D'autres anomalies, plus faibles et moins nettes, apparaissent aux mètres 12 et 15-16, alors qu'une toute dernière commence à apparaître à la fin du profil. Cette dernière pourrait être l'effet du mur de la carrière en lui-même, qui est hautement résistif, et qui ne se trouve alors plus qu'à une quinzaine de mètres. Quant aux deux autres anomalies, elles peuvent simplement être provoquées par différentes couches et interfaces entre les couches des plis du Jura. Mais cette supposition ne peut pas être affirmée sur la base d'un seul signal.

Le profil *P3*, montré sur le Fig. 5.8b, est plus compliqué à interpréter. Aucun pic n'apparaît clairement, malgré la présence de deux minimas. Ce profil a été effectué avant le profil *P2* (dans le temps), et a été malheureusement commencé trop tôt, puisqu'il ne commence qu'au mètre 9 sur l'échelle de ces profils. La partie la plus intéressante est peut-être alors manquante. Des anomalies semblent malgré tout apparaître, avec un léger mais large pic localisé à environ 12 m. Un autre apparaît aussi légèrement autour des 15 m. Bien qu'il soit difficile d'en dire plus sur ce profil, ces deux positions correspondent relativement bien à celles obtenues sur le profil *P2*. Même si l'interprétation est discutable, une perturbation apparaît effectivement à ces positions. Un dernier pic, plus discret apparaît également à la fin du profil, peut être aussi dû à l'effet du mur de la carrière.

Ces deux profils peuvent donc mener à la conclusion qu'une zone de transition pourrait apparaître, avec un côté plus conducteur au Sud et plus résistant au Nord. La transition en elle-même ne semble pas se faire de manière nette mais en plusieurs pas, ce qui est le plus probable dans la réalité géologique. Ces déductions et cette interprétation sont cohérentes avec les observations et les connaissances géologiques. Mais ni les mesures null-arrays ni les ERT (à cause de l'effet possible de la carrière) ne permettent de confirmer l'hypothèse. La transition en plusieurs pas peut être interprétée comme une succession de couches composant le calcaire du Jura. Le côté résistant est facile à comprendre, en regardant la forme des plis sur le mur Ouest de la carrière (voir les photos dans l'Annexe C.2).

#### 5.2.4 Mesures azimutales avec les null-arrays

Quatorze mesures azimutales ont été effectuées à cinq emplacements différents sur le profil *P1*, avec le but d'être sur ou à côté d'une faille, ou encore d'être entre deux failles. Les

positions, nommées  $A1$ ,  $A2$ ,  $A3$ ,  $A4$  et  $A5$  sont montrées sur le Fig. 5.3. Les mesures sont effectuées de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ , tous les  $15^\circ$  et le diagramme polaire est ensuite complété jusqu'à  $360^\circ$  par symétrie des dispositifs.

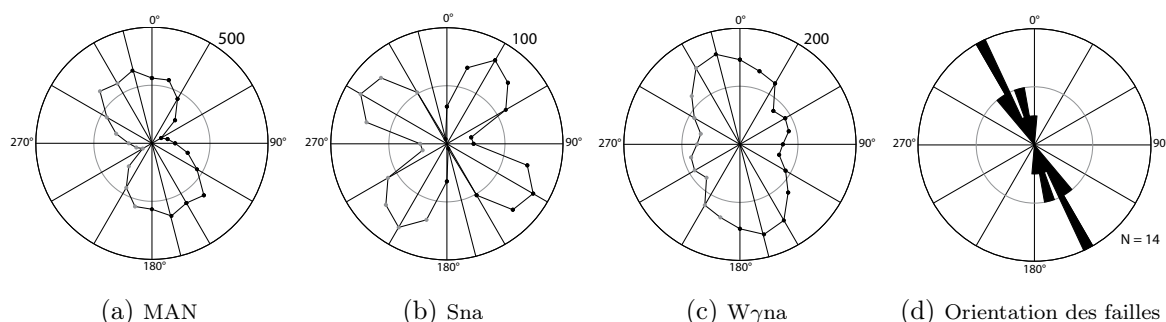


FIGURE 5.9 – Mesures azimutales à la position  $A4$  sur le profil  $P1$ , avec une longueur du dispositif  $LD = 10m$  avec a) le MAN, b) le Sna et c) le  $W\gamma na$ . d) L'orientation des failles observées sur le mur de la carrière.

Les mesures ont été effectuées avec quatre différentes longueurs de dispositif (2, 4, 10 et 20 m). Pour les deux plus courts, puisque les mesures donnent des orientations inhomogènes, instables et incohérentes, le signal généré par les failles est probablement perturbé par des hétérogénéités de subsurfaces. C'est pourquoi, seulement les deux plus longs dispositifs ont été interprétés et discutés pour la suite de l'étude.

La Fig. 5.9a-c montre les diagrammes azimutaux pour chaque null-array à la position  $A4$  et la Fig. 5.9d donne le diagramme de rose des orientations des failles, mesurées sur le mur de la carrière. La direction principale de fracturation est environ  $N155^\circ$  (mesures fournies par Dr François Negro).

La table 5.2 donne un résumé de tous les résultats des mesures azimutales effectuées aux Breuleux. Les mesures donnent toutes plus ou moins la même direction, une orientation comprise entre un  $N150^\circ$  et un  $N165^\circ$ , en accord avec les observations et mesures géologiques. Tous les résultats sont présentés dans l'annexe C.3.

Comme attendu d'après la modélisation, le Sna donne des résultats très précis, mais rien ne permet d'effectuer un choix entre les des deux directions perpendiculaires. Le Sna fournit alors la précision et devrait donc être utilisé en parallèle au MAN, qui lève l'ambiguïté.

Pour le  $W\gamma na$ , il n'est pas possible de savoir si le paradoxe anisotropique se produit ou non en fonction de la position du dispositif par rapport aux structures étudiées (section 4.3.2, Figs. 4.19 et 4.18). Comme pour le Sna, il est alors très difficile de déduire une quelconque information à partir de ces mesures, qui sont contrairement au Sna peu précises. La seule information

TABLE 5.2 – Résumé des orientations déterminées par les mesures azimutales avec les null-arrays au sommet du mur de la carrière des Breuleux, pour différentes longueurs de dispositif ( $LD$ ), différents dispositifs et différentes positions. Les positions sont reliées à l'échelle de distance du profil  $P1$ .

Nom & Position Dispositif		A1 12 m	A2 26 m	A3 28 m	A4 30 m	A5 30 m 2 m Sud
Sna, $LD = 2m$ Sna, $LD = 4m$		$\sim N125^\circ$ $\sim N110^\circ$	$\sim N170^\circ$ $N120^\circ - N135^\circ$			
MAN $W\gamma na$ Sna	$LD = 10m$	$N165^\circ - N150^\circ$	$N150^\circ$	$N150^\circ$	$N150^\circ$ $N165^\circ$ $N165^\circ$	$N165^\circ$
MAN $W\gamma na$ Sna	$LD = 20m$	$N135^\circ - N150^\circ$	$N165^\circ$	$N150^\circ$	$N150^\circ - N165^\circ$ $N165^\circ - N150^\circ$ $N165^\circ$	$N150^\circ - N165^\circ$

possible est que, paradoxe anisotropique ou pas, le grand axe de l'ellipse sera soit parallèle, soit perpendiculaire à la direction des structures. Ces mesures peuvent alors confirmer le résultat des deux autres dispositifs, sans aider à choisir la bonne direction.

Les observations de terrain peuvent aussi aider à décider dans le cas où un doute subsisterait.

Dans certains cas, les résultats des mesures azimutales sont un peu plus difficiles à interpréter, la forme des diagrammes ne ressemblant plus aux diagrammes simulées, comme illustré dans la Fig. 5.10. Ces formes inattendues peuvent être liées à une structure plus complexe que prévue, à des erreurs de mesures sur le terrain ou encore à des hétérogénéités de subsurface, générant un signal qui se mélange à celui généré par la structure. Mais même dans ces cas, une orientation peut être déterminée, en considérant l'allure générale du diagramme et en ne gardant que la tendance du signal mesuré. Par exemple, dans la Fig. 5.10a, il est facile d'imaginer qu'en supprimant la mesure à  $N60^\circ$  (et donc à  $N240^\circ$  aussi), ou en la mettant à zéro, le diagramme reprend simplement une forme et prédite par les simulations.

Comme illustré dans la Fig. 5.9d, la direction des failles observées dans la carrière est d'environ  $N155^\circ$ . Même si un doute persiste avec le Sna, le choix de la "bonne" orientation n'est plus un problème, du moment qu'il est possible d'y répondre avec de simples observations géologiques, en plus des mesures effectuées avec le MAN qui confortent là aussi le résultat.

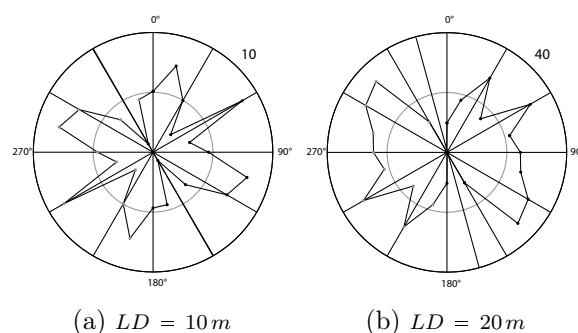


FIGURE 5.10 – Mesures azimutales à la position A2 aux Breuleux avec le Sna pour deux longueurs de dispositifs : a)  $LD = 10\text{ m}$  et b)  $LD = 20\text{ m}$

Tous les diagrammes montrent donc plus ou moins la même orientation, même si leurs formes ne sont pas toujours en parfait accord avec les simulations. Néanmoins, des orientations peuvent toujours être déterminées, étant en plus en accord avec les attentes et prédictions, et confortant le fait que ces mesures azimutales sont un outil très utile sur le terrain. L'usage combiné du MAN et du Sna est alors recommandé pour la détermination de l'orientation de failles.

### 5.2.5 Conclusion sur les mesures de terrain aux Breuleux

Les mesures de terrain ont montré que les null-arrays ont bien ce potentiel de détection de la position et de détermination de l'orientation de failles, puisque ces mesures correspondent la plupart du temps aux analyses numériques effectuées. De plus, le comportement simulé sur une structure à deux zones semble avoir été mesuré sur le terrain. L'identification d'une structure semblable a été confirmée par des méthodes géophysiques classiques et par les connaissances géologiques.

Comme montré sur la Fig. 5.7, les profils null-array sont bien plus sensibles aux structures que les profils VLF qui ne détectent que la structure majeure, les failles (4) – (5). Le  $W\gamma_{na}$  a montré être la plus sensible de toutes les méthodes pour la détection des failles, puisqu'il a été capable de localiser les huit familles de failles observées sur le mur de la carrière. Parmi les méthodes géophysiques classiques, seul le Sac perpendiculaire à la direction du profil, donc parallèle aux failles, a été capable de détecter plus de deux structures, mais la corrélation avec les structures observées est discutable et son interprétation serait alors très risquée sans autres études approfondies. Le dipôle-dipôle n'a bizarrement pas montré de meilleur résultat que le Sna. Les null-arrays sont donc des méthodes puissantes pour donner des données précises et complémentaires au set de données acquises par les méthodes géophysiques classiques.

En considérant les deux profils perpendiculaires ( $P2$  et  $P3$ ) et en supposant l'interprétation géologique comme correcte, les null-arrays ont aussi montré leur aptitude non seulement à localiser mais aussi à identifier des structures, puisqu'ils ont permis de mettre en avant le plissement et de l'interpréter conceptuellement en tant que structure à deux zones. La localisation

de l'interface entre la zone conductive (le champ) et la zone résistive (le mur) a alors été possible. Il est par contre important de relever que cette interprétation ne serait pas possible sans l'aide des mesures avec l'ERT et que cette interprétation est pleinement discutable.

Pour les mesures azimutales, l'orientation des structures a été possible par l'utilisation combiné du MAN et du Sna. Les résultats de terrain étaient en parfait accord avec les analyses numériques d'un côté, et avec les observations géologiques sur le mur de la carrière d'un autre côté. Le Sac, utilisé en mode azimutal, est le seul cas où les mesures de terrain ne correspondent ni aux simulations ni aux observations. Ce dernier point montre alors l'utilité et l'apport des null-arrays en comparaison aux méthodes géoélectriques classiques.

En mode azimutal, un pas de  $15^\circ$  entre les mesures est un bon compromis entre la précision de la mesure et la rapidité d'une mesure complète.

Pour faire des profils ou des mesures azimutales, la taille des null-arrays devrait être un compromis entre une longueur pas trop grande pour éviter des mélanges de structures d'un côté et une longueur pas trop petite pour atteindre les profondeurs espérées d'un autre côté. Idéalement, d'après ce test, une longueur similaire, ou légèrement supérieure, à la distance séparant les structures paraît adaptée, d'autant que la sensibilité aux perturbations latérales décroît rapidement pour les null-arrays. Dans les situations de terrain, où ces distances ne sont généralement pas connues, il est alors recommandé d'effectuer un profil avec deux longueurs nettement différentes afin d'identifier la distance fournissant les meilleurs résultats.

La profondeur d'investigation des null-arrays est difficile à déterminer, du fait qu'aucune inversion n'est effectuée. De plus, ayant dans ce terrain uniquement identifié des failles subverticales quasiment affleurantes en surface, il est difficile d'évaluer une profondeur d'investigation. Le choix d'un terrain avec une structure en horst par exemple serait plus approprié pour ce genre d'évaluation.

En situation de terrain, il est alors recommandé d'utiliser le  $W\gamma na$  pour les profils. Le Sna peut également être utilisé en vue de confirmer les mesures du premier. Le grand désavantage du Sna, en plus de sa sensibilité plus faible que le  $W\gamma na$ , est qu'il nécessite environ deux fois plus de temps pour être appliqué sur le terrain. Pour des mesures de profils, le fait qu'il soit peu efficient ne le rend pas recommandable, même si la qualité de ses mesures est satisfaisante. Pour les mesures azimutales, l'utilisation combinée du MAN et du Sna est recommandée, le premier permettant l'évaluation de l'orientation et le second ajoutant la précision à cette mesure.

## 5.3 Vers chez le Brandt - Grotte dans un milieu karstique

Dans cette section, le contexte géologique est tout d'abord présenté, suivi par les résultats des méthodes géophysiques classiques, utilisées pour valider les résultats obtenus avec les null-arrays. Ensuite, les résultats des profils effectués avec les null-arrays sont présentés, suivis par les résultats des null-arrays utilisés en mode azimutal. Une discussion de ces résultats et leur interprétation clôt alors cette section.

### 5.3.1 Contexte géologique

La grotte de Vers chez le Brandt s'est développée dans les calcaires karsitifiés du Malm (Jurassique supérieur) karsitifiés de faibles perméabilités. Son accès se fait au travers d'une fracture de 3.5 m de profondeur, liée à une large faille dans la direction  $N140^\circ$  (Kiraly et Simeoni, 1971). La grotte elle-même a une pente d'environ  $13^\circ$ , sa section varie entre  $5\text{ m} \times 2\text{ m}$  et  $12\text{ m} \times 5\text{ m}$  (Blant et Puech, 2001) et sa direction est environ de  $N145^\circ$  (Kiraly et Simeoni, 1971).

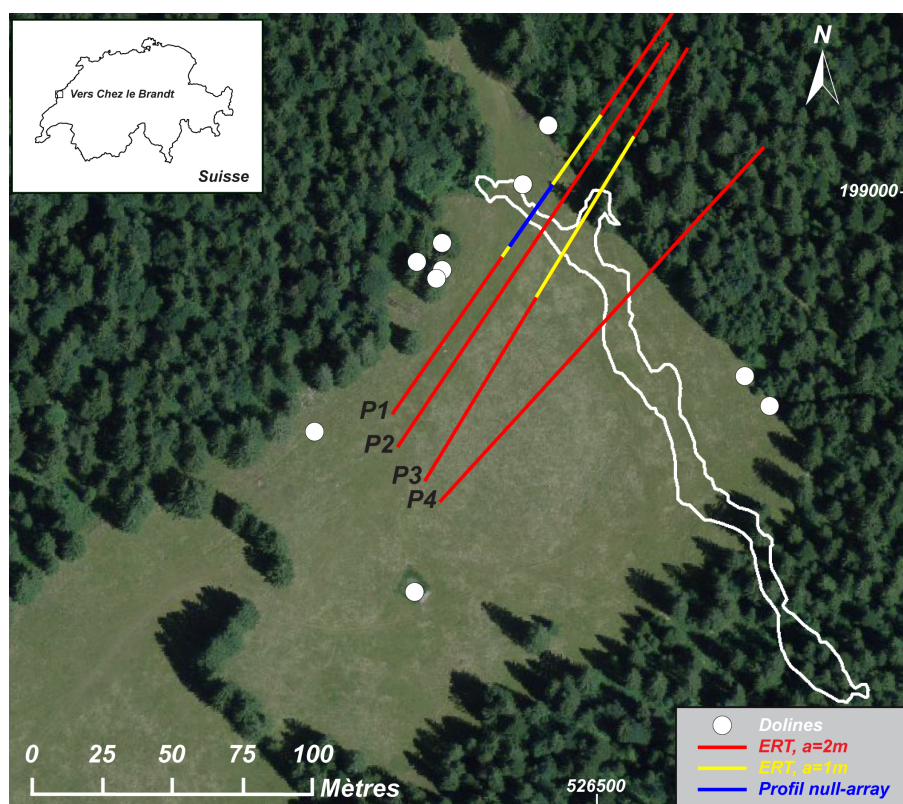


FIGURE 5.11 – Localisation de la grotte de Vers chez le Brandt (ligne blanche), les dolines (cercles blancs) et les profils géophysiques étudiés ( $P1$  à  $P4$ ). Le début des profils (la position du  $0\text{ m}$ ) est du côté Nord-Est. *Source : Office fédéral de topographie*

Des affleurements calcaires peuvent être observés de chaque côtés du pâturage (Müller, 1981). Les calcaires du Malm ont un pendage d'environ  $10^\circ$  à  $15^\circ$  vers le Sud-Ouest. Il a été montré qu'il existe deux familles de fractures (Kiraly et Simeoni, 1971) : une première qui suit plus ou moins l'axe de la grotte, soit environ  $N145^\circ$ , et une seconde, qui peut être observée dans la grotte, perpendiculaire à celle-ci, soit environ  $N40^\circ$ . Kiraly et Simeoni (1971) et Müller (1981) ont montré que toutes ces fractures sont subverticales. Ces auteurs ont aussi montré qu'un petit groupe de fractures montrent un cisaillement ( $N0^\circ$ - $N10^\circ$ ) et que la karstification et la formation de la grotte ont été créées par la fracturation et le cisaillement (Gonzalez, 2012). D'après les observation de terrain, une autre faille, suivant la direction régionale de fracturation de  $N170^\circ$ , croise certainement la grotte juste au Sud de son entrée. Toutes ces structures font de cette région une zone très complexe et fracturée.

La Fig. 5.11 montre la localisation de la grotte de Vers chez le Brandt (ligne blanche), les dolines (cercles blancs) et les profils géophysiques étudiés ( $P1$  à  $P4$ , la position  $0m$  étant du côté Nord-Est du profil).

### 5.3.2 Méthodes géophysiques classiques

Quatre ERT et plusieurs profils VLF ont été effectués sur la région de Vers chez le Brandt. Les null-arrays ont alors été utilisés dans le but de déterminer la position et la taille de la grotte et du système fracturé, les résultats étant alors comparés aux mesures de géophysique classique et aux connaissances géologiques de la région.

Toutes les ERT ont été effectuées avec les deux modes Wenner et dipôle-dipôle. Le but majeur est d'observer la détectabilité de la grotte ainsi que la possibilité de différencier la grotte de la faille se trouvant au-dessus. Le VLF-EM et le VLF-Grad ont ainsi été utilisés avec deux fréquences,  $23.4kHz$  et  $183kHz$  dans ce but.

La Fig. 5.12 montre les résultats des quatre Wenner ERT effectuées sur les profils  $P1$  à  $P4$ .

Parmi les Wenner ERT effectuées sur le profil  $P1$ , montré sur la Fig. 5.12a, situé à une distance de  $\sim 15m$  de l'entrée de la grotte, deux grottes apparaissent : une aux environs de  $85m$  et une autre aux environs de  $120m$ . Sur le profil  $P2$ , montré sur la Fig. 5.12b, situé à une distance de  $\sim 25m$  de l'entrée de la grotte, une seule grotte apparaît clairement, autour des  $120m$ , alors que celle située autour des  $85m$  sur le profil  $P1$  a presque totalement disparu. Sur les profils  $P3$  et  $P4$ , montrés sur les Figs. 5.12c et 5.12d, situés à des distances de  $\sim 35m$  et  $\sim 55m$  de l'entrée de la grotte respectivement, aucune structure n'apparaît sur les ERT. Ces éléments sont récapitulés dans le tableau 5.3.

Pour les ERT effectuées sur les profils  $P1$  à  $P3$ , une grande structure résistive, en rouge, apparaît sur les 50 premiers mètres. Cette zone correspond exactement à la partie se trouvant dans la forêt, alors qu'une petite bosse d'environ  $1.5m$  peut être observée à la lisière entre la

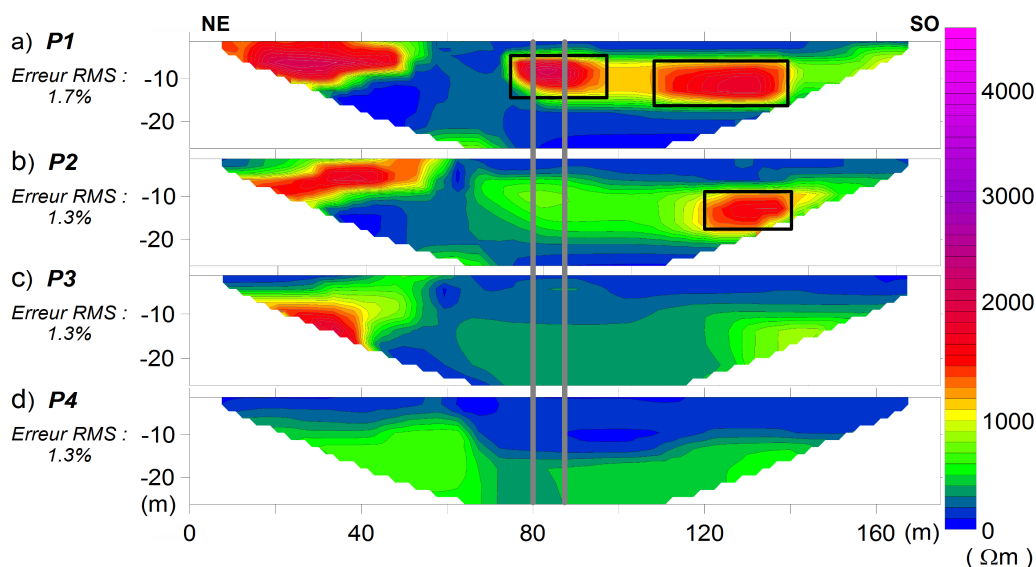


FIGURE 5.12 – Wenner ERT effectuées à Vers chez le Brandt sur les profils a)  $P1$ , b)  $P2$ , c)  $P3$  et d)  $P4$  avec  $a = 5\text{ m}$ . Les zones résistives sur les ERT, en rouge, sont interprétés comme la grotte, et encadrées par un rectangle noir. Les lignes grises verticales montrent les limites de la grotte (environ 8-9 m de largeur).

forêt et la prairie. Cette partie résistive pourrait alors correspondre à l'épikarst du calcaire du Malm qui apparaît juste sous la forêt.

Sur toutes les ERT, une fine couche conductive est observée en surface. Son épaisseur augmente en direction du Sud, avec une épaisseur d'environ 2 m sur le profil  $P1$  et d'environ 10 m sur le profil  $P4$ . Cette couche superficielle est certainement du sol et le pendage correspondant à cet épaissement vaut environ  $11^\circ$ .

La seconde grotte observée vers les 120 m est certainement connectée aux quatre dolines (cercles blancs sur la Fig. 5.11) situées au Nord-Ouest de cette position. Malheureusement, aucune autre mesure n'a été effectuée dans cette région de la prairie.

Le fait que la grotte ne soit pas plus détectable depuis le profil  $P3$  a été expliqué et simulé numériquement (voir l'Annexe C.5). Lorsque la grotte est trop profonde, son effet sur les valeurs de résistivités apparentes devient trop faible et cette petite perturbation se perd dans le bruit de fond, dans les erreurs de mesure et dans le processus d'inversion des données. Les résultats des simulations montrent en effet qu'une grotte ne peut pas être détectée si elle se trouve à une profondeur équivalente à sa taille, et ce, sans intégrer de bruit aux simulations. Ceci est vrai pour un dispositif de 30 électrodes avec un espacement  $a = 2\text{ m}$ , soit environ la moitié de la taille de la grotte. Pour la grotte de Vers chez le Brandt, pour le profil situé à 25 m de son

TABLE 5.3 – Positions des mesures azimutales sur  $P1$  et des profils parallèles  $P1$  à  $P4$  par rapport à l'entrée de la grotte.

Mesure	Position	Remarque
$A1$	$93\text{ m}$	<i>à proximité de la grotte</i>
$A2$	$85\text{ m}$	<i>sur la grotte</i>
$A3$	$81\text{ m}$	<i>sur la grotte</i>
Profil	Distance par rapport à l'entrée de la grotte	Observation
$P1$	$15\text{ m}$	<i>grottes à <math>85\text{ m}</math> et <math>120\text{ m}</math></i>
$P2$	$25\text{ m}$	<i>grotte à <math>120\text{ m}</math></i>
$P3$	$35\text{ m}$	<i>plus de grotte visible</i>
$P4$	$55\text{ m}$	<i>plus de grotte visible</i>

entrée, la grotte est à peine détectée lorsque sa profondeur est d'environ  $5\text{ m}$ , ce qui correspond effectivement plus ou moins à sa taille.

Alors que la profondeur de la grotte est d'environ  $2\text{-}3\text{ m}$  à son entrée, ses premiers mètres sont relativement plats. Avec la profondeur de son entrée et les deux profondeurs déterminées avec les Wenner ERT sur les profils  $P1$  et  $P2$ , une pente d'environ  $5$  à  $6^\circ$  peut être estimée pour les premiers  $25\text{ m}$  de la grotte. Supposant ensuite cette pente moyenne de  $13^\circ$ , les profondeurs suivantes peuvent être estimées : environ  $7.5\text{ m}$  à  $35\text{ m}$ , correspondant au profil  $P3$  et environ  $12\text{ m}$  à  $55\text{ m}$ , correspondant au profil  $P4$ .

La Fig. 5.13 montre toutes les mesures effectuées sur le profil  $P1$  : dipôle-dipôle et Wenner ERT avec deux espacement d'électrodes, les profils avec les null-arrays, qui seront discutés dans le section suivante (5.3.3) et les mesures azimutales avec les null-arrays, qui seront discutés dans la section d'après (5.3.4).

Pour toutes les ERT effectuées sur le profil  $P1$ , à l'exception du dipôle-dipôle avec un espacement d'électrode  $a = 2\text{ m}$ , la grotte est clairement visible aux alentours de  $85\text{ m}$ . Comme son sommet est environ à  $4\text{ m}$  de profondeur, il est logique que le dipôle-dipôle avec un espacement d'électrodes  $a = 2\text{ m}$  ne la détecte pas, la profondeur d'investigation étant d'environ  $4\text{ m}$ .

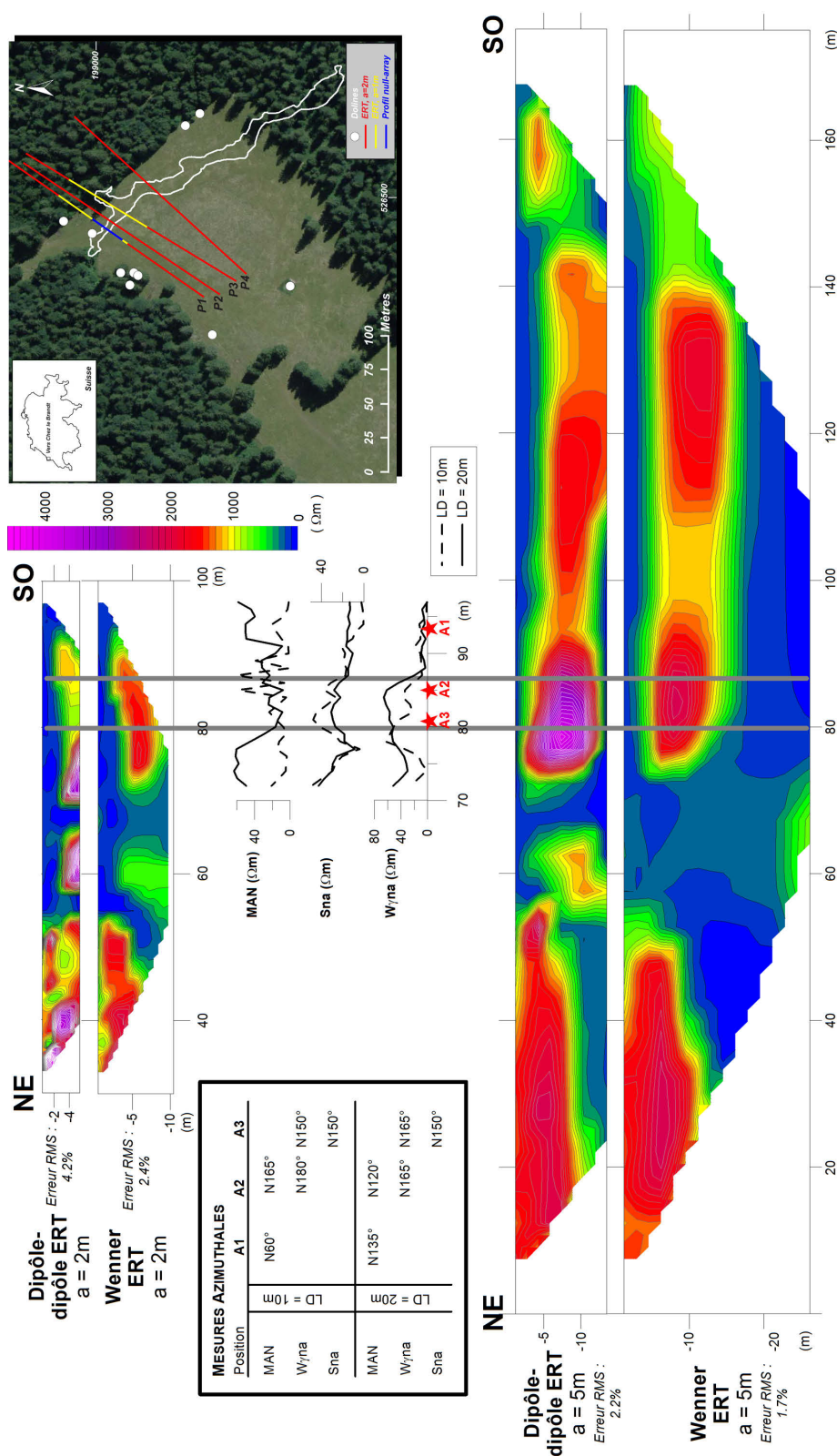


FIGURE 5.13 – Mesures géophysiques classiques (Wenner ERT et dipôle-dipôle ERT avec deux espacement d'électrodes), profils avec les null-arrays et mesures azimuthales avec les null-arrays sur le profil P1 à Vers chez le Brandt. La grotte est dessinée en blanc sur le carte, les lignes rouges et jaunes (sur le carte) montrent les différents ERT. Les lignes grises verticales montrent les limites de la grotte (environ 8-9 m de largeur). A1, A2 et A3 sont les positions où des mesures azimuthales ont été effectuées avec les null-arrays. *Source de la carte : Office fédéral de topographie*

### 5.3.3 Profils avec les null-arrays

Des profils avec les null-arrays ont été effectués sur le *P1* sur une distance d'environ  $25\text{ m}$  (ligne bleue sur la carte de la Fig. 5.11) avec un pas de  $1\text{ m}$ . Les trois null-arrays (MAN,  $W\gamma_{na}$  et Sna) ont été utilisés avec deux longueurs de dispositif ( $10\text{ m}$  et  $20\text{ m}$ ). Les résultats sont présentés dans la Fig. 5.14, en parallèle des deux ERT effectuées sur le même profil en mode dipôle-dipôle (DD) et Wenner (W) avec un espacement des électrodes de  $5\text{ m}$  (ligne rouge sur la carte de la Fig. 5.11). Des ERT ont été aussi effectuées avec un espacement entre les électrodes de  $a = 2\text{ m}$  (ligne rouge sur la carte de la Fig. 5.11). Tous les résultats, y compris les mesures azimuthales, sont montrée dans la Fig. 5.13.

Dans les simulations numériques, tous les null-arrays étaient capables de localiser la grotte, même si l'interprétation du MAN en valeurs absolues paraît plus difficile, comme illustré sur la Fig. 4.11. Aucun d'eux n'étaient par contre capable de déterminer sa largeur ; seule le centre de la structure est localisable.

Ainsi, la position de la grotte est localisée entre deux pics symétriques dans le cas du MAN (puisque les mesures sont toujours effectuées en valeur absolue) et sur le pic pour les deux autres null-arrays. La seule différence observée est la forme du  $W\gamma_{na}$  lorsque le dispositif est grand, où un petit minimum local semble apparaître au sommet du pic.

Dans les mesures de terrain, l'interprétation est toujours plus compliquée, particulièrement dans ce cas où l'environnement karstique produit beaucoup de perturbations sur les signaux mesurés. L'interprétation des signaux mesurés avec les null-arrays semblerait ici risquée si elle ne pouvait pas être confortée par d'autres mesures ou d'autres connaissances.

Le MAN montre deux pics à  $75\text{ m}$  et  $92\text{ m}$ , pour le dispositif de  $20\text{ m}$  de long. La valeur proche de zéro entre ces deux pics peut alors être considérée comme la position de la grotte. Pour la configuration plus courte, le signal est plus faible et trois pics apparaissent autour des  $85\text{ m}$ . Ces pics sont certainement des erreurs, provoquées par des erreurs de manipulations et/ou des hétérogénéités de subsurface qui pourrait être liées à des failles connectées à la grotte.

Le  $W\gamma_{na}$  montre un large pic entre  $75\text{ m}$  et  $\sim 88\text{ m}$ . D'après les simulations, la grotte pourrait alors se trouver aux alentours de  $81\text{ m}$ . Comme dans les simulations, un des dispositif a un petit minimum au sommet d'un maximum plus important. La grande différence est que contrairement aux simulations, cela se produit pour le petit dispositif et non pour le grand. Bien que la géométrie et les dimensions semblent comparables entre les simulations et ce cas de terrain, cette différence peut être liée à d'autre caractéristiques géométriques ou à une plus grande complexité de la structure étudiée.

Le Sna produit un large pic entre  $77\text{ m}$  et  $88 - 90\text{ m}$ , qui est lui-même composé de deux petits pics à  $81\text{ m}$  et  $85\text{ m}$ . Le pic principal est certainement provoqué par la structure principale composant cette partie du profil : la grotte. Les deux pics moins importants pourraient être

reliés à ses limites latérales, puisque le petit dispositif produit des pics plus nets et mieux définis. Mais ils pourraient également être provoqués par la faille qui se trouve au-dessus et qui n'est certainement pas parfaitement verticale.

D'après les simulations, la détermination de l'expansion spatiale de la grotte ne peut pas être déterminée. Seul le centre est localisable, aux environ de 81-83  $m$  dans ce cas. Sur ce terrain, la structure étant plus complexe, non symétrique et sûrement perturbée par des hétérogénéités karstifiées de subsurface, les mesures et leur interprétation sont plus compliquées. Malgré tout, quasiment tous les null-arrays ont donné des résultats interprétables, cohérents entre eux et avec les résultats supposés. Le seul dispositif qui n'a pas donné de résultat interprétable est le MAN, utilisé avec la courte longueur de dispositif (10  $m$ ). Ce dernier est peut être trop sensible aux perturbations de subsurfaces, ce qui produit un signal trop bruité.

Il est à noter que tous les null-arrays sont sensibles de manière cohérente à la structure, par rapport aux simulations, en terme d'intensité.

L'amplitude du signal simulé sur une grotte est approximativement un tiers de celui simulé dans le cas d'une faille. En effet, le pic du MAN atteint environ 2500  $\Omega m$  pour la grotte contre 8000  $\Omega m$  pour la faille, et les pics du Sna et du  $W\gamma na$  atteignent environ 1600  $\Omega m$  pour la grotte contre environ 5000  $\Omega m$  pour la faille. Pour les mesures de terrain, le MAN produit un signal d'environ 60  $\Omega m$  pour la grotte contre  $\sim 300 \Omega m$  pour la faille, le  $W\gamma na$  environ 60  $\Omega m$  pour la grotte contre 150 – 200  $\Omega m$  pour la faille et le Sna environ 45  $\Omega m$  pour la grotte contre  $\sim 200 \Omega m$  pour la faille. Le rapport entre les deux cas est donc toujours autour de 4, alors qu'il était estimé à environ 3 d'après les simulations.

En regardant de plus près les simulations du  $W\gamma na$ , les points d'inflexion des signaux semblent être localisés sur les limites de la grotte. Des études approfondies devraient alors être effectuées afin de clarifier s'il s'agit d'un hasard ou d'une réalité liée au dispositif. En supposant que ce fait ne soit pas dû au hasard, il pourrait alors être utilisé comme moyen pour déterminer la largeur d'une telle structure. Il est à noter que dans ce cas de terrain, les points d'inflexion du  $W\gamma na$  sont positionnés autour des 78  $m$  et 86  $m$  pour les deux longueurs de dispositif. Ces positions sont parfaitement cohérentes avec la position présumée de la grotte et sa largeur serait alors estimée à environ 8  $m$ , alors que d'après la carte elle est supposée être d'environ 6  $m$  à cet endroit. Ces résultats sont donc tout-à-fait plausibles et consistants avec la réalité.

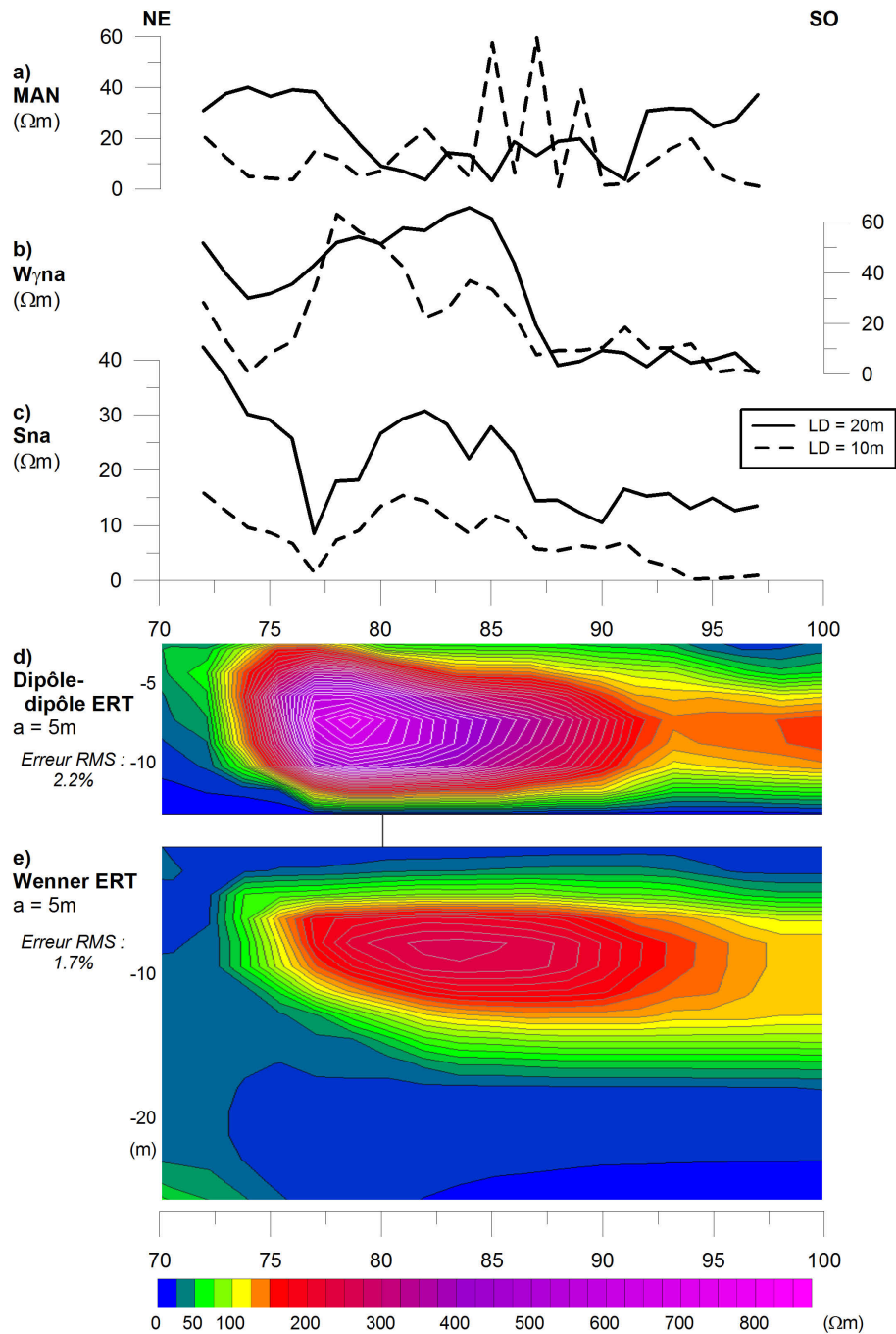


FIGURE 5.14 – Profils null-arrays avec le a) MAN, le b)  $W\gamma na$ , le c)  $Sna$ , et les d) dipôle-dipôle et e) Wenner ERT de  $a = 5 m$  effectués à Vers chez le Brandt sur le profil P1.

### 5.3.4 Mesures azimuthales avec les null-arrays

Des mesures azimuthales ont également été effectuées à trois positions différentes :  $A1$ ,  $A2$  et  $A3$  (voir les positions sur le Fig. 5.13). Ces positions ont été retenues en fonction de la prétendue position de la grotte, avec comme but le fait d'être au-dessus ( $A2$  et  $A3$ ) de celle-ci ou juste à côté ( $A1$ ). Les mesures ont été prises de  $0^\circ$  à  $180^\circ$ , tous les  $15^\circ$  (points noirs), le diagramme était alors complété à  $360^\circ$  par symétrie des null-arrays (points gris). Deux mesures à la position  $A2$  et deux autres à la position  $A3$  sont présentées sur le Fig. 5.13.

Toutes les mesures azimuthales sont présentées dans la table 5.4, alors que tous les diagrammes polaires le sont dans l'Annexe C.6.

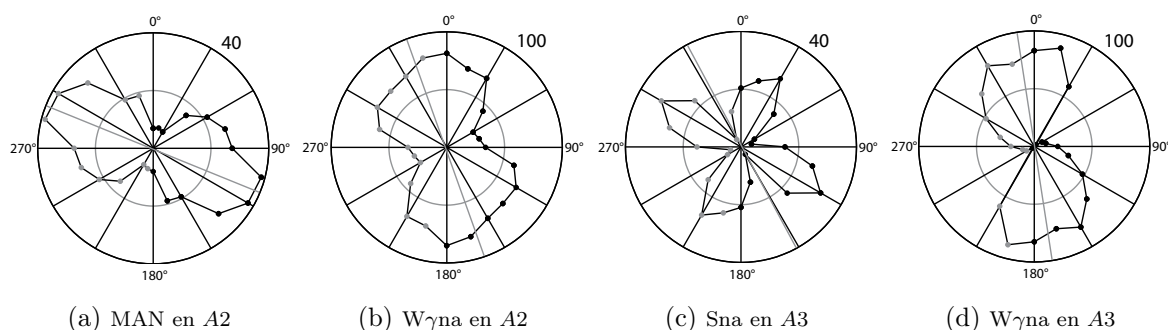


FIGURE 5.15 – Mesures azimuthales effectuées à Vers chez le Brandt à deux positions différentes et pour différents null-arrays : a) le MAN en  $A2$ , b) le  $W\gamma_{na}$  en  $A2$ , c) le Sna en  $A3$  et d) le  $W\gamma_{na}$  en  $A3$ . La longueur du dispositif est ici de  $20\text{ m}$  pour les quatre mesures. Les lignes grises montrent la direction déterminée de la structure. Les points gris sont en fait obtenu par symétrie des mesures, montrées par les points noirs.

A la position  $A1$ , le MAN effectué avec le petit dispositif donne une orientation de  $N60^\circ$ , alors que le long lui donne plutôt une direction  $N135^\circ$ .

A la position  $A2$ , les longs dispositifs donnent une direction comprise entre  $N120^\circ$  et  $N150^\circ$ , mais les dispositifs plus courts donnent différentes orientations :  $N150^\circ$  pour le MAN et  $N90^\circ$  pour le  $W\gamma_{na}$ .

Toutes les données à la position  $A3$ , qui est supposée être exactement sur la grotte, donnent une orientation de  $N150^\circ$ , correspondant bien à sa direction, comme montré sur la carte de la Fig. 5.11. Seul le  $W\gamma_{na}$  effectué avec le grand dispositif donne une direction légèrement différente, un  $N165^\circ$ .

Ces résultats laissent croire que les dispositifs longs donnent tous une direction relativement homogène et cohérente, car ils sont plus influencés par les structures importantes - la grotte et la faille - à une grande distance de la structure elle-même. Par contre, les dispositifs plus courts seront plus facilement influencés par des hétérogénéités de subsurfaces et/ou par des autres structures plus locales, comme cela semble être le cas du côté Sud-Ouest de la grotte (mesure  $A1$ ).

TABLE 5.4 – Résumé des orientations déterminées par les mesures azimutales avec les null-arrays à Vers chez le Brandt, pour différentes longueurs de dispositifs ( $LD$ ) et différentes positions. Les positions sont reliées à la distance sur le profil  $P1$ .

Nom & Position Dispositif		A1 $93\ m$	A2 $85\ m$	A3 $81\ m$
MAN $W\gamma_{na}$ Sna	$LD = 10\ m$	$N60^\circ$	$N150^\circ$ $N90^\circ$	$N150^\circ$ $N150^\circ$
MAN $W\gamma_{na}$ Sna	$LD = 20\ m$	$N135^\circ$	$N120^\circ$ $N150^\circ$	$N165^\circ$ $N150^\circ$

Tous les MAN ont ici aussi été interprétés comme un MAN-modifié, l'erreur de positionnement des électrodes sur le terrain étant toujours inévitable. Les orientations des structures sont donc déterminées par le grand axe de l'ellipse obtenue par le MAN. Comme celui-ci n'est pas toujours facile à déterminer, pouvant facilement être brouillé dans du bruit ou des perturbations locales, il est plus facile de déterminer la direction perpendiculaire à la direction du minimum. Pour le  $W\gamma_{na}$ , la question, toujours ouverte, est de savoir si le paradoxe anisotrope se produit ou non. Malgré les simulations, qui suggèrent le plus petit axe dans la plupart des cas, interpréter du  $W\gamma_{na}$  par son grand axe donne des résultats plus cohérents avec les autres mesures et les observations de terrain. La région étant très karstifiée et les longueurs des dispositifs étant relativement grandes ( $10\ m$  et  $20\ m$ ), supposer que le paradoxe se produit ici est raisonnable. L'interprétation des mesures se fait alors par la direction du grand axe de l'ellipse. Pour le Sna, aucun choix ne peut être fait sans autre information ou sans autre mesure. D'après simulations numériques effectuées exactement sur la structure, l'ellipse circonscrite a son grand axe dans la direction de celle-ci. Ainsi, lorsque les mesures azimutales avec le Sna sont effectuées, l'interprétation de l'orientation se fait de la même manière, ce qui donne des résultats cohérents avec les autres mesures. Dans ce cas, et en opposition avec le cas du  $W\gamma_{na}$ , il paraît raisonnable de supposer que le paradoxe ne se produit pas pour ce dispositif. Cette supposition semble raisonnable et censée en comparant les simulations numériques de ces deux dispositifs dans les cas de la faille et de la grotte, puisque le paradoxe anisotrope semble se produire plus loin de la structure pour le Sna que pour le  $W\gamma_{na}$ .

La complexité de ces mesures et la présomption d'un système de failles conjuguées ont apporté l'idée d'effectuer les simulations de la structure de failles en X (voir section 4.3.4). Malheureu-

sement, les résultats n'ont pas permis d'apporter une quelconque interprétation à la situation rencontrée ici. La raison est certainement le fait que les simulations ont été effectuées sur deux failles parfaitement similaires, ce qui n'est pas le cas en situation réelle. Ainsi, l'effet d'une structure plus grande est certainement prépondérante. L'interprétation des mesures est alors plus juste sans les résultats obtenus sur cette structure de failles en X.

Ainsi, sur un terrain complexe comme celui-là, les données doivent être interprétées très prudemment. Comme tous les longs dispositifs donnent plus ou moins la même direction, les null-arrays sont ainsi capables de déterminer l'orientation des structures principales, c'est-à-dire la grotte et/ou la faille située au-dessus dans ce cas. Pour les dispositifs plus courts, des structures de faibles profondeurs peuvent jouer un rôle important sur les signaux mesurés, les rendant ainsi plus compliqués et difficiles à interpréter et à comprendre. Ceci est d'autant plus vrai que des hétérogénéités de subsurfaces peuvent être particulièrement complexes dans des environnements karstifiés comme celui-là. A Vers chez le Brandt, les observations géologiques à l'intérieur de la grotte ont révélé des fractures secondaires, perpendiculaires à la direction de celle-ci. Ces fractures, qui sont censées être plus petites que la faille principale, peuvent ainsi générer des perturbations sur le signal mesuré, principalement à faible profondeur (donc pour les dispositifs plutôt courts) où leur effet est plus important. Comme déjà mentionné, pour des dispositifs plus longs, le volume investigué est alors plus important et atteint des structures plus profondes, minimisant ainsi l'effet des hétérogénéités de surface et des anomalies de petites tailles.

Malgré ces complexités, les mesures azimutales avec les null-array permettent de déterminer la direction de la grotte et de sa faille.

Ces mesures illustrent et mettent en avant l'importance du choix de la longueur du dispositif utilisé. Les mesures devraient toujours être effectuées à différentes positions et avec au moins deux longueurs de dispositif différentes pour éviter des mauvaises interprétations de signaux "faussés" par des petite anomalies locales.

En terme d'applicabilité, le MAN est nécessaire pour assurer le choix de la bonne direction dans le cas où d'autres null-arrays sont utilisés, et permet une détermination approximative de l'orientation.

Avec beaucoup de surprise, le  $W\gamma$ na a montré ici des résultats cohérents avec ceux des autres dispositifs, même si son interprétation est toujours sujette à discussion. Sa précision n'est ni pire ni meilleure que celle du MAN. Malgré tout, le  $W\gamma$ na utilisé dans une telle situation ne semble toujours pas des plus appropriées, étant donné qu'il n'est pas possible d'anticiper la cohérence ou non des mesures.

Le Sna donne toujours les meilleurs résultats en terme de précision, mais a toujours besoin d'aide pour déterminer la bonne direction.

### 5.3.5 Conclusion sur les mesures de terrain de Vers chez le Brandt

Les mesures avec les null-arrays ont montré leurs aptitudes à la détection d'une grotte et à la caractériser, mais également leurs limites d'utilisation.

En mesures de profil, les pics mesurés avec le  $W\gamma$ na et le Sna sont plus larges que dans le cas d'une faille et montrent une largeur de pic correspondant à l'ordre de grandeur de la largeur de la grotte. Les formes des signaux ressemblent ainsi plus aux simulations de la structure de grotte qu'à celles de la structure de faille. Ainsi, la faille qui se trouve au dessus de la grotte ne modifie a priori pas trop les signaux, qui sont alors principalement générés par la grotte elle-même. Le fait que la grotte donne plus de signal que la faille est probablement lié au fait qu'une faille dans un milieu karstifié comme celui-là est certainement remplie de sédiments. Le contraste électrique entre la faille et son milieu est alors très faible, ce qui explique l'absence d'un signal clair et de pics fins sur ces profils.

En mode azimutal et bien que ce terrain karstifié soit très hétérogène, les null-arrays ont permis de déterminer l'orientation des structures principales, la grotte, lorsque les dispositifs se trouvaient au-dessus d'elle. Il est par contre important de connaître sa position au préalable, grâce à un profil avec les null-arrays par exemple, puisqu'une erreur de positionnement du dispositif pourrait mener à des résultats erronés qui entraîneraient alors une fausse interprétation. La sensibilité au positionnement paraît alors plus grande dans un milieu hétérogène, où le risque est plus élevé d'obtenir un signal perturbé par une structure différente que celle étudiée.

Pour les profils, comme dans le cas des Breuleux (section 5.2.3), le  $W\gamma$ na et le Sna sont donc recommandés. Le MAN n'a pas permis de donner d'aussi bons résultats sur ce terrain, peut-être à cause d'une trop grande sensibilité aux anomalies de subsurfaces. Le  $W\gamma$ na et le Sna ont ici donné des résultats très proches, mais le Sna est toujours pénalisé par le fait qu'il soit peu efficace sur le terrain, puisqu'il faut toujours environ deux fois plus de temps pour effectuer un profil.

Pour les mesures azimutales, des résultats ont pu être tirés des trois null-arrays. Dans ce cas, le MAN n'a pas apporté de résultats particulièrement bons. La raison en était aussi le choix de la position : en effet, chacun des trois null-arrays n'a pas pu être systématiquement appliqué à chacune des positions. Malheureusement, aucune mesure azimutale avec le MAN n'a été effectuée à la position A3, censée être exactement au-dessus de la grotte. L'interprétation du  $W\gamma$ na et du Sna à la position A3 n'aurait ainsi pas été possible sans la connaissance préalable de la direction, puisqu'il n'est toujours pas possible de savoir si le paradoxe anisotropique a lieu ou non. Bien que le  $W\gamma$ na ne permette pas de distinguer une direction de sa perpendiculaire, étant très sensible à son positionnement à cause du paradoxe anisotropique, il a donné dans ce cas de bons résultats cohérents en accord avec les autres mesures, les observations et les attentes. Le Sna ajoute toujours de la précision aux mesures, mais n'est toujours pas suffisant à lui tout seul, puisqu'il n'est toujours pas possible de choisir parmi les deux directions perpendiculaires.

La taille des dispositifs est toujours difficile à recommander. Il paraît bien d'utiliser un dispositif suffisamment grand pour éviter le bruit et les perturbations des petites hétérogénéités de subsurface. Avec une section de la grotte estimée à environ  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ , se trouvant à une profondeur d'au moins  $5\text{ m}$ , la longueur des dispositifs ne devrait pas être inférieure à  $10\text{ m}$ . Une longueur deux fois plus grande pourrait même être nécessaire, considérant que les mesures effectuées avec un dispositif plus long que  $10\text{ m}$  étaient tous capables de déterminer l'orientation de la structure, ce qui n'était pas le cas des mesures effectuées avec un dispositif de  $10\text{ m}$ . Une longueur de dispositif plus grande qu'au moins deux fois la profondeur de la grotte paraît alors être un conseil approprié. Si d'autres mesures étaient effectuées sur ce terrain, des dispositifs plus grands seraient utilisés, en prenant par exemple des longueurs de  $20\text{ m}$  et  $30\text{ m}$  au lieu de  $10\text{ m}$  et  $20\text{ m}$ .

Sur ce terrain, un step plus grand que  $1\text{ m}$ , par exemple  $2$  ou  $3\text{ m}$ , aurait dû être utilisé pour les profils, permettant ainsi d'effectuer des profils plus longs en un temps raisonnable et de lisser un peu les mesures effectuées en limitant les effets des perturbations locales. Avec un step plus petit, le résultat obtenu serait des courbes beaucoup plus complexes avec des pics secondaires dus aux hétérogénéités locales. Il faudrait alors lisser mathématiquement les mesures pour distinguer des tendances générales.

Ainsi, pour les profils, seul le  $W\gamma\text{na}$  serait suffisant, pour assurer de bons résultats et une bonne efficacité sur le terrain. Le  $\text{Sna}$  pourrait également être utilisé pour confirmer les premiers résultats obtenus.

Pour les mesures azimutales, l'utilisation couplée du  $\text{MAN}$  et du  $\text{Sna}$  est toujours hautement recommandée, le  $\text{Sna}$  ajoutant la précision à l'orientation déterminée avec le  $\text{MAN}$ .

Sur ce type de terrain, plus complexe, les null-arrays sont plus difficiles à interpréter. Pour les mesures en profils, ils ne semblent pas être d'un grand apport par rapport aux mesures classiques : les résultats des ERT sont plus clairs et faciles à interpréter pour l'identification et la localisation des structures. Par contre, les mesures azimutales avec les null-arrays permettent de déterminer l'orientation de ces structures, chose plus difficile à faire avec les ERT.

## 5.4 Buix - Structure de dépôts alluviaux

Dans cette section, le contexte géologique est tout d'abord présenté, suivi par les méthodes géophysiques classiques appliquées sur ce terrain et utilisées pour valider les résultats obtenus avec les null-arrays. Les résultats des profils effectués avec les null-arrays sont ensuite présentés, suivis par ceux des mesures azimutales. Une discussion sur l'application des null-arrays dans ce contexte clôt cette section.

### 5.4.1 Contexte géologique

La plaine de Buix est une relativement petite zone,  $\sim 0.25 \text{ km}^2$ , d'orientation NO-SE, située le long de la rivière Allaine, comme montré dans la Fig. 5.16. Cette plaine se situe dans le Nord-Ouest de la Suisse, en Ajoie, dans le Jura tabulaire. Les flancs de la vallée, creusés par la rivière, sont des calcaires karstifiés. Les marnes oxfordiennes, sous les calcaires, sont imperméables et forment ainsi l'aquiclude de la plaine.

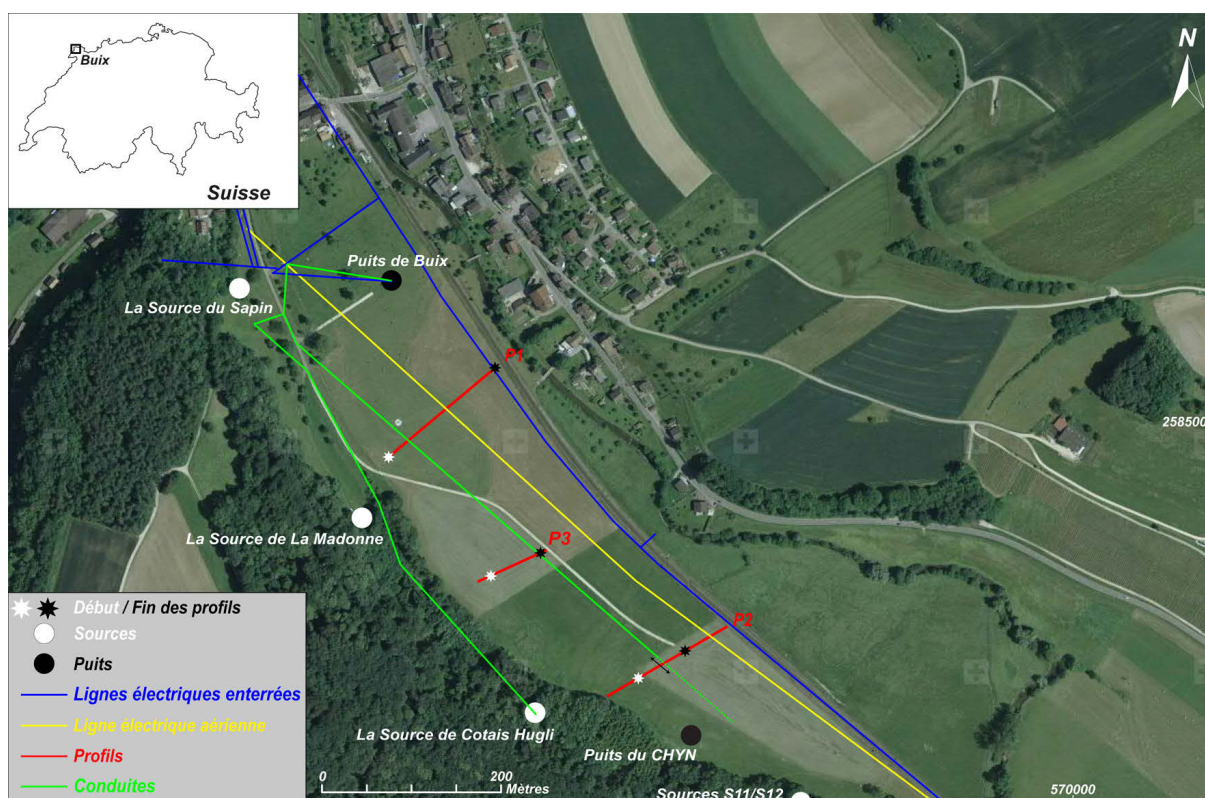


FIGURE 5.16 – Localisation de la plaine de Buix avec ses perturbations anthropiques : les lignes électriques aériennes (lignes jaunes) et enterrées (lignes bleues) et les conduites enterrées (lignes vertes). Les trois profils investigués sont montrés (lignes rouges). Source : Office fédéral de topographie

En plus de la rivière Allaine, des petits ruisseaux stagnants sont présents le long de la plaine, principalement dans le Sud-Ouest où se trouvent aussi des zones marécageuses. De plus, cinq sources karstiques principales sont présentes le long du bord Sud-Ouest de plaine (Fig. 5.16). L'aquifère poreux de la plaine Buix a une épaisseur approximative de 10 m. Cet aquifère alluvial est principalement composé de sables et d'argiles. A l'intérieur de cet aquifère se trouvent des chenaux, composés en grande partie de graviers. Ces chenaux, saturés en eau et donc électriquement conducteurs, se trouvent à quelques mètres de profondeur (entre 0 et 5 m) et ont une largeur horizontale comprise entre 5 et 20 m (Petitjean, 2011).

La Fig. 5.16 présente la plaine, sa localisation et les perturbations anthropiques de la plaine. Les positions des profils étudiés sont également montrés. La Fig. 5.17 présente quant à elle la structure supposée des chenaux, basée sur les études réalisées sur cette plaine au fil des ans avec les étudiants en hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (Petitjean, 2011).

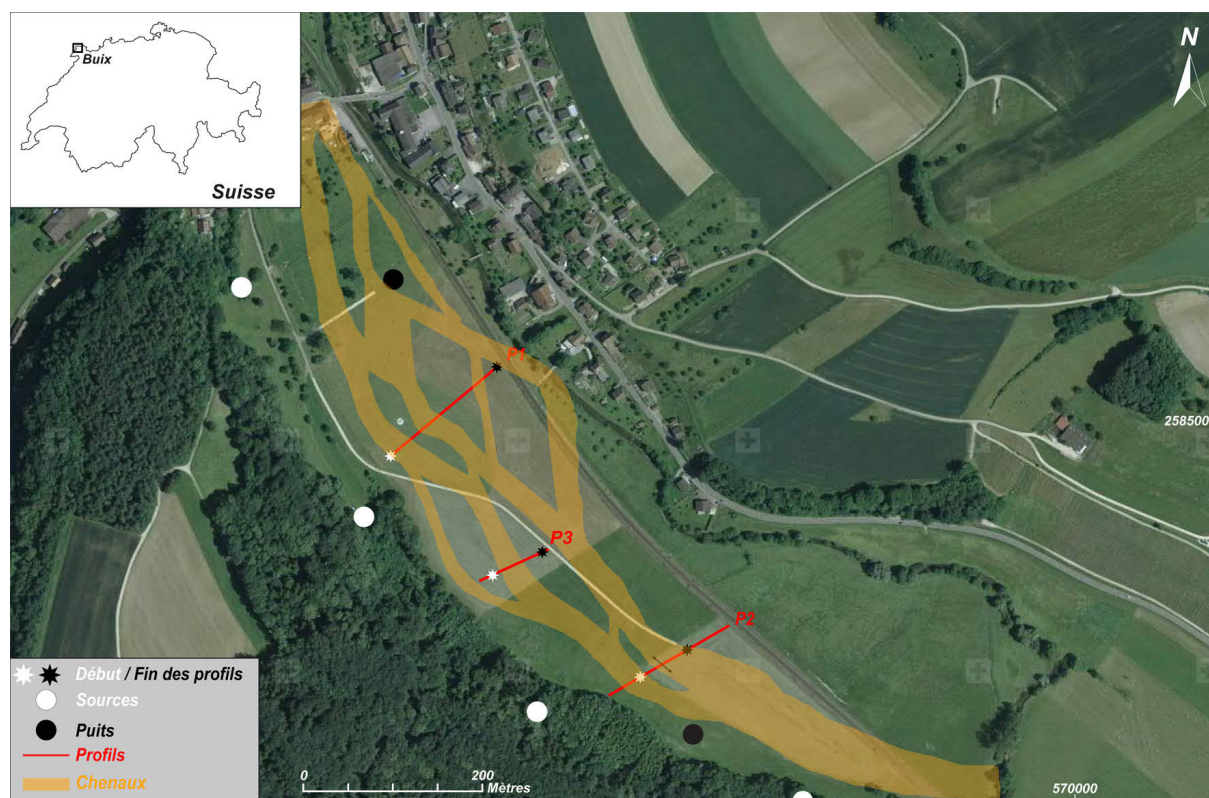


FIGURE 5.17 – Positions des profils étudiés et structure supposée des chenaux de la plaine de la Buix d'après Petitjean (2011). *Source : Office fédéral de topographie*

### 5.4.2 Méthodes géophysiques classiques

Comme mentionné brièvement précédemment, ce terrain est étudié depuis des années comme terrain d'étude pour les étudiants en hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel. Un nombre incalculable de mesures ont donc été menées et la structure de cette plaine est donc très bien connue. Malheureusement, la faible fiabilité des mesures effectuées par les étudiants, le mauvais archivage, les incertitudes sur la qualité des mesures et de leur positionnement n'ont pas permis d'utiliser cet ensemble de données. Ainsi, le travail de Petitjean (2011) permettant de déterminer une carte des chenaux est à considérer avec prudence. De plus, la précision des mesures GPS était insuffisante pour permettre d'effectuer des profils superposés avec plusieurs méthodes dans le but de les comparer. C'est pourquoi trois nouveaux profils ERT ont été effectués ici sur des profils approximativement perpendiculaires à la direction de l'écoulement, donc à la structure. Sur ces trois mêmes profils, des profils avec les null-arrays ont également été effectués.

Une seule ERT a été effectuée ici sur le profil *P1* (voir la Fig. 5.16 pour la localisation). Le résultat de cette ERT est montré sur le Fig. 5.18. Le 0 m se situe du côté Sud-Ouest du profil. Les chenaux, qui apparaissent en jaune-vert sur la figure, ont une épaisseur d'environ 10 m et se trouvent ici à une profondeur d'environ 5 m mètres. Trois chenaux sont dénombrables, sans compter deux structures potentielles à chaque extrémité du profil. Le contraste électrique latéral, donc entre les chenaux et les "non-chenaux" à même profondeur, est entre 2 et 3 (environ 75-100  $\Omega m$  pour la valeur la plus basse et entre 200-300  $\Omega m$  pour la plus haute). Une petite perturbation résistive apparaît en surface à environ 30 m, qui pourrait être due à la conduite souterraine.

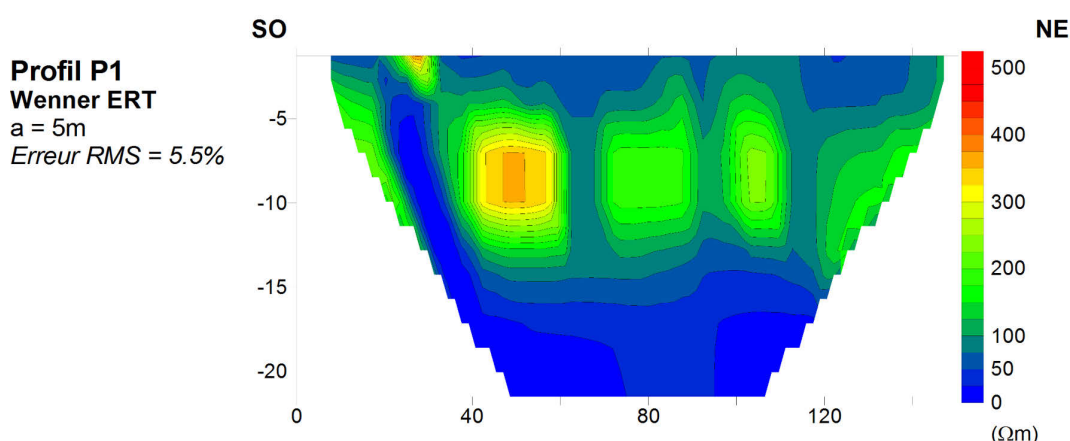


FIGURE 5.18 – Wenner ERT sur le profil *P1* à Buix avec un espacement des électrodes de  $a = 5 m$ . Le début du profil est au Sud-Ouest. Les résistivités sont données en  $\Omega m$ , la position et la profondeur sont en  $m$ .

Une Wenner ERT et une dipôle-dipôle ERT ont été effectuées sur le profil *P2*, montrés sur la Fig. 5.19. La structure montrée ici est légèrement différente de celle du profil *P1*, qui pourrait être interprétée comme deux larges chenaux séparés par une distance d'environ 10 m. Un tel résultat serait plus ou moins en accord avec la position des chenaux proposés dans la Fig. 5.17. Cependant, les formes trop "horizontales" de ces "chenaux", additionnées au fait que la conduite souterraine passe au mètre 70 sur profil d'après la Fig. 5.16, portent plutôt à croire qu'il s'agit d'une structure tabulaire sans chenal particulier, traversé par cette conduite. Cette deuxième solution apparaît plus plausible également en considérant le contraste électrique, qui est net et plus élevé que dans le cas du profil *P1*. Dans tous les cas, le contraste électrique latéral est ici d'environ 4 d'après la Wenner ERT (environ 75  $\Omega m$  pour la valeur la plus basse et environ 300  $\Omega m$  pour la plus haute).

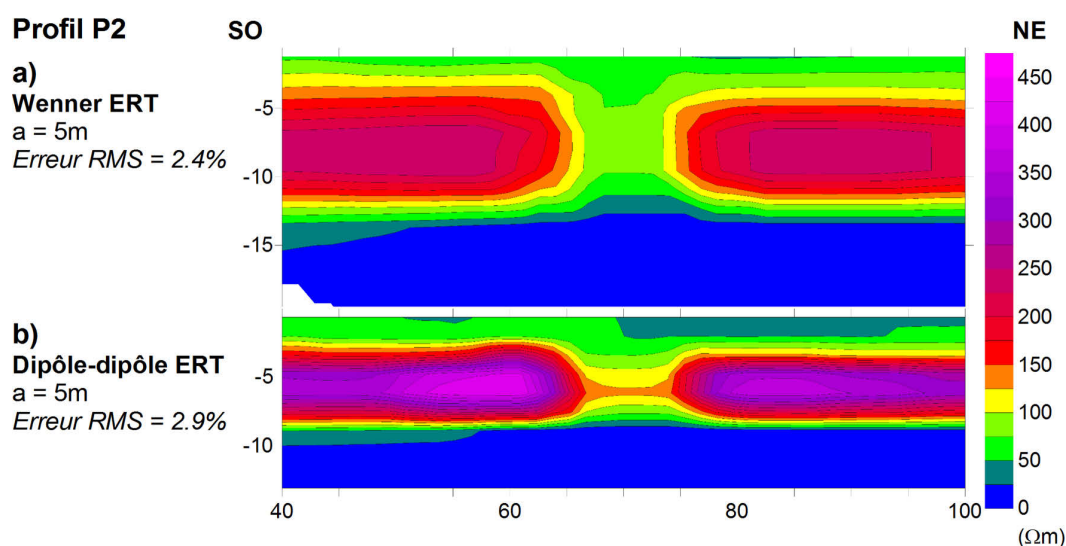


FIGURE 5.19 – a) Wenner et b) dipôle-dipôle ERT sur le profil *P2* à Buix avec un espacement des électrodes  $a = 5m$ . Le début du profil est au Sud-Ouest. Les résistivités sont données en  $\Omega m$  et la position et la profondeur sont en  $m$ .

Une Wenner ERT et une dipôle-dipôle ERT ont été effectuées sur le profil *P3*, montrés sur la Fig. 5.20. Sur ces profils, comme attendu d'après la carte des chenaux, un chenal semble apparaître sur la Wenner ERT, alors que ce chenal est moins facilement identifiable sur la dipôle-dipôle ERT. Le contraste électrique latéral est ici d'environ 2 d'après la Wenner ERT (environ 150  $\Omega m$  pour la valeur la plus basse et environ 300  $\Omega m$  pour la plus haute).

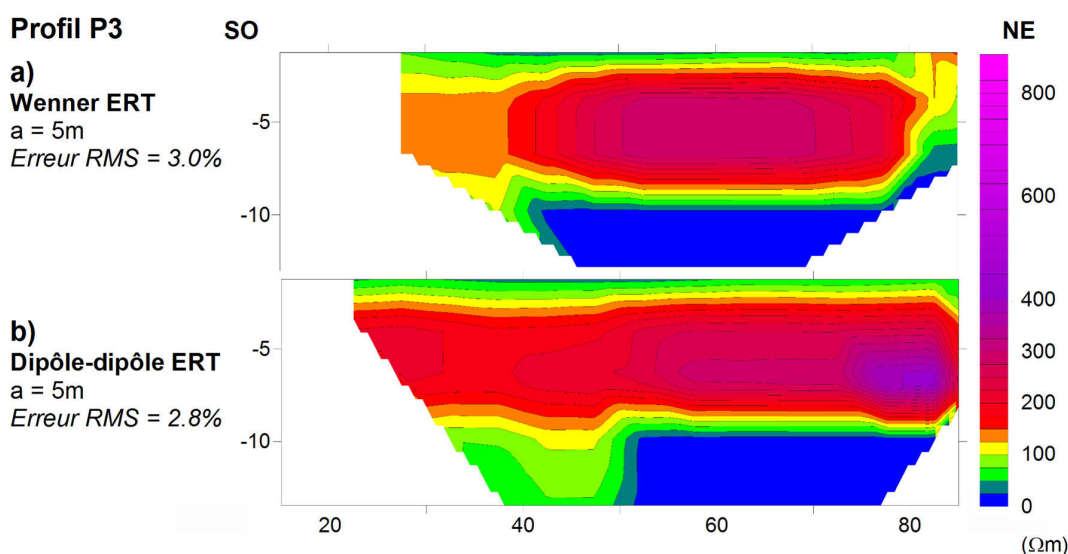


FIGURE 5.20 – a) Wenner et b) dipôle-dipôle ERT sur le profil  $P3$  à Buix avec un espacement des électrodes  $a = 5m$ . Le début du profil est au Sud-Ouest. Les résistivités sont données en  $\Omega m$  et la position et la profondeur sont en  $m$ .

### 5.4.3 Profils avec les null-arrays

Les trois profils ont été effectués avec le Sna, alors que seulement les profils  $P2$  et  $P3$  ont été faits avec le W $\gamma$ na. Aucun n'a été fait avec le MAN, puisqu'il a déjà prouvé son faible potentiel en détection de structure. Un des plus grands challenges pour les null-arrays est d'être suffisamment sensible pour détecter des faibles contrastes électriques, comme c'est le cas ici entre les chenaux et le milieu alluvionnaire environnant. Le contraste résistif dépend principalement de deux paramètres : le contraste des valeurs de résistivités électriques et l'expansion spatiale de la zone de transition. Ce deuxième paramètre est donc plus difficile à quantifier.

Le profil  $P1$  a été uniquement effectué avec le Sna avec une longueur de dispositif de  $20m$  et offset d'environ  $45^\circ$  par rapport à la direction du profil et donc aussi par rapport à la direction supposée des chenaux (Fig. 5.21). Les deux pics principaux juste avant et après  $20m$  sur le profil pourraient être liés à la conduite, qui forme cette anomalie résistive en surface sur l'ERT, montrée sur le Fig. 5.18. Si tel est le cas, il faut alors noter que la conduite se comporte comme une structure de cavités, puisqu'elle est identifiée par un minimum entre deux pics, théoriquement symétriques. Ceci pourrait s'expliquer par une asymétrie de la conduite, qui ne serait pas horizontale ou qui pourrait être coudée. Ou alors ces deux pics pourraient aussi être provoqués par les limites de deux chenaux, les pics correspondant aux limites de deux chenaux successifs. Quelle que soit l'interprétation, le rapport entre les résistivités, dans ce cas, est supérieur à 6, avec une valeur la plus faible aux alentours de  $25\Omega m$  et une valeur maximum aux environs de  $150\Omega m$ .

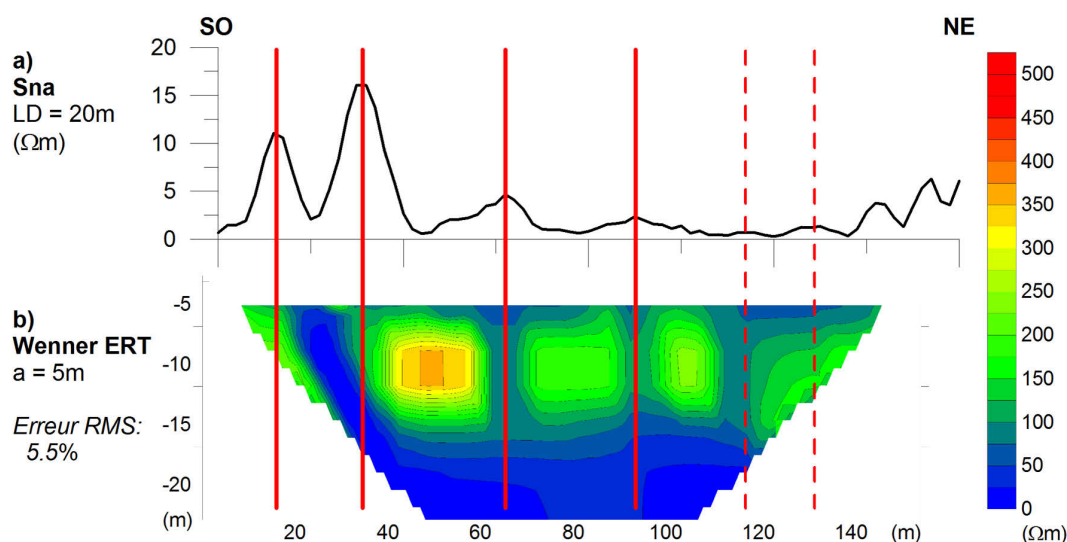


FIGURE 5.21 – Profil  $P1$  à Buix étudié avec a) une Wenner ERT ayant un espacement des électrodes de  $a = 5\text{ m}$  et b) un profil Sna avec une longueur de dispositif de  $20\text{ m}$ . Les lignes verticales montrent les positions où des anomalies sont détectées par le null-array.

Les deux pics suivants, aux environs de  $60\text{ m}$  et  $90\text{ m}$ , sont plus faibles à cause du contraste résistif plus faible, ce qui s'observe sur l'ERT. En effet, dans ce cas, le rapport est d'environ 2, avec une valeur minimum d'environ  $75\ \Omega\text{m}$  et une maximum d'environ  $150\ \Omega\text{m}$ . La limite entre les deux chenaux, qui sont plus larges que la distance les séparant, peut ici avoir un comportement proche de celui d'une faille, où les chenaux représenteraient alors la structure "normale". Ces limites sont alors détectées par un pic.

Deux pics très faibles sont observés vers les  $120\text{ m}$  et pourraient correspondre à un dernier chenal. Malheureusement, l'ERT ne permet pas de vérifier ce résultat. Le même problème apparaît pour les deux derniers pics après  $140\text{ m}$ , qui sont complètement en dehors de l'ERT.

Il faut noter que le signal est un peu bruité aux alentours des  $100\text{ m}$ . Cette position correspond exactement à l'endroit où le profil traverse la ligne électrique aérienne, qui semble ainsi générer quelques signaux parasites.

L'interprétation de ces profils, dans un milieu peu contrasté, semble ainsi possible mais difficile, puisque l'identification des signaux n'est pas très claire lorsque le contraste est faible. Par contre, les structures anthropiques, comme la conduite, sont beaucoup plus faciles à détecter.

Le profil  $P2$  a été investigué avec le Sna et le  $W\gamma\text{na}$ , avec deux longueurs de dispositif de  $10\text{ m}$  et  $20\text{ m}$  pour  $W\gamma\text{na}$  et seulement avec  $10\text{ m}$  pour le Sna. Un offset d'environ  $45^\circ$  par rapport à la direction du profil, et donc la direction présumée des chenaux, est toujours appliquée.

Le  $W\gamma\text{na}$  et le Sna ont donné ici un pic net à  $70\text{ m}$ , correspondant certainement à la position de la conduite, montrée sur la Fig. 5.22.

Un autre pic apparaît aussi aux environs de 45 m, qui pourrait correspondre à une limite entre deux chenaux, d'après la Fig. 5.17. Mais cette transition n'apparaît pas sur la Wenner ERT alors qu'elle serait plausible sur la dipôle-dipôle ERT, mais avec un contraste extrêmement faible. Ce signal doit alors être dû à une autre structure, mais dont l'interprétation n'est pas possible ici.

Un dernier pic, très faible, apparaît autour de 95 m et se retrouve sur les deux ERT, à une zone de transition avec des très faibles contrastes et gradient latéraux de résistivité. Cette partie peut correspondre à des zones différenciées à l'intérieur même du chenal. En comparaison avec la carte des chenaux, cette zone peut correspondre à la fin du chenal.

Comme montré sur le profil *P1*, l'interprétation de profils avec des faibles contrastes résistifs paraît compliquée et délicate, surtout lorsque des structures anthropiques sont également présentes et provoquent, elles, des signaux nets et clairement identifiables.

Les deux profils null-arrays sur le profil *P3*, effectués avec le  $W\gamma na$  et le *Sna*, montrent un pic principal à environ 72 m. Cette position correspond encore une fois à celle de la conduite.

Les deux autres pics, juste avant et juste après 50 m, sont moins faciles à interpréter, puisqu'ils ne correspondent pas entre eux et ne correspondent a priori à aucune structure d'après les deux ERT. Néanmoins, ces deux pics pourraient correspondre à une limite entre les chenaux d'après les ERT. Ce résultat semble se vérifier sur la Wenner ERT alors qu'il n'est pas flagrant sur la dipôle-dipôle ERT. Si tel était le cas, la carte des chenaux serait alors fautive dans cette région de la plaine.

Un pic plus faible apparaît à 60 m seulement pour le *Sna*, mais rien n'apparaît sur le profil du  $W\gamma na$ . A cette position, d'après les ERT, aucune structure n'est visible et il est alors difficile de comprendre et d'interpréter ce signal. Quoiqu'il en soit, ce signal paraît malgré tout réel, et n'est pas une erreur de mesure ou du bruit, puisqu'il est présent pour les deux longueurs de dispositif.

Un dernier pic, faible, apparaît pour les deux profils null-arrays aux alentours de 30 m. Bien que cette position n'est pas censée correspondre à une structure connue, elle a néanmoins été choisie pour effectuer la mesure azimutale, étant la plus éloignée du pic correspondant à la conduite et évitant ainsi au maximum une influence de cette dernière.

Comme pour les deux premiers profils, l'interprétation des profils avec les null-array sur une structure en chenaux est délicate. Les structures anthropiques - dans ce cas la conduite - produisent toujours les signaux principaux sur ce genre de mesures alors que les structures naturelles, comme ici les chenaux, avec des contrastes résistifs beaucoup plus faibles, produisent des signaux à peine visibles.

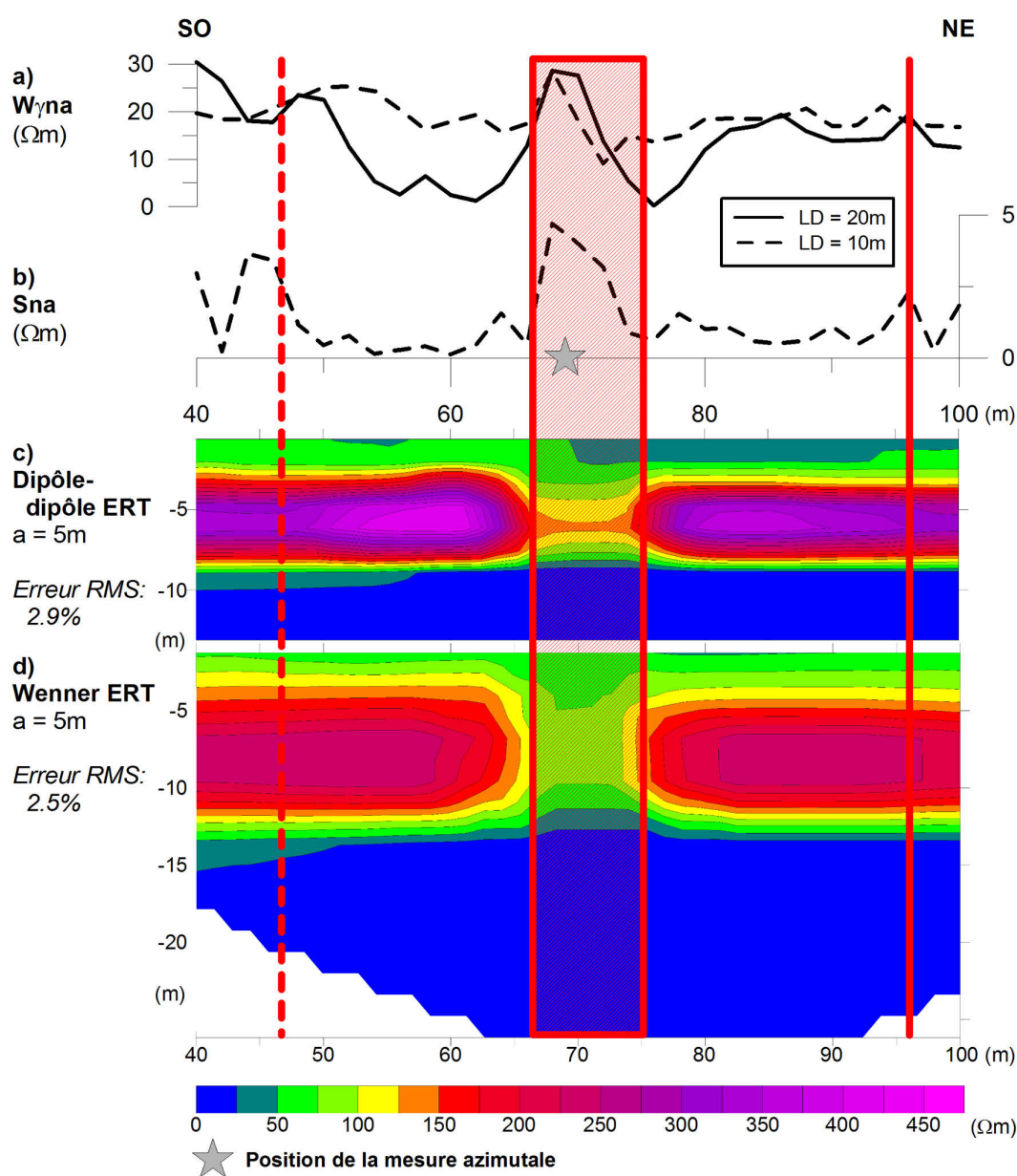


FIGURE 5.22 – Profil  $P2$  à Buix effectué avec a) un  $W\gamma_{na}$ , b) un  $S_{na}$ , d) une Wenner ERT et d) une dipôle-dipôle ERT. Les ERT ont un espacement des électrodes de  $a = 5m$  et les null-arrays ont été effectués avec deux longueurs de dispositif pour le  $W\gamma_{na}$  ( $LD = 10m$  et  $LD = 20m$ ) et une seule pour le  $S_{na}$  ( $LD = 10m$ ). Le rectangle rouge hachuré représente la zone entre les chenaux et les lignes rouges pleines et traitillées montrent d'autres anomalies détectées par les null-arrays. L'étoile grise donne la position où la mesure azimutale a été effectuée.

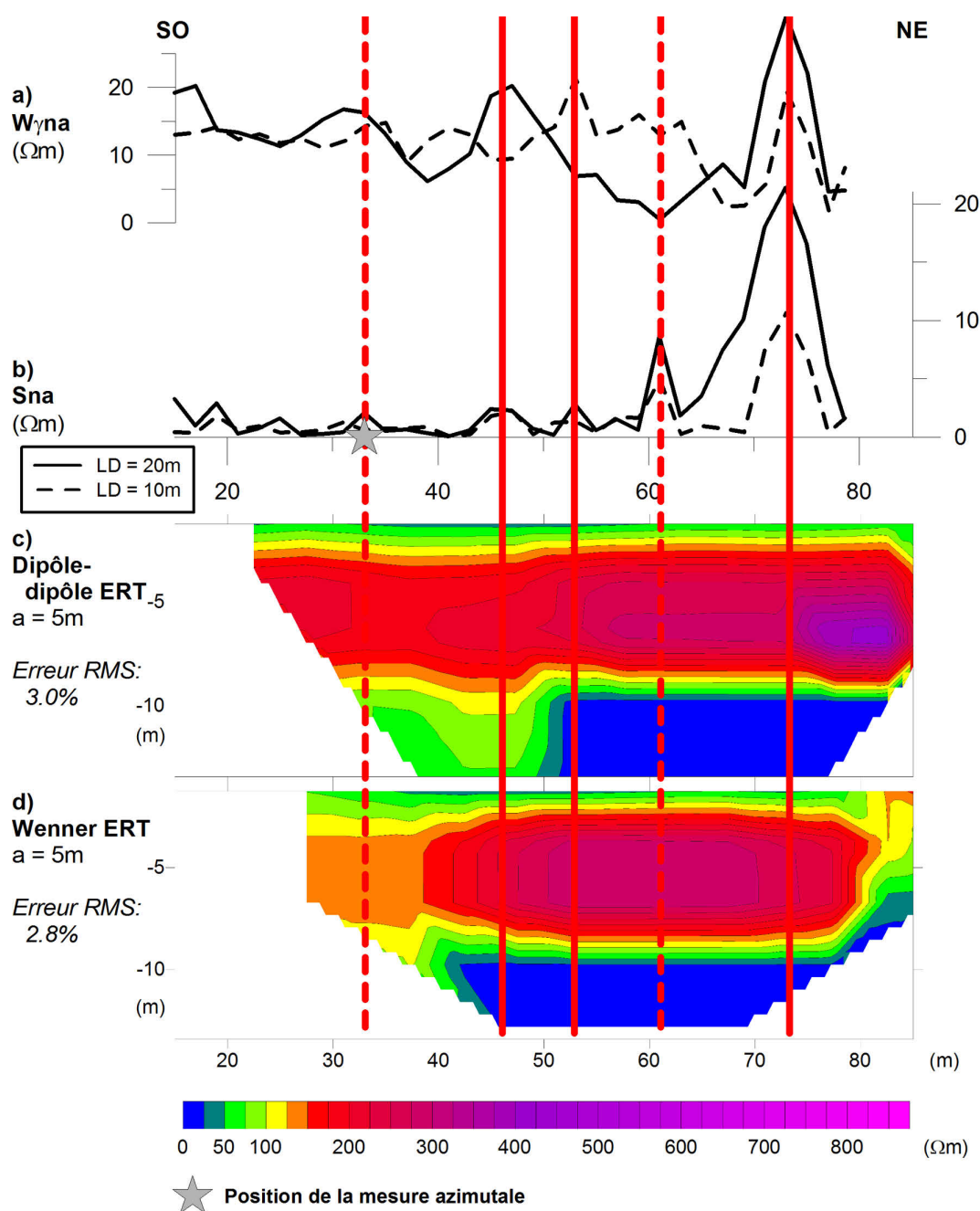


FIGURE 5.23 – Profil  $P2$  à Buix effectué avec a) un  $W\gamma_{na}$ , b) un  $S_{na}$ , c) une Wenner ERT et d) une dipôle-dipôle ERT. Les ERT ont un espacement des électrodes de  $a = 5\text{ m}$  et les null-arrays ont été effectués avec deux longueurs de dispositif,  $LD = 10\text{ m}$  et  $LD = 20\text{ m}$ . Les lignes rouges pleines montrent les anomalies détectées par les null-arrays, alors que les lignes rouges hachurées montrent les structures moins nettes détectées. L'étoile grise montre la position de la mesure azimutale.

En considérant les courbes mesurées avec le Sna sur la Fig. 5.21, il paraît clair que les amplitudes des signaux dépendent de plusieurs paramètres propres à la structure, pour une configuration donnée. Le contraste résistif est le plus important parmi ces paramètres et comprend deux aspects physiques : le d'une part le rapport de résistivités entre les deux milieux et d'autre part le gradient de résistivité. D'autres paramètres jouent aussi un rôle, comme la géométrie, donc les dimensions, de la perturbation ou encore sa profondeur.

La structure observée au profil *P1* a été simulée après le mesure sur le terrain, en reprenant approximativement les mêmes paramètres. Les résultats apparaissent dans l'annexe C.7. Cette simulation montre que le signal obtenu avec le null-array sur le profil *P1* semble correspondre à une interprétation en chenal, et que la conduite ne semble alors pas trop perturber la mesure, ce qui est difficilement compréhensible.

#### 5.4.4 Mesures azimutales avec les null-arrays

Seulement deux mesures azimutales ont été effectuées à Buix, et aucune sur le profil *P1*. La première mesure azimutale avec les null-arrays a été effectuée à environ  $69\text{ m}$  sur le profil *P2*, montré avec une étoile grise sur la Fig. 5.22. D'après l'ERT, cette position était censée se situer entre deux chenaux. Malheureusement, la compréhension de correcte n'est venue qu'après la mesure, qui a donc été effectuée sur la conduite qui traverse et sépare un unique chenal. Quoiqu'il en soit, la mesure azimutale a permis de déterminer la direction de cette conduite. D'après la carte de la Fig. 5.16, la position des mesures azimutales est située exactement sur la conduite et sa direction est environ  $N130^\circ$ . La Fig. 5.24 montre le résultat pour les deux configurations différentes, le Sna et le MAN, effectués avec deux longueurs de dispositif. La ligne grise donne la direction ainsi déterminée par les mesures.

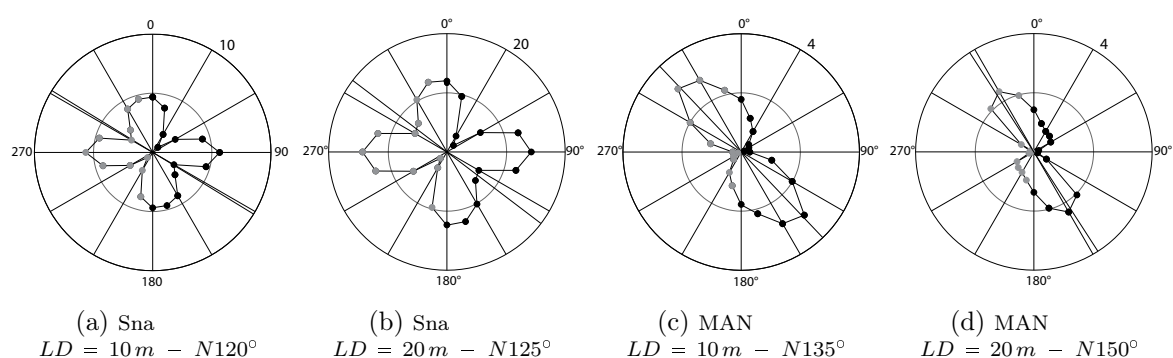


FIGURE 5.24 – Mesure azimutale avec les null-arrays sur le profil *P2* à Buix pour différentes longueurs de dispositifs ( $LD$ ), avec a) le Sna  $LD = 10\text{ m}$ , b) le Sna  $LD = 20\text{ m}$ , c) le MAN  $LD = 10\text{ m}$  et d) le MAN  $LD = 20\text{ m}$ . La ligne grise montre le direction déterminée de la structure, ici la conduite. Les valeurs externes sont en  $\Omega\text{m}$  et la valeur au centre est zéro.

Les Sna donne la même direction avec les deux longueurs, puisque des directions entre  $N120^\circ$  et  $N125^\circ$  sont estimées de ces données. Le choix de la direction est fait avec les données du MAN. La force du signal est environ deux plus grande pour le grand dispositif ( $LD = 20\text{ m}$ ) que pour le petit ( $LD = 10\text{ m}$ ).

Le MAN donne des résultats moins précis, mais qui concordent avec la direction supposée et attendue, et avec les résultats du Sna. Les directions estimées sont entre  $N135^\circ$  et  $N150^\circ$ . Ces différences peuvent être dues aux effets des chenaux, mais aussi à l'électrode "infinie"  $B$  du MAN<sup>3</sup>.

Comme dans la section des Breuleux (section 5.2), le Sna devrait alors être utilisé pour ajouter de la précision à la mesure déterminée par le MAN, qui permet de décider entre les deux directions perpendiculaires données par le Sna.

Le seconde mesure azimuthale avec les null-arrays a été effectuée à environ  $32\text{ m}$  sur le profil  $P3$ , montré avec une étoile grise sur la Fig. 5.23. D'après l'ERT, cette position est supposée être en dehors d'un chenal et loin de la conduite, pour éviter au maximum une perturbation de celle-ci. Cette mesure azimuthale est particulièrement difficile à interpréter et ne permet pas de déterminer de direction pour les chenaux.

D'après la carte de la Fig. 5.16, le chenal à côté a une direction supposée d'environ  $N165^\circ$  à cet endroit. La Fig. 5.25 montre les résultats de cette mesure, pour deux configurations - le MAN et le Sna - et deux longueurs de dispositif -  $LD = 10\text{ m}$  et  $LD = 20\text{ m}$ . Les lignes grises donnent les directions déterminées à partir ces mesures.

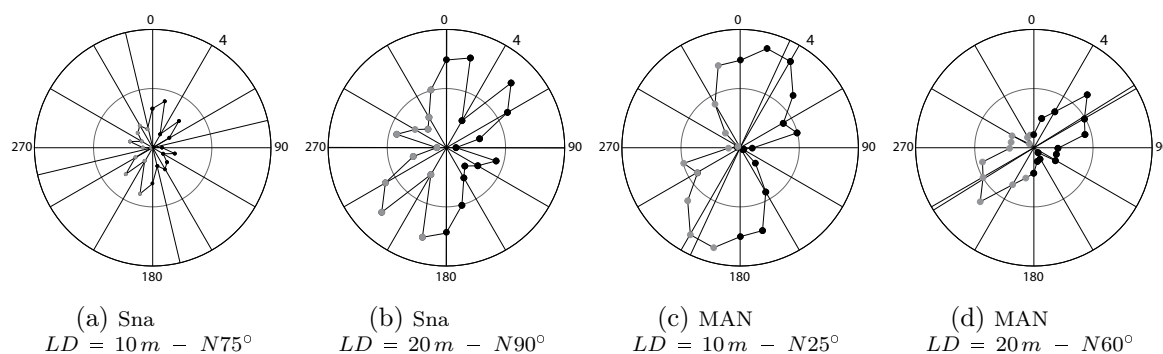


FIGURE 5.25 – Mesure azimuthale avec les null-arrays sur le profil  $P3$  à Buix pour différentes longueurs de dispositifs ( $LD$ ), avec a) le Sna  $LD = 10\text{ m}$ , b) le Sna  $LD = 20\text{ m}$ , c) le MAN  $LD = 10\text{ m}$  et d) le MAN  $LD = 20\text{ m}$ . La ligne grise montre le direction déterminée de la structure. Les valeurs externes sont en  $\Omega\text{ m}$  et la valeur au centre est zéro.

Les deux Sna donnent quasiment la même direction, une orientation d'environ  $N75^\circ$  à  $N90^\circ$ , ou leur perpendiculaire. Ici encore, la force du signal est environ deux fois plus grande pour le long dispositif,  $LD = 20\text{ m}$ , que pour le petit,  $LD = 10\text{ m}$ .

3. Cette électrode est située à environ  $400\text{ m}$ , au lieu de l'infini, dans la direction Sud-Est

Le MAN donne deux résultats qui ne sont pas en accord entre eux, et pas compatibles avec ceux obtenus avec le Sna. Les directions estimées sont alors  $N25^\circ$  et  $N60^\circ$ , pour le petit et long dispositif respectivement. Cette grande différence est difficile à comprendre. Il est possible que, en fonction de la taille du dispositif, les deux mesures soient sensibles à des éléments différents. Dans cette situation, il ne paraît alors pas possible de déterminer une direction claire, puisque toutes les directions obtenues sont différentes. Ce problème met en avant les limites de cette méthode, dans un milieu où le contraste électrique est certainement trop faible pour fournir des signaux suffisants et interprétables. Avec un faible contraste résistif en terme d'amplitude et un faible gradient résistif, les chenaux alluviaux ne produisent pas suffisamment de signal pour que les mesures avec les null-arrays soient utilisables, les mesures pouvant alors être influencées par des structures plus lointaines ou plus profondes, rendant ainsi la compréhension et l'interprétation des diagrammes impossible

#### 5.4.5 Conclusion sur les mesures de terrain à Buix

Sur un terrain de faible contraste résistif, les null-arrays ont montré leurs limites pour les applications de terrain. En effet, plus le rapport de résistivités est grand, plus le gradient de résistivité est grand, plus la taille de la perturbation est grande et plus la profondeur de la perturbation est faible, plus le signal sera grand. Ainsi, les null-arrays sont capables de détecter des structures anthropiques, qui sont généralement nettes et bien contrastées par rapport au milieu dans lequel elles se trouvent. Ils sont également capables de déterminer leur orientation, dans le cas où il s'agit de structures bidimensionnelles, comme des conduites.

Mais la détection de chenaux est beaucoup plus difficile, le signal généré par le contraste électrique entre les chenaux et le milieu dans lequel ils se trouvent étant faible. Certains chenaux semblent être détectables, alors que d'autres pas. La détermination de l'orientation de ces chenaux est elle quasiment impossible, ou nécessiterait une application plus précise des null-arrays, et peut-être aussi un choix de dispositif plus adapté en terme de configuration et de taille.

Pour les profils, seuls le  $W\gamma_{na}$  et le Sna ont été utilisés ici. Leur interprétation a été plus difficile que pour les deux premiers terrains. Bien que l'application des null-arrays sur la plaine de Buix soit aisée, le Sna est toujours beaucoup moins efficient et ne devrait peut-être plus être utilisé. Le  $W\gamma_{na}$  reste le meilleur dispositif à utiliser en profil, de par sa sensibilité, son interprétation et sa vitesse de mise en oeuvre sur le terrain.

Pour les mesures azimutales, appliquées sur les structures anthropiques, les résultats ont une fois de plus été déduit par le MAN, le Sna permettant alors d'ajouter un peu de précision à la mesure. Leur usage combiné est alors toujours recommandé pour un résultat précis et relativement rapide à mettre en oeuvre. Mais ces mesures azimutales n'ont pas permis de déterminer la direction des chenaux, car les mesures semblaient être plus sensibles à d'autres perturbations que les signaux provoqués par les chenaux.

La dimension du dispositif est toujours difficile à recommander, d'autant plus que les résultats n'étaient ici pas concluants. L'utilisation d'un grand dispositif paraît toujours préférable pour obtenir un résultat peu perturbé par les hétérogénéités de subsurface, le risque étant d'être influencé par des structures plus lointaines que celles recherchées. Sur ce terrain, où des espacements entre les chenaux étaient estimés entre  $10\text{ m}$  et  $20\text{ m}$ , un dispositif long de  $20\text{ m}$  donne a priori de meilleurs résultats qu'un plus court, comme par exemple  $LD = 10\text{ m}$ .

Ainsi, pour les profils, utiliser seulement le  $W\gamma$ na peut être suffisant. Le Sna peut confirmer les résultats, mais exige beaucoup de temps supplémentaire sur le terrain.

En mode azimutal, le Sna est hautement recommandé. Le MAN est aussi nécessaire pour permettre de déterminer la bonne direction, mais le cas où une direction grossière est connue ou attendue, son usage n'est pas forcément nécessaire. Une mesure azimutale avec le MAN étant très vite effectuée, il serait par contre dommage de s'en priver.

Les null-arrays ont donc montré leurs limites ici, où le faible contraste résistif n'a pas suffi à fournir un signal suffisant pour les null-arrays. Ces méthodes demeurent par contre utiles pour n'importe quelle structure anthropique, comme des conduites ou des lignes électriques enterrées.

Ici encore, avec un terrain faiblement contrasté latéralement en terme de résistivité, les null-arrays sont plus difficiles à interpréter, d'autant plus lorsque le terrain comporte des structures anthropiques comme c'était le cas ici. Les ERT donnent alors de meilleurs résultats pour l'identification des chenaux. Par contre, les ERT risquent d'être fortement perturbées par les structures anthropiques comme les conduites, et les null-arrays permettent alors de comprendre et de localiser précisément ces structures. L'utilisation conjointe des deux méthodes semble alors complémentaire. De plus, les mesures azimutales avec les null-arrays permettent toujours la détermination de l'orientation des structures anthropiques, même si elles ne semblent pas applicables pour les structures de chenaux (bien que cela n'ait pas été vérifié sur un terrain ne comportant pas de perturbation comme une conduite).



# DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

---

Les fractures jouent un rôle important pour les problèmes hydrogéologiques. Le fait d'être capable de les détecter et de les caractériser à petit échelle peut être un élément majeur à la compréhension de l'hydrogéologie d'un terrain. Des méthodes électromagnétiques comme le VLF permettent de détecter des fractures de relativement grande échelle, mais la détection de fractures secondaires est toujours très difficile. Bien que le problème spécifique des fractures et des structures subverticales demeurent une faiblesse des méthodes géoélectriques classiques, ces dernières permettent de lever un grand nombre d'incertitudes hydrogéologiques et de caractériser des structures stratifiées. La caractérisation des structures subverticales reste donc un défi majeur.

L'objectif de cette thèse était donc d'étudier une méthode géoélectrique alternative, appelée "null-arrays", dans le but de caractériser des fractures de plus petite échelle. Ces null-arrays sont des configurations géoélectriques particulières censées produire un signal nul sur une structure homogène. Ces méthodes permettent non seulement de détecter ces fractures, mais aussi de déterminer leur orientation. Des structures comme des conduits, des grottes ou des failles ont pu être caractérisées à l'aide de ces méthodes de surface. L'interprétation de ces données étant compliquées, il a été proposé de développer un catalogue de référence dans lequel la réponse des null-arrays a été obtenue par des simulations numériques sur des structures synthétiques typiques des milieux karstiques. Avec ce catalogue, une étude pratique a été menée, en utilisant des sites de référence avec des résultats connus, afin de tester l'applicabilité des null-arrays sur le terrain. Pour ceci, trois "null-arrays", a priori facile à mettre en place sur le terrain, ont été choisis. Ces null-arrays sont alors censés permettre la détection et la caractérisation des hétérogénéités (sub)verticales.

Ainsi, des mesures en profil et azimutales ont été simulées numériquement sur différentes structures synthétiques, afin de créer le catalogue de signaux de références qui permet d'éviter le processus d'inversion pour l'interprétation des données de terrain. L'utilisation de ce catalogue permet une interprétation quasi-directe, sans temps de traitement dû à l'inversion des données, comme c'est le cas pour les autres méthodes géophysiques. Ce catalogue a ensuite été utilisé pour interpréter les données de terrain de trois différents sites de référence. Sur chacun de ces terrains, des mesures en profil et azimutales ont été effectuées. Les profils ont permis de détecter des structures de petite échelle avec précision, alors que les mesures azimutales ont permis de déterminer l'orientation de ces structures.

Ces méthodes peuvent donc permettre d'identifier des fractures dans le cadre d'une application hydrogéologique spécifique, comme par exemple l'identification d'un site d'injection d'un essai de traçage ou la détermination de la direction des fractures pour mieux caractériser les écoulements.

## 6.1 Applicabilité des configurations et limitations

Sur les trois terrains d'étude présentés dans ce travail, trois null-arrays ont été testés et ont montré leurs aptitudes, limites, avantages et inconvénients. Pour tous ces terrains, ainsi que pour la plupart des structures synthétiques simulées, des structures verticales ou subverticales à deux dimensions sont supposées. Les null-arrays ont alors montré leur sensibilité et leur aptitude à les détecter et à déterminer leur orientation.

Le tableau 6.1 présente un résumé des avantages et désavantages des différents null-arrays utilisés dans les deux modes : profil et azimutal. Des couleurs aident à visualiser la qualité du null-array spécifique dans le mode correspondant. Les justifications de la qualité du null-array prend en compte la précision du résultat, la fiabilité du résultat, la facilité à appliquer le null-array et/ou la sensibilité aux perturbations extérieures.

Dans les paragraphes suivants, une discussion étendue est présentée, afin de confronter et résumer de manière systématique les avantages et désavantages des différents types de mesures et des différents aspects présentés dans ce travail de recherche.

### *Mesures en profil*

Localiser des structures subverticales, comme des failles ou des grottes, est une des aptitudes observées des null-arrays. En effectuant des mesures en profil avec ces dispositifs, il est possible de déterminer avec précision la position des structures bidimensionnelles. Pour effectuer un profil, il suffit de choisir un dispositif et sa dimension, et de le déplacer d'un pas, fixe ou

TABLE 6.1 – Résumé des avantages et désavantages des null-arrays. Le gris clair signifie que le null-array utilisé dans le mode correspondant (profil ou azimutal) est recommandable, le gris moyen qu'il est recommandable avec des limitations et le gris foncé qu'il n'est pas approprié.

	<b>Midpoint null-array</b>	<b>Schlumberger null-array</b>	<b>Wenner-<math>\gamma</math> null-array</b>
<b>Profil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interprétation des signaux difficile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bons résultats</li> <li>• Lent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rapide</li> <li>• Facile</li> <li>• Peu sensible à la taille du dispositif</li> </ul>
<b>Azimutal</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de paradoxe anisotropique</li> <li>• Bonne estimation de l'orientation</li> <li>• Rapide</li> <li>• Sensible aux perturbations anthropiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Résultats précis</li> <li>• Donne deux orientations</li> <li>• Besoin d'une information supplémentaire pour la détermination de l'orientation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Axe de l'ellipse difficile à identifier</li> <li>• Paradoxe anisotropique</li> </ul>

non. En représentant alors les variations latérales de ces mesures le long de la direction du profil choisi, il est alors possible de localiser les structures en se basant sur les simulations numériques pour l'interprétation des signaux. Il est par contre nécessaire que ces structures soient proches de la surface afin d'obtenir de bons résultats interprétables. En effet, lorsque ces structures sont trop profondes, comme c'était le cas de la structure en horst d'après les simulations, il n'était parfois plus possible d'obtenir de signal. Cela s'explique aisément par le fait que pour atteindre une plus grande profondeur, la taille du dispositif doit augmenter également. L'anomalie étudiée se perd alors dans un volume investigué également plus grand, ce dernier pouvant être conceptuellement assimilé à une demi-sphère de diamètre égal à la taille du dispositif.

Un problème majeur des mesures en profil avec les null-arrays est l'application d'un angle entre l'orientation du dispositif et la structure étudiée, appelé ici un "offset". En effet, si la mesure est effectuée sans connaissance préalable, il pourrait arriver qu'une structure ne soit pas détectée à cause d'une orientation malchanceuse, c'est-à-dire parallèle (et perpendiculaire pour le Schlumberger null-array), du dispositif par rapport à la structure, entraînant une mesure nulle en tout point. Lors de l'acquisition des données, un offset d'environ  $45^\circ$  est alors nécessaire afin d'assurer une valeur non-nulle, proche de la valeur maximale. Il faut alors, avant d'effectuer les mesures, soit déterminer un endroit où faire une mesure azimutale pour déterminer l'orientation recherchée, soit être capable sur la base d'autres informations, par exemple de cartographie géologique, d'estimer cette orientation.

De manière générale, le Wenner- $\gamma$  null-array s'est clairement illustré comme le meilleur null-array pour détecter des structures subverticales. Il est de plus rapide et relativement facile à mettre en oeuvre sur le terrain. Il est aussi peu sensible à la taille de son dispositif, puisqu'il a

donné les résultats les plus constants. Ce dernier point est bien sûr très important lorsque les dimensions et/ou profondeurs des structures étudiées ne sont pas connues.

Le Schlumberger null-array a aussi donné des résultats cohérents, même si ceux-ci n'étaient pas aussi bon que ceux du Wenner- $\gamma$  null-array. Malheureusement, sa mauvaise efficacité sur le terrain le rend moins recommandable pour des cas pratiques, d'autant plus que ses mesures sont moins constantes en fonction de sa taille, ce qui peut être gênant lorsque la structure étudiée est méconnue. Par contre, il paraît plus stable dans son comportement pour des structures plus larges, comme la grotte ou la structure en horst, pour lesquelles un décalage de la position des pics ne s'observe pas (contrairement aux autres dispositifs).

D'après les simulations et les tests sur le terrain, le midpoint null-array ne paraît pas recommandable pour les mesures en profil, l'interprétation de ses signaux étant particulièrement difficile, principalement dû au fait que seule la valeur absolue de la mesure est acquise. Si l'acquisition ne se faisait pas en valeur absolue, il pourrait alors être plus facilement interprétable et pourrait permettre d'amener des informations quant à la nature de la structure étudiée.

En comparaison aux tomographies électriques (ERT), les null-arrays permettent alors d'ajouter des informations sur des anomalies locales, comme des petites failles, aux mesures effectuées avec les ERT. Pour des structures où une limite nette existe, comme une structure de horst, les null-arrays permettent également de localiser avec une meilleure précision que les ERT la position de cette limite. Les null-arrays sont ainsi une méthode complémentaire de mesure.

### *Mesures azimutales*

Une fois les structures localisées, les null-arrays permettent de déterminer leurs orientations de manière bien plus sûre et précise que les méthodes géoélectriques classiques et que les méthodes électromagnétiques. Pour cela, il faut effectuer une mesure azimutale, où le dispositif tourne sur lui-même autour de son centre de symétrie. En représentant alors ces valeurs en fonction de l'orientation sur un diagramme polaire, la détermination de l'orientation de la structure se fait aisément en se basant sur les simulations numériques. Pour les null-arrays étudiés dans ce travail, le midpoint null-array apparaît être le meilleur, car lui seul ne subit pas de paradoxe anisotropique lié à sa position. Le paradoxe anisotropique est un phénomène physique mal connu et mal expliqué qui fait que le diagramme polaire peut pivoter de  $90^\circ$  en fonction de la position de la mesure par rapport à la structure. Le midpoint null-array semble ne pas y être sensible et donne ainsi toujours la même orientation. Bien qu'il ne donne pas le résultat le plus précis, il permet d'avoir une première estimation de l'orientation recherchée. Il est de plus très efficace car très rapide à effectuer sur le terrain. Ses seuls points faibles sont d'une part sa sensibilité à des perturbations anthropiques<sup>1</sup> mais surtout qu'une électrode infinie  $B$  doit être utilisée et plantée à plusieurs centaines de mètres de la mesure. Ce dernier point est

---

1. Il a en effet été observé sur le terrain qu'il était plus difficile d'obtenir un signal stable, sans bruit, proche d'une barrière électrifiée avec le midpoint null-array qu'avec les deux autres null-arrays.

problématique car, en fonction du terrain, il n'est pas toujours possible de réaliser cette exigence. Bien qu'il ne soit pas lié à la position de la mesure, une rotation du diagramme apparaît néanmoins sur toutes les mesures de terrain, due cette fois à l'erreur inévitable de positionnement des électrodes sur le terrain (et à l'usage de l'électrode infinie  $B$ ). L'interprétation de son diagramme azimutal se fait alors en choisissant le grand axe de l'ellipse comme étant la direction recherchée.

Pour ajouter de la précision à la mesure obtenue avec le midpoint null-array, le Schlumberger null-array, en mode azimutal, donne d'excellents résultats et est relativement rapidement effectué. Le seul problème de ce dispositif est qu'il donne deux directions perpendiculaires potentielles. Il est donc indispensable d'arriver à déterminer la direction correcte avec d'autres mesures, en l'occurrence le midpoint null-array, ou des observations de terrain. Dans ce cas, le diagramme polaire obtenu est composé de quatre lobes, la direction recherchée étant l'une des deux directions (perpendiculaires) données par les zéros.

Le Wenner- $\gamma$  null-array n'est clairement pas recommandé pour des mesures azimutales. En effet, ce dernier donne une ellipse dont la direction du grand axe et/ou du petit axe est difficile à déterminer avec précision, mais en plus change en fonction de la position de la mesure. Ce dispositif semble très sensible à son positionnement, ce qui rend son utilisation sur le terrain délicate.

#### *Profondeur d'investigation et taille du dispositif*

La profondeur d'investigation est également difficile à déterminer rigoureusement, même si au travers de ces études, une estimation reste possible. D'après les simulations, il apparaît que pour des longueurs de dispositifs comprises entre 5 et 20 m, les structures plus profondes que 6 à 10 m ne génèrent plus de signal utile. Cette estimation semble cohérente avec les tests sur les terrains, en particulier avec la grotte de Vers chez le Brandt. Des études supplémentaires seraient nécessaires pour assurer ce résultat et généraliser une relation pour les différents null-arrays.

Le problème de la profondeur est important et délicat à résoudre. En effet, en utilisant des dispositifs plus grands, la profondeur d'investigation sera bien sûr augmentée, mais le risque de mélange de structure augmente aussi. Comme cela a été simulé sur la structure en horst, un dispositif recouvrant différentes structures risque de donner un signal légèrement décalé par rapport aux positions recherchées et provoquera ainsi une fausse interprétation des données. D'un autre côté, en utilisant un dispositif trop petit, certaines structures, trop profondes, ne pourront générer aucun signal mesurable.

La discussion sur la profondeur d'investigation mène au choix du dispositif et de sa taille. Il est important d'effectuer toutes les mesures avec les divers dispositifs avec des tailles équivalentes, de manière à pouvoir comparer les différents signaux entre eux. Ceci est très important tant

pour les mesures en profil que pour les mesures azimutales. De plus, pour conforter les résultats, l'utilisation d'au moins deux longueurs différentes de dispositif est recommandée, surtout dans le cas de structures verticales comme des failles. Ce dernier point est aussi vrai dans le cas d'une grotte par exemple, mais pour des raisons différentes. Dans ce dernier cas, l'usage de plusieurs tailles assure qu'au moins une des longueurs de dispositif est capable de détecter la grotte. En effet, une structure de grotte sera invisible pour un dispositif trop grand ou trop petit.

Le choix du dispositif en lui-même est ainsi relié à la structure étudiée ou attendue. De ce fait, la géophysique classique est également nécessaire pour avoir une idée du sol et de la géométrie du sol étudié, même si la caractérisation plus précise n'est pas forcément possible avec ces méthodes classiques. La taille des dispositifs utilisés devraient alors être plus ou moins de la même dimension que l'échelle de la structure étudiée et approximativement deux fois plus grande que sa profondeur.

#### *Problèmes et limitations*

Comme cela a été énoncé jusqu'ici, plusieurs problèmes et/ou limitations sont donc à préciser quant à l'utilisation des null-arrays sur le terrain.

Dans un premier temps, le fait que le catalogue est effectué sur la base de structures idéales, avec une liste non-exhaustive de structures, constitue la principale faiblesse de la méthodologie utilisée. Des cas réels plus complexes ou d'autres structures non simulées ne sont ainsi pas détectées par les résultats de cette recherche. Dans le futur, d'autres structures pourraient donc être étudiées de la même manière, afin de compléter le catalogue de signaux de référence. Ce dernier pourrait aussi être complété en choisissant d'étudier d'autres null-arrays que les trois choisis.

Pour l'utilisation des null-arrays sur le terrain, il faut rappeler que ces méthodes sont très efficaces pour des structures de subsurfaces de petite échelle. Si les sujets étudiés sont trop profonds, ces méthodes deviennent difficiles à mettre en oeuvre. Dans ce travail, les structures étudiées sur le terrain se situaient à un maximum d'environ 10 ou 15 m de profondeur. De manière générale, pour les null-arrays, espérer une profondeur maximum de 20 ou 30 m paraît déjà ambitieuse pour des structures verticales, alors que cette valeur maximum serait plutôt autour des 5 ou 10 m pour des structures comme une grotte. Cette limite dépend bien sûr aussi de la place à disposition en surface pour installer les dispositifs et effectuer les profils, et de l'homogénéité ou hétérogénéité du milieu dans lequel la structure se trouve.

Une autre contrainte est qu'il est nécessaire d'avoir une idée préalable de la nature de la structure étudiée. Comme il a été montré, il paraît possible d'identifier des structures à l'aide des null-arrays, mais les identifier uniquement à l'aide des null-arrays demeure risqué et donnera un résultat discutable. Il est alors nécessaire d'effectuer des mesures préalables avec d'autres

méthodes géophysiques traditionnelles. Le problème des null-arrays est qu'un offset doit être appliqué lors d'une mesure en profil afin d'éviter une mesure nulle. Il faudrait donc effectuer une mesure azimutale afin de déterminer les orientations. Mais à l'inverse, une mesure en profil doit être effectuée pour déterminer la position où la mesure azimutale doit être faite. D'autres études préalables, géophysiques ou géologiques, sur la structure étudiée sont donc indispensables à la bonne utilisation des null-arrays sur le terrain.

Un autre problème important est la sensibilité apparente de ces méthodes aux structures anthropiques, qui avec leur fort contraste électrique risquent de faire disparaître les signaux générés par les structures naturelles étudiées. De plus, ces structures naturelles sont souvent plus complexes que les structures synthétiques utilisées pour l'analyse des résultats.

Quant à l'application sur le terrain, ces méthodes demandent beaucoup de temps en comparaison à d'autres méthodes existantes, comme les méthodes électromagnétiques. Elles ne peuvent alors être utilisées que sur de petites échelles afin d'éviter une perte trop importante de temps de travail. Il est alors recommandable d'utiliser ces méthodes combinées à des méthodes classiques plus rapides, afin de limiter au maximum la zone d'étude.

## 6.2 Perspectives

Cette étude a finalement poursuivi plusieurs pistes tout en ouvrant de nouvelles. Dans un premier temps, les null-arrays semblent pouvoir jouer un rôle complémentaire aux mesures géophysiques classiques, avec une haute sensibilité et précision de mesure. Dans un second temps, ce travail a amené de nouvelles questions et problématiques sur le comportement de ces null-arrays.

Ce travail a donc été restreint à trois null-arrays différents et à un choix de huit structures synthétiques. Il serait alors intéressant de poursuivre cet axe de recherche en étudiant d'autres null-arrays qui pourraient peut-être apporter d'autres informations sur les structures étudiées. Mais surtout, il paraît primordial d'étendre l'étude à d'autres structures afin d'étoffer le catalogue de référence. Il faudrait alors définir d'autres configurations géologiques fréquemment rencontrées en hydrogéologie afin d'augmenter la quantité de structures de références. Des structures plus complexes pourraient également être ajoutées, avec des structures "mélangées", des structures imparfaites, ou simplement du bruit et des erreurs de mesure. L'étude numérique du comportement des null-arrays sur des modèles karstiques synthétiques obtenus sur la base de calculs stochastiques pourrait également être intéressant et étoffer la liste.

Certaines questions spécifiques mériteraient une étude plus approfondie, comme par exemple :

- Est-ce que le comportement du midpoint null-array avec des mesures en profil sur une structure à deux zones et le shift du pic mesuré qui semble être d'une distance égale à une demi longueur du dispositif est généralisable et donc applicable sur le terrain ?
- Sur des structures avec une expansion spatiale latérale, comme la grotte, à quel moment la mesure détecte-t-elle une seule structure (la grotte et le reste) ou l'expansion de la grotte en elle-même (le passage du milieu à la grotte, puis de la grotte au milieu) ?

Les paragraphes suivants discutent des perspectives détaillées pour certains aspects spécifiques identifiés lors de ce travail.

#### *Paradoxe anisotropique*

Il serait essentiel d'approfondir la compréhension du paradoxe anisotropique, afin d'étudier les circonstances qui le provoquent, dans le but d'arriver à expliquer le phénomène, et peut-être ainsi à le prédire. Les études menées ici ont déjà donné quelques indices, mais un travail systématique qui se concentre spécifiquement sur ce problème en affinant les distances entre le dispositif et la structure semblerait approprié. Le positionnement des différentes électrodes composant le dispositif par rapport à la structure étudiée semble être une bonne piste, en particulier la position des électrodes de potentiel  $M$  et  $N$  par rapport à la structure.

Dans le même ordre d'idée, il serait intéressant d'arriver à trouver une explication complète du paradoxe anisotropique dans le cas du midpoint null-array et du midpoint null-array modifié. Arriver à simuler ce comportement et trouver une explication et une compréhension physique à ce phénomène constituerait une avancée certaine.

#### *Amplitude des signaux*

Les amplitudes des signaux dépendent de plusieurs paramètres : la taille du dispositif en lui-même, la taille de la structure perturbante, la profondeur de cette structure, le contraste de résistivité électrique entre cette structure et le milieu dans lequel elle se trouve, la distance latérale entre la structure et le dispositif, etc. Il serait alors intéressant, pour une structure donnée, simple dans un premier temps, d'étudier séparément l'effet de ces paramètres sur l'amplitude du signal mesuré. Il serait alors possible de déterminer des lois, même empiriques, de limite de profondeur d'investigation ou de limite de détectabilité d'une structure.

### *Profondeur d'investigation*

Dans le même ordre d'idée, il serait aussi indiqué de se concentrer spécifiquement sur la profondeur d'investigation pour différents dispositifs null-arrays. Que l'approche soit numérique ou analytique, il paraît important de quantifier cette profondeur, de déterminer si un maximum de sensibilité existe à une profondeur donnée, ou si un seuil de détectabilité est définissable. Toutes ces questions rejoignent des travaux déjà effectués par le passé pour les méthodes classiques, à la différence que l'approche alors utilisée ne fonctionne plus dans le cas des null-arrays pour des raisons mathématiques.

### *Correction du bruit du maillage*

L'utilisation d'un logiciel d'hydrodynamique souterraine pour effectuer des simulations géoélectriques est un procédé facilitant la construction de modèles géologiques et l'implémentation des divers dispositifs de mesures. Les signaux générés par les null-arrays étant faibles, les résultats des simulations peuvent être faussés par des effets du maillage, comme ses limites ou la taille de ses éléments. Une technique a donc été développée pour corriger ces divergences. L'optimisation de cette correction est un sujet intéressant qui pourrait être étendu à tout type de simulations. Cette correction permet d'une part d'éviter le traitement de modèles numériques trop lourds et trop exigeants en temps de calcul, et d'autre part d'éviter un travail minutieux de raffinement à chaque simulation.

Il pourrait ainsi être intéressant de développer cette approche à l'avenir, puisqu'elle pourrait apporter des gains de temps et de précision dans le domaine de simulation numérique. Il serait utile de pousser l'étude, voir les limites de la justesse de cette correction, et d'arriver à évaluer une résolution minimale nécessaire pour que les résultats puissent être suffisamment précis.

### *Outils pratiques*

Finalement, des outils pratiques pourraient également être développés afin d'améliorer le temps d'acquisition, qui est pour l'instant très élevé. Par exemple un système automatique de mesure, dans le cas où cela est possible à mettre en place, ou simplement des outils mécaniques pour optimiser le temps de déplacement des électrodes. Le temps nécessaire pour effectuer un profil ou une mesure azimutale est actuellement trop élevé pour que ces méthodes deviennent un outil standard de la géophysique.

## 6.3 Conclusions

Malgré le fait que les questions ouvertes au cours de ce travail de recherche sont plus nombreuses que les réponses apportées, il a été montré que les null-arrays peuvent être une technique efficace pour la détection de structures de subsurface, en particulier des structures subverticales comme des failles à petite échelle. La sensibilité et la résolution de leur détection à l'aide des null-arrays semblent meilleures qu'avec les techniques classiques, bien que le temps d'acquisition des mesures soit nettement supérieur. De plus, la détermination de l'orientation des failles est aisément applicable sur le terrain. Une conclusion à en tirer est que si la problématique hydrogéologique nécessite la caractérisation précise de fractures, cette approche combinée avec d'autres méthodes géophysiques classiques peut être très puissante.

Bien que les null-arrays ne semblent pas très adaptés sur de grandes structures, où des méthodes électromagnétiques comme le VLF sont bien plus performantes, les résultats obtenus sur des structures plus petites, comme des petites fractures, montrent le grand potentiel de ces méthodes. De plus, le fait qu'à l'encontre des méthodes électromagnétiques ces méthodes soient capables de déterminer l'orientation d'une structure est un apport considérable. L'utilisation des null-arrays sur le terrain est relativement chronophage, mais cela pourrait être amélioré par le développement d'une automatisation de la méthode.

Cette thèse a donc apporté une approche systématique sur le comportement des trois null-arrays étudiés, qui étaient jusque là utilisés sporadiquement. Il a ainsi été possible d'évaluer les aptitudes, avantages et inconvénients des différents dispositifs et de déterminer lesquels utiliser en fonction de la situation. Il a par exemple été possible de montrer que le Wenner- $\gamma$  null-array est le plus approprié pour la localisation de fracture, alors que le midpoint null-array est le plus efficace pour la détermination de l'orientation de la structure, comme résumé dans le tableau 6.1. A travers les études numériques et les mesures de terrain, il a aussi été possible d'avoir une première idée de leur sensibilité et limitations, en terme de profondeur d'investigation et/ou des types de structures qu'il est possible d'étudier. Les null-arrays semblent ainsi être recommandable pour des structures de subsurface, de l'ordre d'une dizaine de mètres de profondeurs. Pour une plus grande profondeur, l'effet de perturbation extérieure au sujet étudié n'est pas exclue, comme le possible effet du mur de la carrière des Breuleux. Pour une faible profondeur (moins d'un mètre), l'effet des hétérogénéités du sol et du contact des électrodes pourraient être trop importants.

Comme pour toutes méthodes géophysiques, certaines limitations liées au terrain investigué apparaissent inévitablement. La structure investiguée doit être suffisamment contrastée avec son milieu environnant, elle ne doit pas être trop profonde et les perturbations anthropiques, comme des conduites métalliques par exemple, doivent être évitées.

Qu'il s'agisse de localiser des zones d'infiltration ou d'exfiltration ou de déterminer la direction d'écoulement, l'hydrogéologie a toujours besoin de pouvoir caractériser au mieux les sols, et plus particulièrement les (familles de) failles. Les null-arrays étant a priori sensibles sur les quelques premiers mètres de profondeurs, avec un maximum situé entre 10 et 20 m, ces méthodes semblent particulièrement adaptées aux applications hydrogéologiques, et en particulier aux questions liées aux structures karstiques, dans la mesure où un terrain d'au moins 50 m sur 50 m est disponible en surface pour effectuer les mesures.

Par exemple, en milieu karstique, l'identification et la caractérisation de conduits karstiques ou de directions d'écoulements préférentiels est une question importante à laquelle les null-arrays pourraient apporter une part de réponse. Ces méthodes seraient d'une grande utilité pour la localisation de petites fractures, où il serait possible d'injecter un traceur en vue de faire un essai de traçage. De plus, la question de déterminer l'orientation générale d'écoulement serait peut-être envisageable avec les null-arrays, mais des études complémentaires seraient alors nécessaires. L'application de cette méthode pourrait également s'étendre à la géothermie de faible profondeur, tout aussi intéressée aux failles.

Les null-arrays permettent donc de localiser et caractériser des structures subverticales comme des fractures, de petite échelle. Ils permettent aussi la détermination de l'orientation de structures bidimensionnelles. Que ce soit pour la compréhension hydrogéologique d'un terrain ou pour la détermination d'un point d'injection pour un essai de traçage, la contribution des null-arrays pourrait être importante pour des problèmes spécifiques d'hydrogéologie.

Les null-arrays promettent ainsi un bel avenir à la géoélectrique de subsurface, en amenant de nouvelles perspectives d'études, de développements et d'applications.



# ABRÉVIATIONS

---

Ci-dessous, la liste des abréviations qui seront utilisées et expliquées dans ce travail :

<b>DD</b>	Dipôle-dipôle
<b>ERT</b>	Electrical Resistivity Tomography
<b>LD</b>	Longueur du dispositif
<b>MAN</b>	Midpoint null-array
<b>Sac</b>	Schlumberger array classique
<b>Sna</b>	Schlumberger null-array
<b>VES</b>	Vertical Electrical Sounding
<b>VLF</b>	Very Low Frequency
<b>VLF-EM</b>	Very Low Frequency Electro-Magnetic
<b>VLF-Grad</b>	Very Low Frequency Gradient
<b>W<math>\gamma</math>na</b>	Wenner- $\gamma$ null-array



# INDEX

---

- Abréviations, 139
- Analogie des théories hydraulique et électrique, 24
- Applicabilité, 128
- Azimutal, 16, 34
  
- Bibliographie, 146
- Bruit de maillage, 31
  
- Contexte géologique de Buix, 113
- Contexte géologique de Vers chez le Brandt, 100
- Contexte géologique des Breuleux, 83
- Contraste de résistivité, 28
- Correction du maillage, 30
  
- Dipôle-dipôle array, 17
- DOI, 62
  
- Electrical Resistivity Tomography, 16
- ERT, 16
  
- Facteur géométrique, 13
- Force du signal, 27
  
- GPR, 3
- Gravimétrie, 4
- Gravity method, 4
- Ground penetrating radar, 3
  
- Liste des figures, v
- Loi d'Ohm, 13
  
- Méthode gravimétrique, 4
- Méthodes électromagnétiques, 3
- Méthodes sismiques, 4
- MAN, 19
- Mesure azimutale, 16
- Mesures azimutales avec les null-arrays, 50
- Mesures de terrain, 79
- Midpoint null-array, 19
- Modélisation numérique synthétique, 33
- Modèle de simulation et effets du maillage, 27
- Modèles investigués, 34
- Mode azimutal, 16, 34
- Mode en profil, 34
  
- NDIC, 62
- Normalised Depth of Investigation Characteristics, 62
  
- Offset, 38, 90
  
- Pôle-dipôle array, 18
- Paradoxe anisotropique, 50
- Profil, 16, 34
- Profiling null-arrays, 38
- Profondeur d'investigation (DOI), 62
- Profondeur Normalisée d'Investigation Caractéristique, 62
  
- Radio Magnetotelluric, I
- RMT, I
  
- Schlumberger array, 16
- Schlumberger null-array, 19
- Sismique, 4
- SNA, 19
- Structure à deux failles, 35

Structure à deux failles - Mesure azimutale, 56  
Structure à deux failles - Profil, 43  
Structure à deux zones - Mesure azimutale, 61  
Structure à deux zones - Profil, 47  
Structure de cavités, 35  
Structure de cavités - Profil, 44  
Structure de faille, 34  
Structure de faille - Mesure azimutale, 54  
Structure de faille - Profil, 38  
Structure de faille oblique, 34  
Structure de faille oblique fault - Profil, 40  
Structure de failles en X, 35  
Structure de failles en X - Mesure azimutale,  
57  
Structure de grotte, 35  
Structure de grotte - Mesure azimutale, 59  
Structure de grotte - Profil, 46  
Structure en deux zones, 35  
Structure en horst, 35  
Structure en horst - Profil, 48  
  
Vertical Electrical Sounding, 15  
Very Low Frequency, I  
VES, 15  
VLF, I  
  
 $W\gamma NA$ , 19  
Wenner array, 16  
Wenner- $\gamma$  null-array, 19

# BIBLIOGRAPHIE

---

- ALLEN, D. A. (2007). *Electrical conductivity imaging of aquifers connected to watercourses*. Thèse de doctorat. PhD in Groundwater Managements, University of Technology, Sydney, Australia.
- APPARAO, A., GANGADHARA RAO, T., SIVARAMA SASTRY, R. et SUBRAHMANYA SARMA, V. (1992). Depth of detection of buried conductive targets with different electrode arrays in resistivity prospecting. *Geophysical Prospecting*, 40, 749-760.
- BINLEY, A. (2013). R3t, version 1.8. User Guide - Lancaster University.
- BLANT, D. et PUECH, V. (2001). La grotte de Vers chez le Brandt et cavités alentours. *Cavernes* 7, N°1.
- BOGOLYUBOV, N. P. (1984). Guide to interpreting two-component modified VES. Stroyizdat, Moscow (in Russian).
- BOSCH, F. (2002). *Shallow depth karst structure imaging with the Very Low Frequency-Electromagnetics Gradient (VLF-EM GRAD) method : A new geophysical contribution to aquifer protection strategies compared with other near surface mapping geophysics*. Thèse de doctorat. Université de Neuchâtel.
- BUSBY, J. (2000). The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientation. *Geophysical Prospecting*, 48, 677-695.
- COPPO, N. (2008). *Morphologies of conductive structures inside and around the Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands*. Thèse de doctorat. Université de Neuchâtel.
- EDWARDS, L. (1977). A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics* 42. 1020-1036.
- EVJEN, H. (1938). Depth factor and resolving power of electrical measurements. *Geophysics* 3. 78-95.
- FALCO, P., NEGRO, F., SZALAI, S. et MILNES, E. (2013). Fracture characterisation using geoelectric null-arrays. *Journal of Applied Geophysics* 93(1). 33-42.
- FISCHER, G. et SCHNEGG, P. (1994). Up-dating the geomagnetic survey of Switzerland. *Contributions à la géologie de la Suisse (Géophysique)* 27, 8 pp.

- FISCHER, G., SCHNEGG, P. et SESIANO, J. (1979). A new geomagnetic survey of Switzerland. Contributions à la géologie de la Suisse (Géophysique) 19, 44 pp.
- GENTER, A., MARTIN, P. et MONTAGGIONI, P. (1991). Application of FMS and BHTV tools for evaluation of natural fractures in the soultz geothermal borehole GPK1. Geothermal Science and Technology 3 (1 – 4), 69 – 82.
- GIANNAKOPOULOU, V., TABBAGH, A. et DESVIGNES, G. (1997). Active features characterisation by cross-hole low frequency electromagnetic measurements, a theoretical approach. Geothermal Science and Technology 5, 171 – 195.
- GÜNTHER, T. et RÜCKER, C. (2013). Boundless Electrical Resistivity Tomography - BERT 2 - the user tutorial. Version 2.0.
- GONZALEZ, R. (2012). Etude et caractérisation des paramètres géophysiques et hydrogéophysiques de la grotte de Vers Chez le Brandt. Travail de Master, Université de Neuchâtel.
- GUÉRIN, R. (2007). Profondeur d'investigation en imagerie de résistivité électrique. 6ème colloque GEOFCAN, Bondy, France.
- KELLER, G. et FRISCHKNECHT, F. (1966). *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, New York.
- KELLY, W. et MARES, S. (1993). *Applied geophysics in hydrogeological and engineering practice*. ELSEVIER Sciences Publisher.
- KIRALY, L. (1970). L'influence de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de la perméabilité sur les systèmes d'écoulements. Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing., Vol.37, Nr 91 : 50-57.
- KIRALY, L. (1971). Groundwater flow in heterogenous, anisotropic fractured media : a simple two-dimensionnal electric analog. Journal of Hydrology 12 : 255-261.
- KIRALY, L. et SIMEONI, G. (1971). Structure géologique et orientation des cavités karstiques : la grotte de « Chez le Brandt » (Jura neuchâtelois). Bull. Soc. Neuchâtel. Sci. nat. 94 : 91-97.
- KOLL, J. et MÜLLER, I. (1989). Elektromagnetische Very Low Frequency-Resistivity (VLF/R) Prospektion zum Erkundung von Grundwasserleitern am Beispiel des Oberharzes. Steirische Beiträge zur Hydrogeologie 40. 103-122.
- LANCZOS, C. (1961). *Linear Differential Operators*. Van Nostrand.
- LANGER, R. E. (1933). An inverse problem in differential equations. Geophysics. 40, 798-817.
- LOKE, M. H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies, a practical guide to 2-D and 3-D surveys. Res2Dinv Manual Guide.
- MARESCOT, L. (2004). *Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la method des elements finis*. Thèse de doctorat. Université de Nantes.

- MÜLLER, I. (1981). La grotte de “Chez le Brandt” (Jura neuchâtelois, coord. 526 425/ 199 000). essai de synthèse des données géologiques et hydrogéologiques. Cavernes (Neuchâtel), 25 (1) : 8-14.
- MÜLLER, I. (1983). Anisotropic properties of rocks detected with electromagnetic VLF. International Symposium of Field measurements in Geomechanics, Zürich, 5-8 September, special publics., 273-282.
- MÜLLER, I., STIEFELHAGEN, W. et INTCHI, A. (1995). Réflexions sur les résultats obtenus par l’enregistrement en continu des paramètres géophysiques, électromagnétiques (VLF-EM) et magnétiques, pour l’exploration hydrogéologie des aquifères karstiques (grotte de milandre, jura suisse). Bulletin de la Société Neuchâteloise de sciences naturelles 118, 109-119.
- PARKER, L. R. (1984). The inverse problem of resistivity sounding. Geophysics, 49, 2143-2158.
- PETITJEAN, C. (2011). Modélisation de l’aquifère de la plaine alluviale de Buix (JU), écoulement souterrain et transport de masse. Travail de Master, Université de Neuchâtel.
- RITZI, R. W. et ANDOLSEK, R. H. (1992). Relation between anisotropic transmissivity and azimuthal resistivity surveys in shallow fractured, carbonate flow systems. Ground Water, 30 (5), 774–780.
- ROY, A. et APPARAO, A. (1971). Depth of investigation in direct current methods. Geophysics 36. 943-959.
- SAMOUËLIAN, A., COUSIN, I., RICHARD, G., TABBAGH, A. et BRUAND, A. (2003). Electrical resistivity imaging for detecting soil cracking at the centimetric scale. Soil Science Society of America Journal 67 (5), 1319 – 1326.
- SAUCK, W. A. et ZABIK, S. M. (1992). Azimuthal resistivity techniques and the directional variations of hydraulic conductivity in glacial sediments. Symposium on the application of geophysics and environmental problems : Soc. Eng. Min. Expl. Geophys. 197-222.
- STIEFELHAGEN, W. (1998). *Radio Frequency Electromagnetics (RF-EM) : Kontinuierlich messendes Breitband-VLF, erweitert auf hydrogeologische Problemstellungen*. Thèse de doctorat. Université de Neuchâtel.
- SZALAI, S., KÓSA, I., NAGY, T. et SZARKA, L. (2010a). Geoelectric analogue modelling - experiments to detect fissure directions in multidirectional fissure systems. Acta. Geod. et Geoph. Hung., 45(2), 137-147.
- SZALAI, S., NOVAK, A. et SZARKA, L. (2009a). Depth of investigation and vertical resolution of surface geoelectric arrays. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 14(1), 15-23.
- SZALAI, S. et SZARAK, L. (2002). Geoelectrical null-arrays. Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences.

- SZALAI, S., SZARAK, L., PRÁCSER, E., BOSCH, F., MÜLLER, I. et TURBERG, P. (2002). Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null-arrays. *Geophysics*, 67, 1769-1778.
- SZALAI, S. et SZARKA, L. (2008a). Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays I : Linear arrays. *Acta. Geod. et Geoph. Hung.*, 43(4), 419-437.
- SZALAI, S. et SZARKA, L. (2008b). Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays II : Nonlinear and focussed arrays. *Acta. Geod. et Geoph. Hung.*, 43(4), 439-447.
- SZALAI, S., SZARKA, L., MARQUIS, G., SAILHAC, P., KAIKKONEN, P. et LAHTI, I. (2004). Colinear null arrays in geoelectrics. 17th LAGA WG.
- SZALAI, S., VARGA, M., NOVÁK, A. et SZARKA, L. (2009b). Non-conventional geoelectrical arrays - results of the otka project k49604. *Acta. Geod. et Geoph. Hung.*, 44(4), 369-384.
- SZALAI, S., VARGA, M., NOVÁK, A. et SZARKA, L. (2010b). A k49604. sz. „nem konvencionális geoelektromos elrendezések” c. otka-projekt eredményeiből. *Magyar Geofizika*, 51. évf. 4. szám, 1–18.
- TABBAGH, J. et GIANNAKOPOULOU, V. (1995). Model calculations of the response of thin dipping layers to a three oriented low frequency electromagnetic tool under realistic boundary conditions. *Scientific Drilling* 5, 23 – 30.
- TABBAGH, J., SAMOUËLIAN, A., TABBAGH, A. et COUSIN, I. (2007). Numerical modelling of direct current electrical resistivity for the characterisation of cracks in soils. *Journal of Applied Geophysics*, 62, 313-323.
- TARKHOV, A. G. (1957). On electric geophysical exploration methods of a pure anomaly. *Izv. Akad. Nauk SSSR, ser. Geofiz.* No. 8, 979-989.
- TAYLOR, R. W. et FLEMING, A. H. (1988). Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water* 26(4), 464-474.
- TELFORD, W., GELDART, L. et R.E., S. (1990). *Applied geophysics - Second edition*. Cambridge University Press.
- TURBERG, P. (1994). *Apport de la cartographie radiomagnétotellurique (RMT) à l'hydrogéologie des milieux fracturés*. Thèse de doctorat. Université de Neuchâtel.
- VAN NOSTRAND, R. et COOK, K. (1966). Interpretation of resistivity data. Geological Survey professional paper 499. US Government Printing Office, Washington DC.
- WANG, T., STODT, J., STIERMAN, D. et MURDOCH, L. (1991). Mapping hydraulic fractures using borehole-to-surface electrical resistivity method. *Geoexploration*, 28, 349-369.
- WINTER, H. (1994). Tensor-geoelektrik an der Kontinentalen Tiefborung. *Fortschrittberichte, VDI, Reihe 8, Nr. 379.*, VDI Verlag.

# LES MÉTHODES MAGNÉTOTELLURIQUES

---

Les méthodes magnétotelluriques regroupent un vaste panel de "sous-méthodes", comme la magnétotellurique, l'audio-magnétotellurique, le Very Low Frequency ou encore la Radio MagnétoTellurique.

Le Very Low Frequency, usuellement noté VLF ou VLF-EM, connaît une variante sous le nom de "Very Low Frequency Gradient", noté VLF-Grad (Bosch, 2002). Les VLF et la "Radio Magneto Telluric", notée RMT, sont basés sur le même principe et utilisent la même source d'énergie, des ondes de télécommunication basses fréquences. Le terme de basse fréquence est ici un peu ambigu, puisque bien que la gamme de fréquence utilisée soit basse en terme de télécommunication, elle est relativement haute en terme de prospection géophysique et pour les méthodes électromagnétiques.

Ces méthodes sont des techniques fréquemment utilisée en hydrogéologie, leurs profondeurs d'investigation étant adaptées. Les résistivités du sol, ou des contrastes de résistivité, sont déterminés en mesurant ces ondes électromagnétiques et leur interaction avec le sol.

Les sources d'énergie utilisées pour ces mesures sont des émetteurs de télécommunication radio, principalement utilisées par l'armée navale et sous-marine, qui émettent dans une gamme de fréquence comprise entre 10 et 240  $kHz$ . Les antennes se trouvent en général à de très longues distances, l'onde émise est alors localement assimilable à une onde plane.

Le principe de ces méthodes est simple : les antennes émettent des ondes électromagnétiques dont la composante électrique primaire est verticale et la composante magnétique primaire est horizontale et concentrique autour de l'antenne. Cette composante magnétique pénétrant

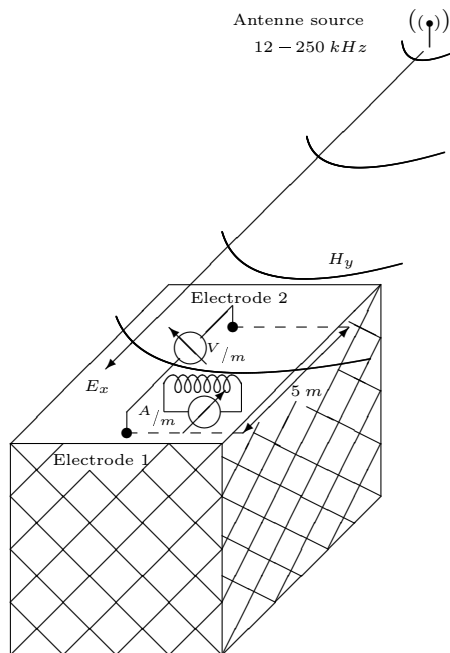


FIGURE A.1 – Illustration de la méthode RMT d'après Koll et Müller (1989)

dans le sol va générer un champ électrique secondaire  $E_x$ , horizontal et radial par rapport à l'antenne. Cette composante électrique va entraîner un courant électrique dans le sol, appelé courant tellurique, qui va alors à son tour induire un champ magnétique secondaire perpendiculaire à ce courant. La composante magnétique primaire n'est qu'horizontale alors que la composante magnétique secondaire est dans un plan vertical, perpendiculaire au champ  $E_x$ . La composante magnétique secondaire étant beaucoup plus faible que la primaire, la composante horizontale du champ magnétique, qui est en fait la superposition entre le champ primaire et secondaire, est quasiment égale au champ primaire alors que la composante verticale est uniquement composée du champ secondaire.

Les méthodes magnétotelluriques mesurent alors deux des trois composantes : le champ électrique (secondaire)  $E_x$ , la composante magnétique  $H_y$  (primaire) ou la composante magnétique  $H_z$  (secondaire).

La méthode RMT mesure alors le champ électrique  $E_x$  et magnétique primaire  $H_y$ , ce qui permet d'obtenir une valeur de résistivité apparente du sol. La méthode VLF (ou VLF-EM) mesure le champ magnétique secondaire  $H_z$  par rapport au champ magnétique primaire  $H_y$ . Le champ magnétique secondaire, généré dans le sol, décroît très rapidement au fur et à mesure que la mesure s'éloigne de sa "source", le sol. La méthode VLF-Grad mesure alors la différence de la composante horizontale du champ magnétique horizontal à deux altitudes différentes. Le champ primaire étant homogène et indépendant de l'altitude, la différence mesurée est uniquement due aux variations du champ magnétique secondaire.

---

La Fig. A.1 illustre le comportement et la géométrie des composantes  $E_x$  et  $H_y$ . Le champ magnétique secondaire est alors situé dans le plan perpendiculaire à  $E_x$ , sa composante secondaire  $H_z$  étant verticale.

Le déphasage entre les champs primaire et secondaire est ainsi lié à la nature du sol et sa mesure permet d'obtenir des informations sur celui-ci. Ainsi, le rapport entre ces champs mesurés peut être interprété sur sa partie réelle, l'*inphase*, ou sur sa partie imaginaire, l'*outphase* ou la *quadrature*.

Soient  $E_x$  la composante horizontale du champ électrique et  $H_y$  la composante horizontale du champ magnétique primaire et perpendiculaire à  $E_x$ . D'après les équations de Maxwell, la résistivité intervient dans le rapport entre ces deux grandeurs :

$$\frac{E_x}{H_y} = \sqrt{2\pi\nu\mu_0\rho} \quad (\text{A.1})$$

il est alors possible d'isoler la résistivité :

$$\rho = \frac{1}{2\pi\nu\mu_0} \left( \frac{E_x}{H_y} \right)^2 \quad (\text{A.2})$$

où

- $E_x$  : champ électrique [ $V m^{-1}$ ]
- $H_y$  : champ magnétique [ $A m^{-1}$ ]
- $\mu_0$  : perméabilité magnétique du vide [ $V s A^{-1} m^{-1}$ ]
- $\rho$  : résistivité électrique [ $\Omega m$ ]
- $\nu$  : fréquence [ $Hz$ ]

D'après la loi d'Ampère

$$\nabla \wedge H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

et d'après la loi du déplacement électrique

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \epsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

où  $\epsilon$  est la permittivité électrique [ $F m^{-1}$ ] dans le vide.

De plus, pour des mesures terrestres et les gammes de fréquences utilisées ici, le terme  $J$ , égal à  $\frac{1}{\rho} E$  d'après la loi d'Ohm, est nettement supérieur au terme  $\frac{\partial D}{\partial t}$ , qui peut alors être négligé. Ainsi, la composante verticale du champ secondaire, notée  $H_z$  se calcule par la relation

$$\nabla \wedge H_z = \frac{1}{\rho} E_x \quad (\text{A.4})$$

Deux possibilités de mesures s'offrent alors :

- Mesurer les composantes électrique et magnétique horizontales, donc primaire, permet de déduire la résistivité apparente du sol pour des fréquences connues/choisies. C'est la mesure "Radio Magneto Telluric" ou RMT.
- Mesurer le rapport entre la composante magnétique verticale et la composante magnétique horizontale. Ce ratio est censé être constant dans un milieu homogène et permet donc de voir des contrastes résistifs. C'est la mesure "Very Low Frequency" ou VLF.

La mesure RMT peut être utilisée de manière similaire aux mesures géoélectriques : soit elles sont effectuées en mode multi-fréquentiel ce qui donne ponctuellement des mesures en fonction de la profondeur (équivalent du sondage vertical), soit elles sont effectuées en mesures directionnelles le long d'un profil pour étudier les variations latérales de résistivité (équivalent du profil géoélectrique).

La profondeur d'investigation  $P$  est proportionnelle à la résistivité  $\rho$  du milieu et inversement proportionnelle à la fréquence  $\nu$  de l'onde. Elle peut donc s'estimer par :

$$P \cong 503 \sqrt{\frac{\rho}{\nu}} \quad (\text{A.5})$$

Ainsi, plus petite est la fréquence, plus grande sera la profondeur de mesure.

L'antenne de mesure est donc composée de deux bobines de cuivre, une horizontale et une verticale pour les mesures de  $H_y$  et  $H_z$ . Pour la mesure de  $E_x$ , deux électrodes séparées par une distance connue, ici cinq mètres, sont utilisées. Par la mesure RMT, le déphasage  $\phi$  entre le champ électrique et le champ magnétique primaire peut également être déterminé. Si le sol est homogène, ce déphasage doit être égal à  $45^\circ$ . Ce ne sera plus le cas si le sol a une lithologie. Si une couche conductive se trouve au-dessus d'une couche résistive, le déphasage sera plus petit que  $45^\circ$ , et supérieur à  $45^\circ$  dans le cas contraire.

Pour finir, le tableau suivant montre une liste non-exhaustive de fréquences usuellement utilisées en Europe centrale, avec les profondeurs d'investigations calculées pour différentes valeurs de résistivités apparentes.

Fréquence (kHz)	16.4	18.3	19.6	20.3	63.8	183	216	Résistivité ( $\Omega$ )
Profondeur d'investigation (m)	12.4	11.8	11.4	11.2	6.3	3.7	3.4	10
	27.8	26.3	25.4	25.0	14.1	8.3	7.7	50
	39	37	36	35	20	12	11	100
	88	83	80	79	45	26	24	500
	124	118	114	112	63	37	34	1000

# ANNEXES DES MODÉLISATION NUMÉRIQUES

---

Les annexes présentées dans ce chapitre sont liées au chapitre de modélisation numérique.

## B.1 Profondeur d'investifation d'après Roy et Apparao (1971)

Dans le papier "Depth of Investiagation in direct current methods" (Roy et Apparao, 1971), "Profondeur d'investigation des méthodes de courant continu" en français, l'intégrale générale du type

$$I = \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{x(x-a) + y(y-b) + z(z-c)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2} [(x-a)^2 + (y-b)^2 + (z-c)^2]^{3/2}} dx dy \quad (\text{B.1})$$

a été rencontrée. L'intégration peut être menée analytiquement en utilisant les trois transformées de Fourier suivantes :

$$\frac{1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} \longleftrightarrow 2\pi \frac{e^{|z|\sqrt{u^2+v^2}}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (\text{B.2})$$

et

$$\frac{-y}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \longleftrightarrow 2\pi (iv) \frac{e^{|z|\sqrt{u^2+v^2}}}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (\text{B.3})$$

et

$$\frac{|z|}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \longleftrightarrow 2\pi e^{|z|\sqrt{u^2+v^2}} \quad (\text{B.4})$$

L'intégrale dans l'équation B.1 peut être séparée en trois termes,  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$ . Prenons la transformée de Fourier de  $I_1$  par rapport à  $a$  et  $b$ , substituons  $(a - x) = \alpha$  et  $(b - y) = \beta$ , et réarrangeons les termes. Avec  $i = \sqrt{-1}$  et  $u$  et  $v$  comme fréquences angulaires spatiales dans les directions  $a \equiv x$  et  $b \equiv y$ , on obtient

$$I_1(u, v, c, z) = - \left[ \iint_{-\infty}^{\alpha, \beta = +\infty} \frac{\alpha e^{-i u \alpha} e^{i v \beta} d\alpha d\beta}{(\alpha^2 + \beta^2 + (z - c)^2)^{3/2}} \right] \left[ \iint_{-\infty}^{x, y = +\infty} \frac{x e^{-i u x} e^{-i v y} dx dy}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} \right]$$

$$= (2\pi)^2 u^2 \frac{e^{-(2z-c)\sqrt{u^2+v^2}}}{u^2 + v^2}, \quad \text{pour } (z - c) > 0, \quad \text{ou} \quad (\text{B.5})$$

$$= (2\pi)^2 u^2 \frac{e^{-c\sqrt{u^2+v^2}}}{u^2 + v^2}, \quad \text{pour } (c - z) > 0, \quad (\text{B.6})$$

de l'équation de la transformée de Fourier B.3. Similairement,

$$I_2(u, v, c, z) = (2\pi)^2 v^2 \frac{e^{-(2z-c)\sqrt{u^2+v^2}}}{u^2 + v^2}, \quad \text{pour } (z - c) > 0, \quad \text{ou} \quad (\text{B.7})$$

$$(2\pi)^2 v^2 \frac{e^{-c\sqrt{u^2+v^2}}}{u^2 + v^2}, \quad \text{pour } (c - z) > 0; \quad (\text{B.8})$$

$$I_3(u, v, c, z) = (2\pi)^2 e^{-(2z-c)\sqrt{u^2+v^2}}, \quad \text{pour } (z - c) > 0, \quad \text{ou} \quad (\text{B.9})$$

$$-(2\pi)^2 e^{-c\sqrt{u^2+v^2}}, \quad \text{pour } (c - z) > 0, \quad (\text{B.10})$$

de l'équation de la transformée de Fourier B.4. Alors,

$$I(u, v, c, z) = I_1(u, v, c, z) + I_2(u, v, c, z) + I_3(u, v, c, z)$$

$$= (2\pi)^2 2 e^{-(2z-c)\sqrt{u^2+v^2}}, \quad \text{pour } (z - c) > 0, \quad \text{ou} \quad (\text{B.11})$$

$$= 0, \quad \text{pour } (c - z) > 0, \quad (\text{B.12})$$

des équations B.5, B.6, B.7, B.8, B.9 et B.10. En extrayant la transformée inverse de  $I(u, v, c, z)$  en utilisant les équations, B.4 devient

$$I(a, b, c, z) = \frac{4\pi(2z - c)}{[a^2 + b^2 + (2z - c)^2]^{3/2}}, \quad \text{pour } (z - c) > 0, \quad (\text{B.13})$$

$$= 0, \quad \text{pour } (c - z) > 0, \quad (\text{B.14})$$

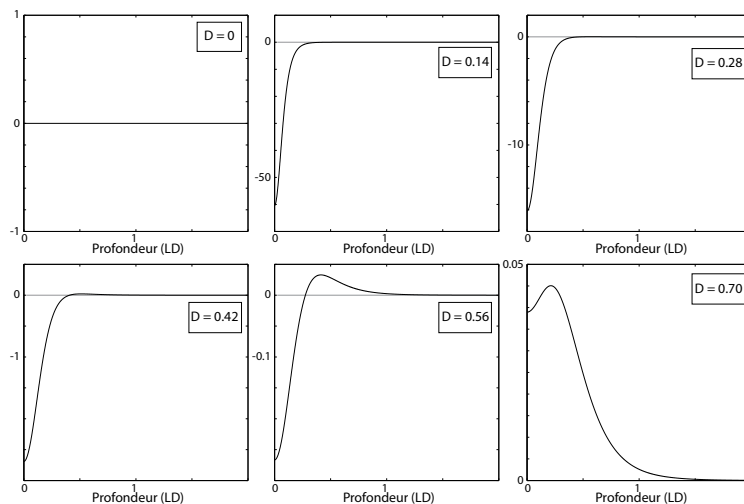
en notant que

$$I_1(a, b, c, z) + I_2(a, b, c, z) = \pm I_3(a, b, c, z), \quad \text{pour } (z - c) \gtrless 0,$$

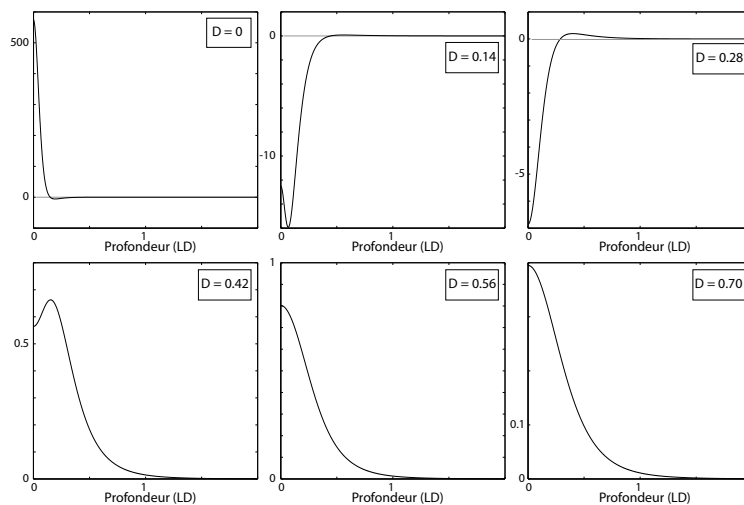
ce qui signifie que, pour toute couche horizontale, l'effet total des dipôles horizontaux aux points de mesures est égal numériquement à l'effet total des dipôles verticaux.

## B.2 Courbes de profondeur d'investigation

Les deux prochaines Fig. B.1a et B.1b montrent les courbes de profondeur d'investigation calculées (section 4.4) pour six distances différentes  $D$  pour le Wenner- $\gamma$  null-array et le Schlumberger null-array.



(a) Schlumberger null-array



(b) Wenner- $\gamma$  null-array

FIGURE B.1 – Courbes de profondeur d'investigation caractéristique pour le Schlumberger null-array et le Wenner- $\gamma$  null-array pour différentes distances  $D$  (par rapport au centre du dispositif) à un infiniment petit élément de volume. L'axe vertical représente la force du signal généré avec des unités arbitraires, proportionnelles entre elles.

# ANNEXES DES MESURES DE TERRAIN

---

Les annexes présentées dans ce chapitre sont toute reliées au chapitre des mesures de terrain.

## C.1 Les Breuleux : ERT sur le profil P5

La Fig. C.1 montre les "résultats" des trois ERT effectuées sur le profil *P5* aux Breuleux. Aucune information intéressante n'a pu être déduite de ces mesures.

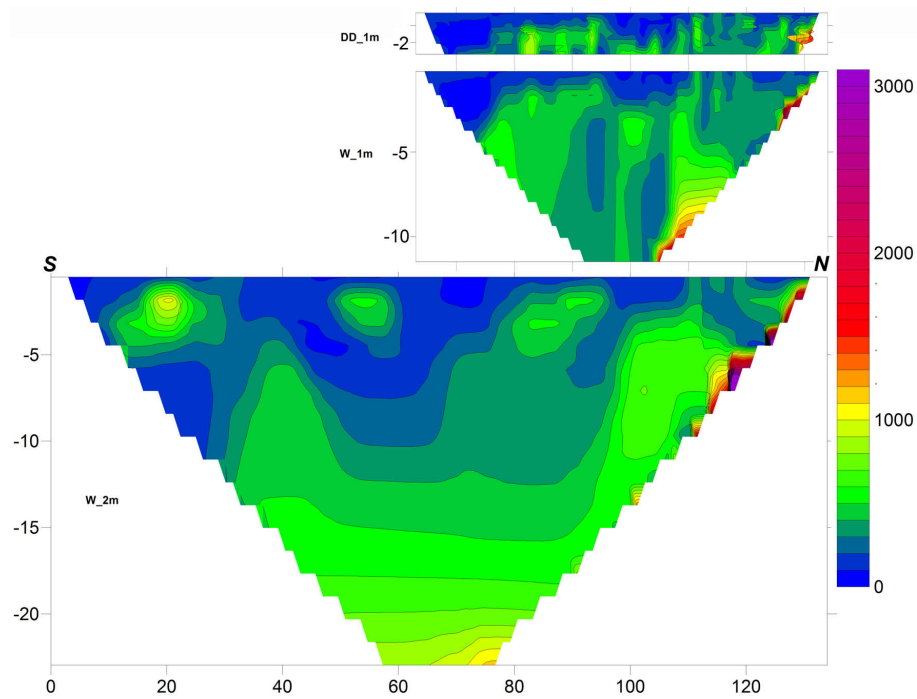


FIGURE C.1 – ERT sur le profil *P5* effectuées perpendiculairement au profil *P1* : deux profils courts avec un espacement entre les électrodes de 1 *m* en dipôle-dipôle et en Wenner (*DD\_1m* et *W\_1m* respectivement) et un long profil en Wenner avec un espacement des électrodes de 2 *m* (*W\_2m*). Les positions sont en mètres et les résistivités en  $\Omega m$ .

## C.2 Les Breuleux : Photos du mur de la carrière

Les Figs. C.2, C.3 et C.4 montrent les photos des différents murs de la carrière des Breuleux.



FIGURE C.2 – Photos du mur Sud de la carrière des Breuleux, correspondant au profil principal *P1*.



FIGURE C.3 – Photos du mur Ouest de la carrière des Breuleux, et vue des plis des montagnes du Jura.

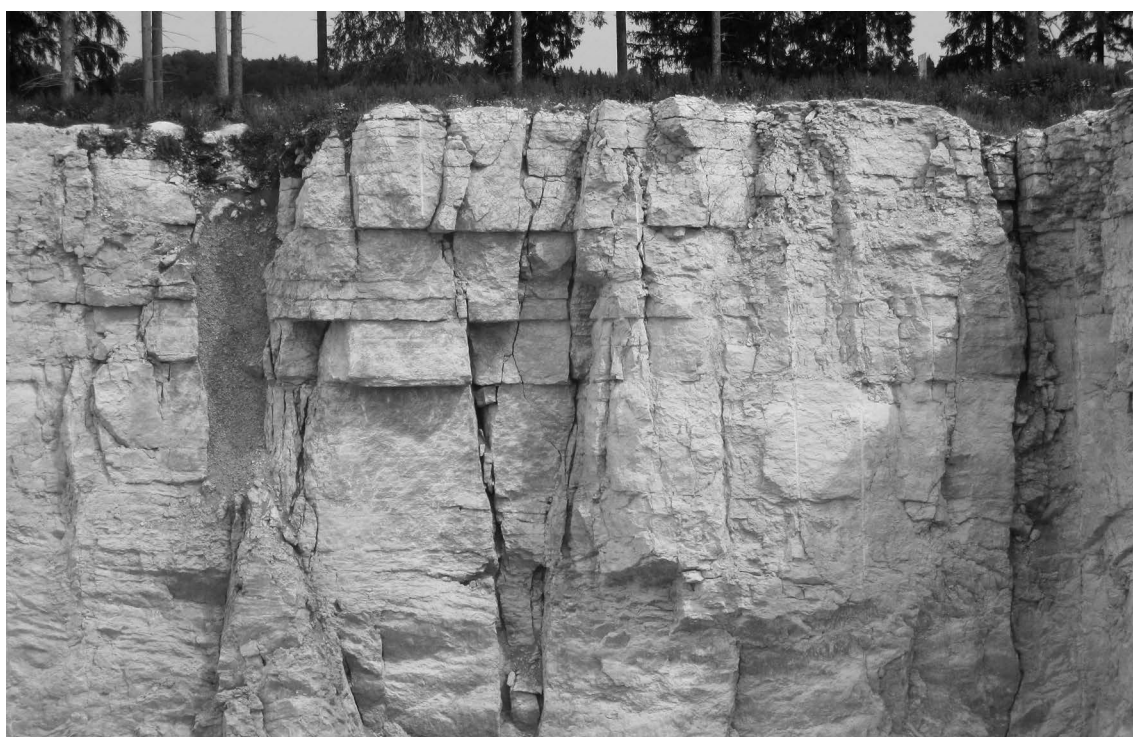


FIGURE C.4 – Photos du mur Nord de la carrière des Breuleux, avec la prolongation de la faille majeure à environ 30 m qui peut être observée sur cette photo (la grande faille sur le côté droite de l'image).

### C.3 Les Breuleux : Mesures azimuthales avec les null-arrays

Les Figs. C.5, C.6, C.7, C.8, C.9, C.10 et C.11 montrent les mesures azimuthales effectuées aux Breuleux avec les null-arrays et le Schlumberger array classique.

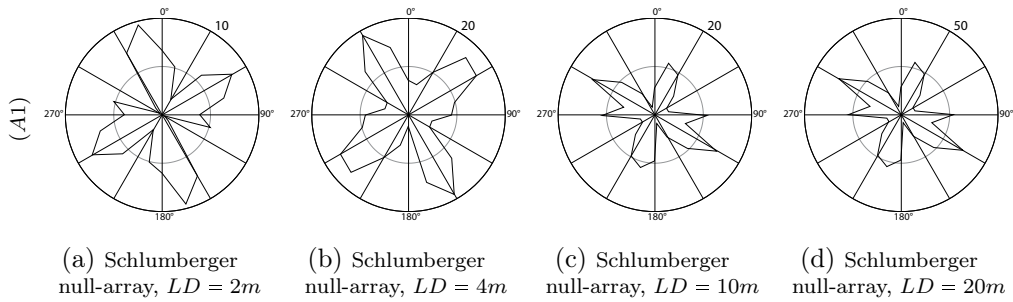


FIGURE C.5 – Mesures azimuthales à la position A1. Les valeurs externes donnent les valeurs du cercles extérieur ( $\Omega m$ ).

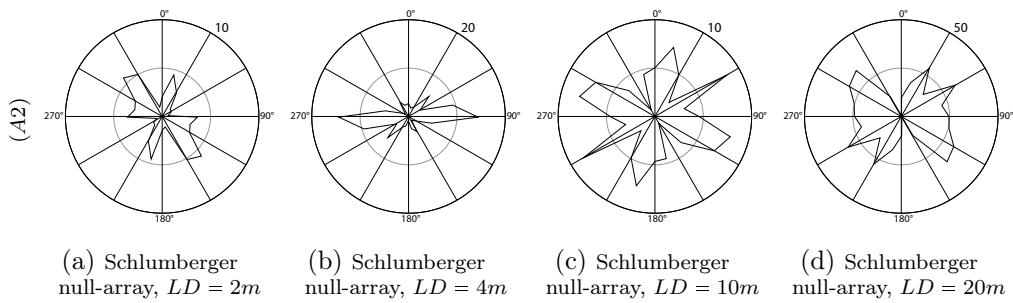


FIGURE C.6 – Mesures azimuthales à la position A2. Les valeurs externes donnent les valeurs du cercles extérieur ( $\Omega m$ ).

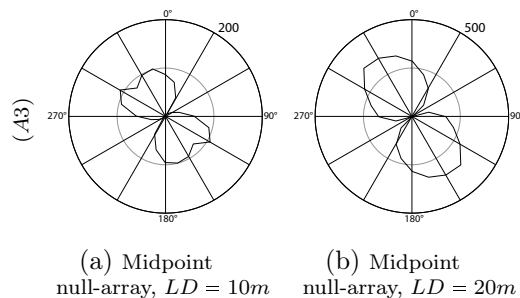


FIGURE C.7 – Mesures azimutales à la position  $A3$ . Les valeurs externes donnent les valeurs du cercles extérieur ( $\Omega m$ ).

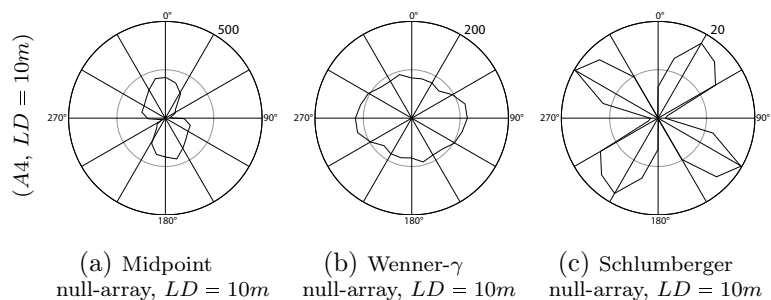


FIGURE C.8 – Mesures azimutales à la position  $A4$ ,  $LD = 10m$ . Les valeurs externes donnent les valeurs du cercles extérieur ( $\Omega m$ ).

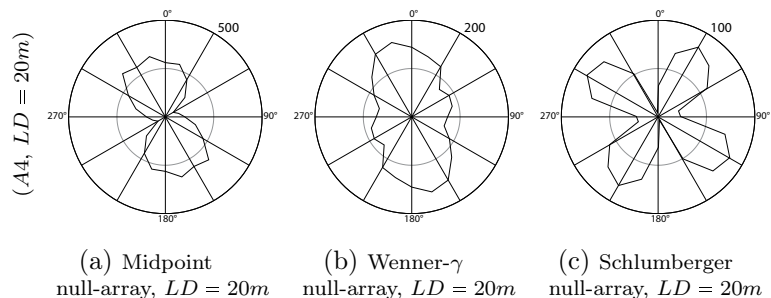


FIGURE C.9 – Mesures azimutales à la position  $A4$ ,  $LD = 20m$ . Les valeurs externes donnent les valeurs du cercles extérieur ( $\Omega m$ ).

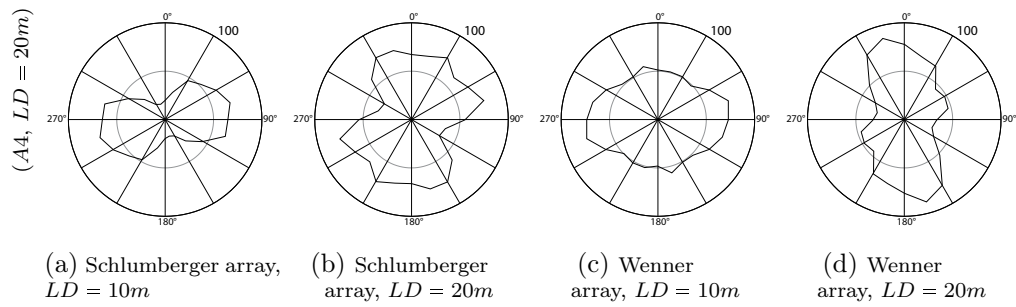


FIGURE C.10 – Mesures azimuthales avec le Schlumberger array classique à la position A4. Les valeurs au centre sont de  $120\Omega m$  pour le  $LD = 10m$  et  $240\Omega m$  pour le  $LD = 20m$ . Les valeurs externes donnent les valeurs du cercles extérieur ( $\Omega m$ ).

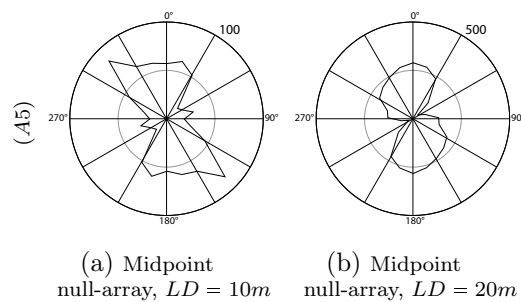


FIGURE C.11 – Mesures azimuthales à la position A5. Les valeurs externes donnent les valeurs du cercles extérieur ( $\Omega m$ ).

## C.4 Les Breuleux : Photos de terrain



(a) Discussion sur la carrière



(b) Traitement des ERT



(c) Fan club qui nous observe

FIGURE C.12 – Photos du terrain aux Breuleux : a) discussion, b) traitement des mesures ERT sur le terrain et c) le fan-club qui s’installe chaque matin à notre arrivée et nous observe en plein travail (non-montré sur la photo).

## C.5 Vers chez le Brandt : Simulations directes et inverses sur une grotte

Puisque la grotte de Vers chez le Brandt paraissait indétectable sur le terrain, des simulations numérique directes ont été effectuées avec Res2dmod (Loke, 1999) en simulant une Wenner ERT sur une grotte. Une ERT de trente électrodes avec un espacement entre les électrodes de  $a = 2 m$  a été simulée, la grotte ayant une section carrée de  $4 m \times 4 m$  et se trouvant à 4 profondeurs différentes : le toit de la grotte se trouve de 1 à 6  $m$ . La grotte a une résistivité de  $20'000 \Omega m$  et le milieu environnant de  $70 \Omega m$ . Ces simulations ont été effectuées sans ajout de bruit.

Ces données ont alors été inversées avec les paramètres par défaut du logiciel Res2dinv (Loke, 1999). Les résultats ont montré que la grotte devenait très vite invisible après inversion des données (Fig. C.13).

A 1  $m$  de profondeur, l'inversion donne un très bon résultat, la grotte étant clairement identifiable. A 2  $m$  de profondeur, la grotte paraît déjà plus étalée et ses limites sont moins évidentes à déterminer. A 3  $m$ , une perturbation apparaît mais il serait dangereux d'interpréter cela comme une grotte dans un cas de terrain. A 6  $m$ , la grotte n'apparaît plus du tout.

C.5. VERS CHEZ LE BRANDT : SIMULATIONS DIRECTES ET INVERSES SUR UNE GROTTTE

---

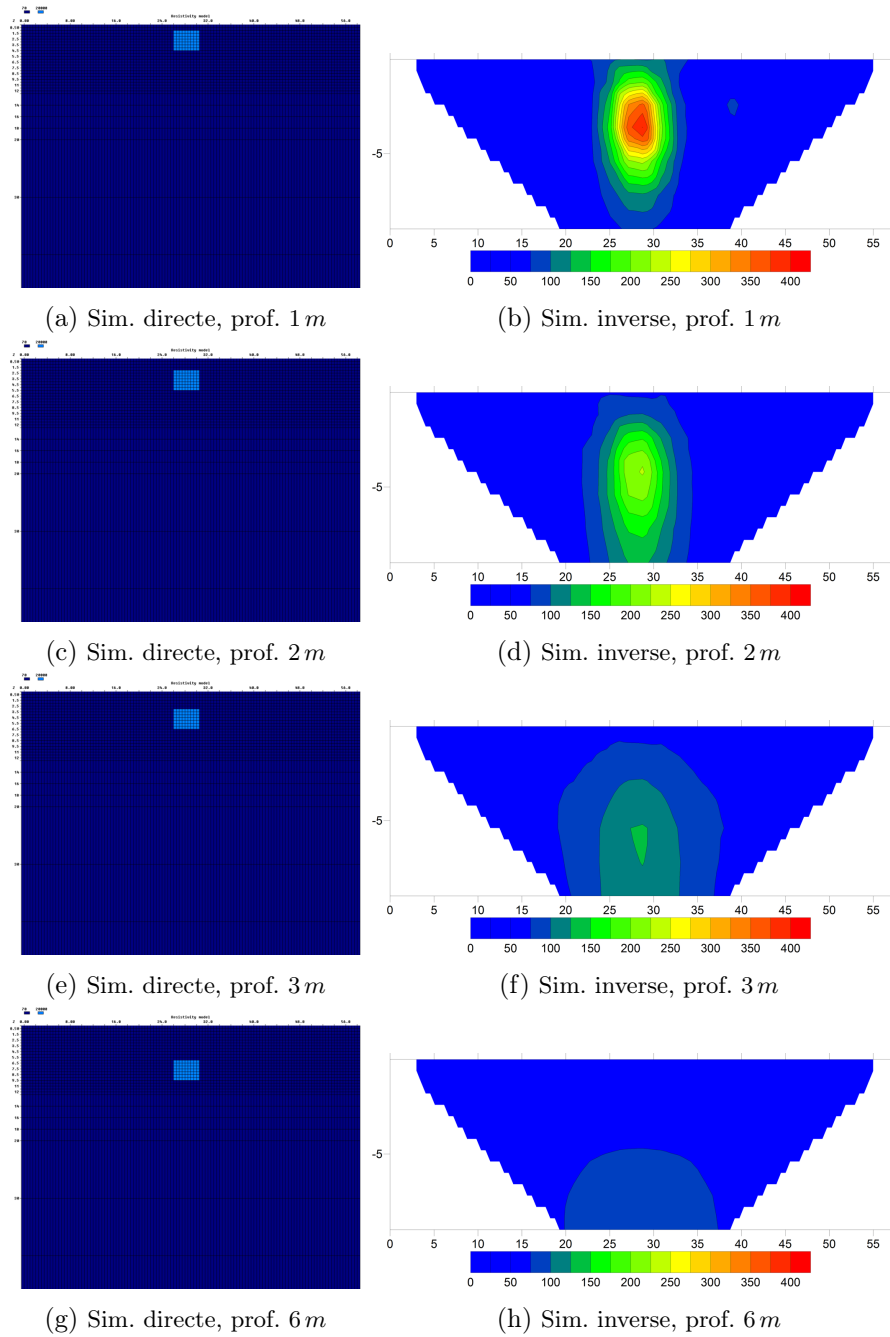


FIGURE C.13 – Simulations directes et inverses sur une grotte à différentes profondeurs avec une ERT Wenner de 30 électrodes et un espacement  $a = 2\text{ m}$ . Les simulations directes (colonne de gauche) et les modèles inversés (colonne de droite) sont présentés.

## C.6 Vers chez le Brandt : Mesures azimutales avec les null-arrays

Les Figs. C.14, C.15, C.16, C.17 et C.18 montrent les mesures azimutales effectuées à Vers chez le Brandt avec les null-arrays et le Schlumberger array classique.

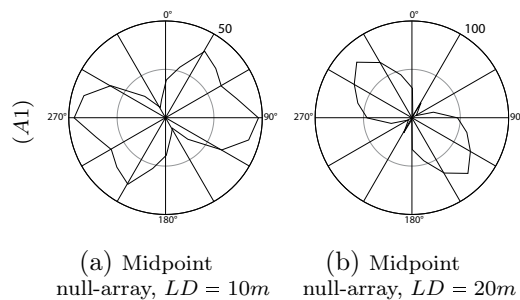


FIGURE C.14 – Mesures azimutales à la position A1. Les valeurs externes donnent les valeurs des cercles extérieurs ( $\Omega m$ ).  $LD$  est la longueur du dispositif.

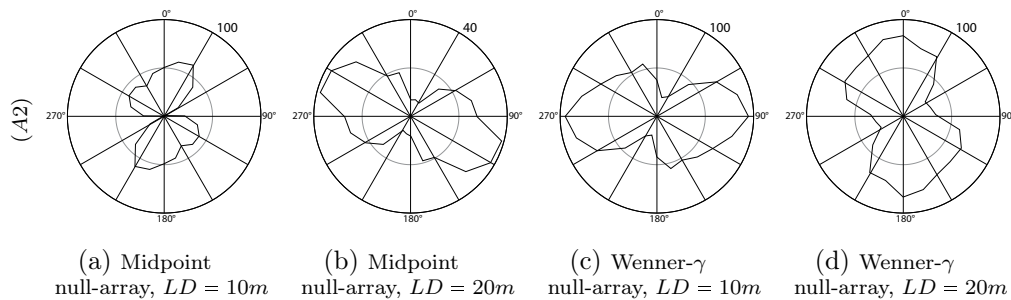


FIGURE C.15 – Mesures azimutales à la position A2. Les valeurs externes donnent les valeurs des cercles extérieurs ( $\Omega m$ ).  $LD$  est la longueur du dispositif.

C.6. VERS CHEZ LE BRANDT : MESURES AZIMUTALES AVEC LES NULL-ARRAYS

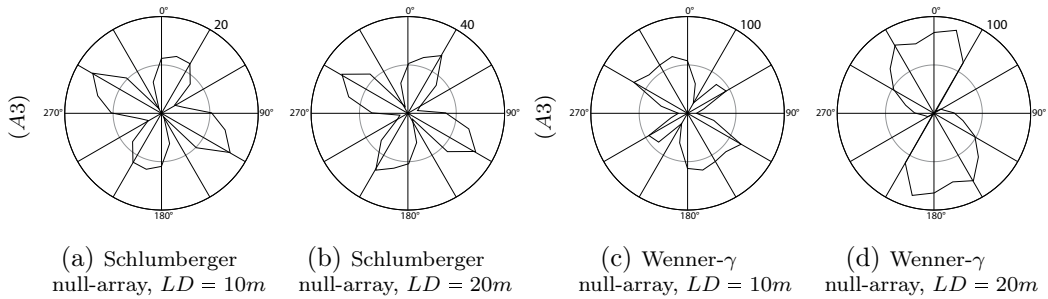


FIGURE C.16 – Mesures azimutales à la position  $A3$ . Les valeurs externes donnent les valeurs des cercles extérieurs ( $\Omega m$ ).  $LD$  est la longueur du dispositif.

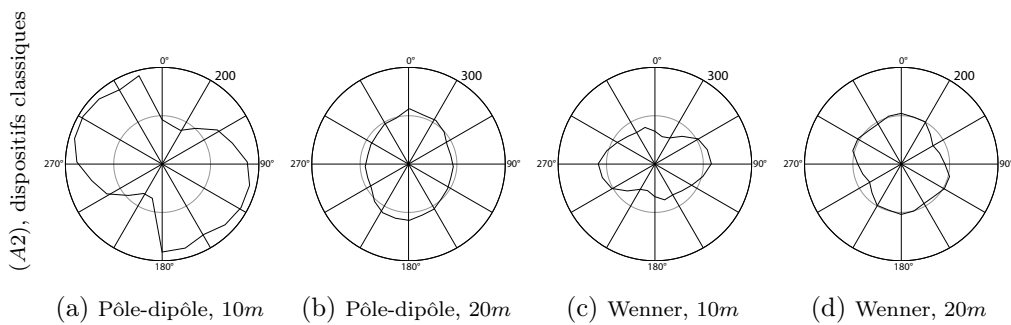


FIGURE C.17 – Mesures azimutales à la position  $A2$  avec les dispositifs classiques. Les valeurs externes donnent les valeurs des cercles extérieurs ( $\Omega m$ ) et la valeur au centre est de  $100\Omega m$ . Les valeurs données dans la légende sont les longueurs de dispositif.

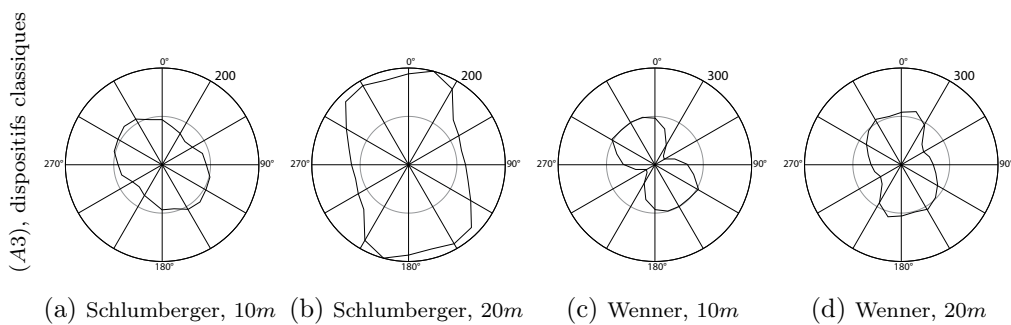


FIGURE C.18 – Mesures azimutales à la position  $A3$  avec les dispositifs classiques. Les valeurs externes donnent les valeurs des cercles extérieurs ( $\Omega m$ ) et la valeur au centre est de  $100\Omega m$ . Les valeurs données dans la légende sont les longueurs de dispositif.

## C.7 Buix : Simulations des null-array sur des chenaux

Ces simulations montrent le comportement du Schlumberger null-array sur une structure composée de chenaux, à l'échelle du profil  $P1$  effectué à Buix. La structure est composée de quatre chenaux avec différents contrastes de résistivités par rapport au milieu environnant à deux profondeurs différentes. Le premier chenal est affleurant en surface (profondeur de  $0\text{ m}$ ) et les trois autres ont leur sommet à  $2.5\text{ m}$  de profondeur. La Fig. C.19 montre la structure et les signaux simulés.

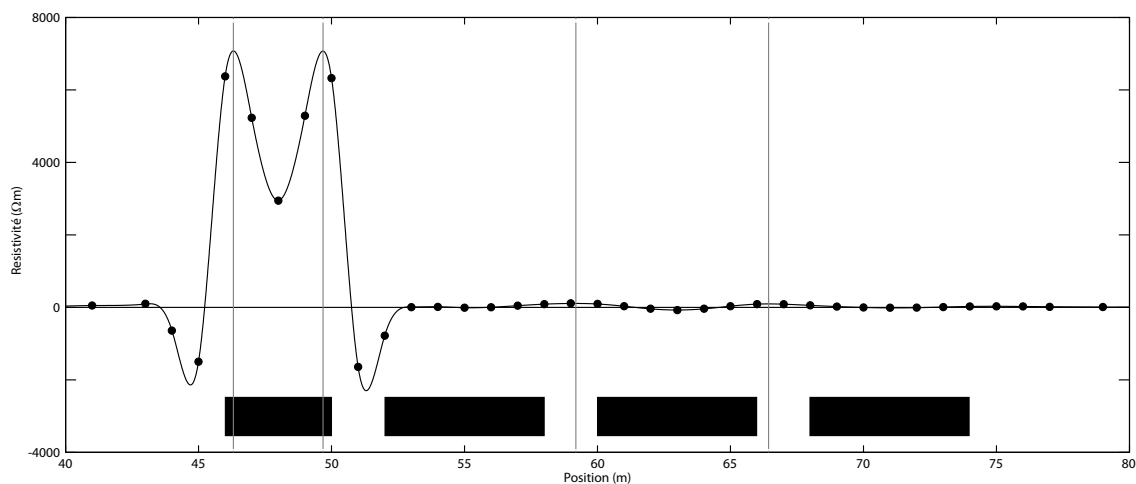


FIGURE C.19 – Simulation d'un profil avec le Schlumberger null-array sur des chenaux, basé sur le profil  $P1$  de Buix. Les chenaux ont une section de  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$  pour le premier chenal et de  $6\text{ m} \times 6\text{ m}$  pour les autres. Les profondeurs indiquées sont les profondeurs du sommet des chenaux. Les valeurs de résistivités sont relatives par rapport au milieu environnant.



# ARTICLE PUBLIÉ

---

L'article "Fracture characterisation using geoelectric null-arrays" a été soumis à "Journal of Applied Geophysics" le 15 octobre 2012. Il a été accepté le 14 mars 2013 et publié online le 28 mars 2013.



## Fracture characterisation using geoelectric null-arrays



Pierik Falco <sup>a,\*</sup>, François Negro <sup>a</sup>, Sándor Szalai <sup>b</sup>, Ellen Milnes <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Centre for Hydrogeology and Geothermics, University of Neuchâtel, Emile-Argand 11, 2000 Neuchâtel, Switzerland

<sup>b</sup> RCAES, Geodetic and Geophysical Institute, Hungarian Academy of Sciences, 9400, Sopron, Csatkai E. u. 6-8, Hungary

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 15 October 2012

Accepted 14 March 2013

Available online 28 March 2013

#### Keywords:

Geoelectric null-array

Numerical modelling

Azimuthal measurement

Fractures

Orientation

### ABSTRACT

The term “geoelectric null-array” is used for direct current electrode configurations yielding a potential difference of zero above a homogeneous half-space. This paper presents a comparative study of the behaviour of three null-arrays, midpoint null-array (MAN), Wenner- $\gamma$  null-array and Schlumberger null-array in response to a fracture, both in profiling and in azimuthal mode. The main objective is to determine which array(s) best localise fractures or best identify their orientation.

Forward modelling of the three null-arrays revealed that the Wenner- $\gamma$  and Schlumberger null-arrays localise vertical fractures the most accurately, whilst the midpoint null-array combined with the Schlumberger null-array allows accurate orientation of a fracture. Numerical analysis then served as a basis to interpret the field results. Field test measurements were carried out above a quarry in Les Breuleux (Switzerland) with the three null-arrays and classical arrays. The results were cross-validated with quarry-wall geological mapping. In real field circumstances, the Wenner- $\gamma$  null-array proved to be the most efficient and accurate in localising fractures. The orientations of the fractures according to the numerical results were most efficiently determined with the midpoint null-array, whilst the Schlumberger null-array adds accuracy to the results. This study shows that geoelectrical null-arrays are more suitable than classical arrays for the characterisation of fracture geometry.

© 2013 Published by Elsevier B.V.

### 1. Introduction

During the last decades, technical advances in geoelectric prospecting have been significant. Today, it is the most widely used geophysical method for near-surface prospecting, often combining vertical soundings with the profiling mode. Most interpretation techniques of geoelectrical vertical sounding assume that the subsurface is composed of perfectly horizontal layers (Parker, 1984). Lateral variations of subsurface electrical properties are usually identified by geoelectrical profiling (e.g. Edwards, 1977) with appropriate electrode configurations yielding different investigation depths (e.g. Marescot, 2004; Roy and Apparao, 1971).

Steep structures, such as faults or fracture zones, are difficult to identify by classical geoelectrical profiling, since the sensitivity to lateral perturbations is an inherent weakness of these methods. However, some classical arrays, such as the dipole–dipole array, have been found to be more sensitive to lateral variations than others (Loke, 2012). Classical geoelectrical arrays have also been used to determine the orientation of fractures (Taylor and Fleming, 1988) carrying out azimuthal measurements.

Szalai et al. (2002) introduced the geoelectrical ‘null-array’ method to identify fractures based on the pure anomaly method developed

by Tarkhov (1957). The principle of this method is the use of particular electrode configurations which yield a zero potential in a homogeneous ground. All null-arrays yield a zero potential above perfectly horizontally layered ground (Szalai et al., 2002). Any signal differing from zero points towards the presence of lateral anomalies. Therefore, null-arrays have been found to be very useful in the identification of fractures. The reason these arrays have not been widely used is that they were believed to yield low acquisition signals combined with interpretation difficulties related to a theoretically infinite geometric factor. So far, only six different null-arrays have been tested in field studies, whilst numerical analysis has only been carried out for one of them. These studies revealed sufficiently good acquisition signals and it was shown that the difficulties related to the inversion can be avoided by direct interpretation of the signals (Szalai et al., 2002, 2004).

The aim of this study is to detect fractures by profiling and to characterise their orientation by azimuthal measurements. For this purpose, the signals of three selected null-arrays, the midpoint null-array (MAN), Wenner- $\gamma$  null-array (W $\gamma$ na) and Schlumberger null-array (Sna) are systematically analysed with a combined numerical and field approach.

The presented numerical analysis is carried out on a synthetic fracture. Simulations of the signals of each of the above null-arrays, both in profiling and azimuthal modes, revealed specific characteristics, allowing prediction of responses in field situations.

Field investigations were carried out in the quarry in Les Breuleux (Switzerland), where geoelectric mapping of near-surface karstic

Abbreviations: MAN, Midpoint null-array; W $\gamma$ na, Wenner- $\gamma$  null-array; Sna, Schlumberger null-array; AL, Array length.

\* Corresponding author. Tel.: +41 32 718 26 13.

E-mail address: [pierik.falco@unine.ch](mailto:pierik.falco@unine.ch) (P. Falco).

fractures by null-arrays had already been carried out in a previous study (Szalai et al., 2002). Since then, the quarry has been expanded, revealing new and highly persistent fracture systems, explaining why the present field investigations were not carried out exactly at the same place as the previous study. This site allows cross-validation by geological mapping of fractures cropping out on the quarry wall.

In Les Breuleux, the three null-arrays were tested and compared to the numerical analysis on the one hand, and to classical geophysical investigation methods and geological mapping, on the other hand.

The three null-array methods are first presented, followed by the numerical analysis, leading over to the field application, concluding with a discussion on the applicability of null-arrays and with recommendations related to an optimal choice of null-array configurations in various field situations where fractures are present.

## 2. Null-array configurations

Amongst the just over hundred existing geoelectric arrays which have been listed and compiled in Szalai and Szarka (2008a), twenty five of them are null-arrays (Szalai and Szarka, 2011). Geometrical null-arrays, which are discussed in this paper are defined by particular electrode setups leading to a measured potential of zero above a homogenous half-space associated with an infinite geometric factor  $k$ .

This study focusses on two linear configurations, the MAN and the Wyna and on one non-linear configuration, the Sna, shown in Fig. 1a, b and c, respectively. These three configurations were chosen due to simple implementation in the field.

The MAN array was first introduced by Tarkhov (1957) with its current electrode  $A$  being located exactly between potential electrodes  $M$  and  $N$  (Fig. 1a). This array is geometrically equivalent to the classical pole-dipole array, shown in Fig. 1d.

The Wyna (Fig. 1b) is a modification of the Wenner- $\gamma$  array with the intermediate electrode spacing  $MB$  differing from the other electrode spacings  $a$  by a scaling factor  $c$  (Szalai et al., 2004). This array is geometrically equivalent to the classical Wenner-Schlumberger array, shown in Fig. 1e.

In the Sna (Fig. 1c), the potential electrodes  $M$  and  $N$  are located on an axis exactly between the  $A$  and  $B$  current electrodes oriented perpendicularly to the  $AB$  axis (Bogolyubov, 1984; Szalai et al., 2002; Winter, 1994). This array can be derived from the classical Schlumberger array, shown in Fig. 1f.

As indicated in Fig. 1, the geometric factor for all null-arrays is infinite. Therefore, the geometric factor of the respective classical arrays is used in the presentation of null-arrays data in order to obtain a non-infinite resistivity value. The resulting equivalent resistivities are therefore no real apparent resistivity values but they are related to the strength of the signal. This signal is provoked by subsurface anomalies (e.g. faults and fractures) and depends on their geometrical and electrical characteristics (Szalai and Szarka, 2006, 2008b, 2008c).

In order to localise and characterise geological fractures with null-arrays, two different measuring techniques are applied: (1) Profiling is done by using a given array and moving it step-by-step across a geological fracture, yielding lateral variations of the signal. These signals are interpreted with respect to the known position of the geological fractures. (2) Azimuthal measurements are carried out at a given spatial position, by step-wise rotation of the array around its centre point, yielding variations of the signal as a function of the orientation. In this work, the signals are interpreted with respect to known orientations of the geological features.

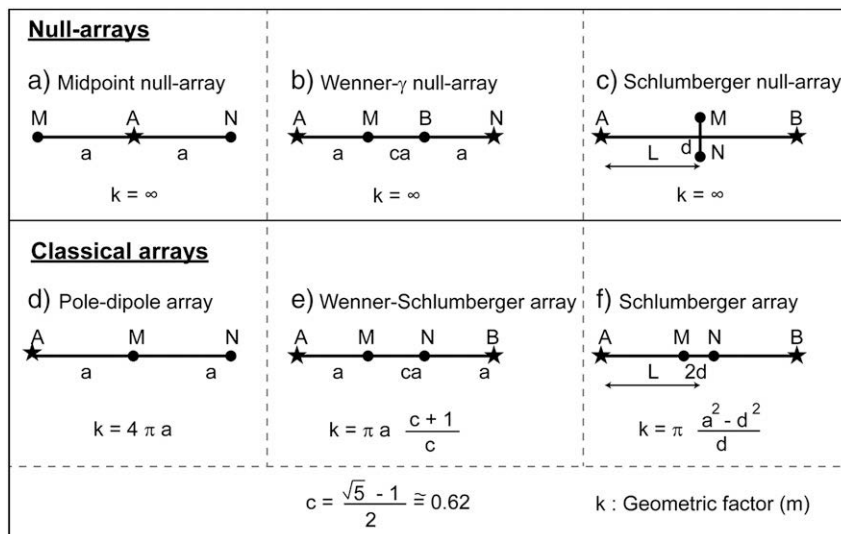
## 3. Numerical analysis

As geophysical forward simulations are often limited to pre-defined arrays (e.g. Loke's Res2dmod software is limited to five classical arrays) not allowing simulation of null-arrays, the perfect analogy between the electric and hydraulic equations allowed analysis of null-arrays with a 3D finite-element hydraulic software (FEFLOW, DHI-WASY, Berlin). The current electrodes are thereby transformed into steady-state hydraulic well-boundary conditions (pumping and injection wells), whilst the potential value is deduced from the head-difference observed at the positions of the potential electrodes. The explanation and development of this analogy and its advantages will be discussed in a separate paper.

First, the synthetic structure, reflecting an idealised fracture is presented, forming the basis for the subsequent numerical analysis. The three null-arrays are then tested in the profiling and azimuthal modes, yielding the theoretical responses used for field data interpretation.

### 3.1. Synthetic structure

In order to carry out a numerical analysis and to obtain the theoretical signals of null-arrays, a perfectly idealised vertical structure was chosen. Steep structures in nature are not only wide-spread but are



**Fig. 1.** Geometrical electrode configurations with  $A$  and  $B$  reflecting current electrodes and  $M$  and  $N$  the potential electrodes,  $a$  reflects the shortest distance between current and potential electrodes,  $c$  is a scaling factor equalling the golden ratio,  $d$  and  $L$  are the half distances between the potential electrodes ( $M^{(N)}/2$ ) and the current electrodes ( $A^{(B)}/2$ ), respectively. Null-arrays are shown in the first row with indicated infinite geometric factor: a) midpoint null-array (MAN); b) Wenner- $\gamma$  null-array (Wyna); c) Schlumberger null-array (Sna). The equivalent classical arrays shown in the second row with their respective geometric factor: d) pole-dipole array; e) Wenner-Schlumberger array; f) Schlumberger null-array.

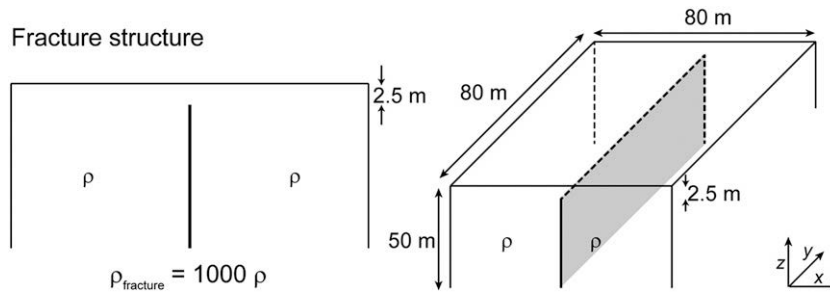


Fig. 2. Synthetic geological fracture structure used for the numerical simulations.

at the the same time difficult to identify with classical geophysical methods. The synthetic structure will allow evaluation of the performance of the different null-arrays in localising and identifying its direction under perfectly known conditions.

The chosen synthetic structure is shown in Fig. 2, reflecting a vertical fracture. The contrast between the fracture ( $\rho_{\text{fracture}}$ ) and the hostrock ( $\rho$ ) resistivities was set to 1000. In field situations, fractures can be conductive or resistive. Simulations have been led in both ways and nearly led to the same results. Hence, simulations presented here are only with resistive fractures. A superficial top-layer thickness of 2.5 m, covering the hostrock and the fracture resistivity was defined with the same resistivity as the hostrock. The thickness of the fracture is 0.2 m (Fig. 2).

This structure was discretised into quadrangular finite-elements, with horizontal and vertical extensions of 0.2 m and 0.5 m, respectively. The dimensions of the 3D domain is 80 m × 80 m × 50 m (Fig. 2).

### 3.2. Profiling

The three arrays were numerically simulated on the synthetic structure in profiling mode. Due to symmetry, all three arrays lead to zero potentials when they are parallel to the fracture (see Szalai et al., 2002). Additionally, Sna leads to zero potentials when the array is perpendicular to the fracture, as will be developed more in detail in the next section. Therefore, the profile direction was always chosen perpendicular to the structure with an array offset of 45°, as shown on Fig. 3. Simulation of the signals along the profile was done with a step of 1 m and an array length AL of 10 m.

Fig. 4 shows the numerical results of the three null-arrays along a 20 m long profile crossing the vertical fracture at the centre of the profile. The resistivity values, as mentioned earlier, reflect the strength of the signals rather than real resistivity values and are obtained by using the respective equivalent geometric factors shown in Fig. 1.

For the MAN (Fig. 4a), the position of the fracture is localised by the inflexion point of the curve at a theoretical value of zero. For both Wyna and Sna, the position of the fracture is given by the maximum of the peak, shown in Fig. 4b and c, respectively. An analysis, carried out by Szalai et al. (2004), on the effect of a varying top-layer thickness

showed that the MAN array yields stronger signals than the Wyna for deeper-lying structures.

In the field, only absolute values can be measured due to equipment-related constraints. This implies for the MAN, as shown in Fig. 4a and repeated in Fig. 5a, that the structure will be localised between two symmetrical peaks, as shown in Fig. 5b, and not at the inflexion point.

### 3.3. Azimuthal measurements

In order to analyse the performance of the three null-arrays in identifying the orientation of the fracture structure, three positions with respect to the fracture have been tested: i) directly above the structure, at 0 m, ii) perpendicularly slightly displaced by 2 m, and iii) perpendicularly displaced by 4 m. For a given electrode spacing, the layout is step-wise rotated around the central point of the array. In our analysis, the rotation was done by 15°, leading to a total of 12 measurements for each electrode configuration. The total rotation was completed by taking into account the symmetry of the arrays.

Fig. 6 shows the simulation results for the classical Schlumberger array (Fig. 6a, b and c) and the three null-arrays with the centre of the array exactly on the fracture (Fig. 6d, g and j), at a distance of 2 m (Fig. 6e, h and k) and at a distance of 4 m (Fig. 6f, i and l), mimicking the fact that field measurements will most likely not be done exactly on the structure.

For the classical Schlumberger array a distortion of the elliptic shape of the situation directly above the fracture (Fig. 6a) can be observed for the slightly displaced position (Fig. 6b and c). In some cases the direction of the main axis may be rotated by 90° which could lead to misinterpretation. Additionally, the strength of the signal decreases drastically as soon as the measurements are not done exactly above the structure. These two aspects render interpretation of the fracture orientation in cases where measurements are not taken directly above the fracture.

For symmetry reasons, the signal of the MAN is always zero directly above the structure (Fig. 6d). However, when it is not centred on the structure, the minimum axis of the ellipse yields its direction. For real-world situations the MAN therefore appears to be an appropriate

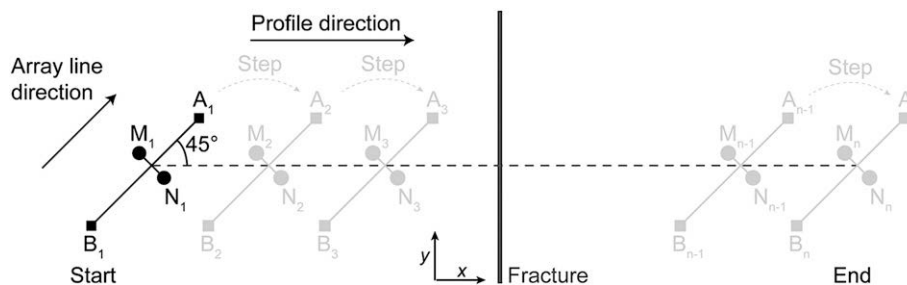
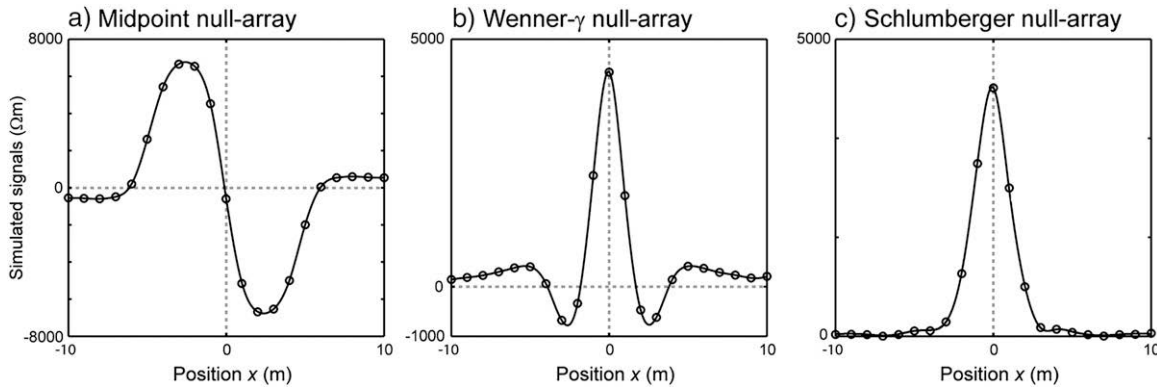


Fig. 3. Plan-view of the configuration of the Schlumberger null-array (Sna) profile with respect to the direction of the profile (stippled line) and to the fracture (bold grey line). The array is moved step-by-step along the profile. The linear arrays were performed with the identical array line direction.



**Fig. 4.** The null-array signals over a fracture localised at position 0 m: a) midpoint null-array (MAN), b) Wenner- $\gamma$  null-array ( $W\gamma na$ ) and c) Schlumberger null-array ( $Sna$ ). Array length ( $AL$ ) is 10 m and profile steps 1 m.

array to identify the fracture orientation, since it is very unlikely to carry out measurements exactly above a structure.

For the  $W\gamma na$ , when located directly above the structure, shown in Fig. 6g, it is possible to determine the direction of the fracture defined by the symmetry axis perpendicular to the two lobes. On the other hand, when displaced with respect to the structure, as shown in Fig. 6h, four lobes appear with two symmetry axis. Although the fracture structure in this case coincides with the a slightly longer symmetry axis, this may change in another situation (Fig. 6i). Therefore, it is not possible to unambiguously identify which of the two axes reflects the fracture orientation.

For the  $Sna$ , the situation is similar to the  $W\gamma na$  with four lobes (Fig. 6j) yielding two possible fracture orientations. As opposed to  $W\gamma na$  with four lobes, the two  $Sna$  symmetry axes are defined by the directions of the zero values. These zero values are due to the reciprocity principle (Lanczos, 1961; Van Nostrand and Cook, 1966) as current electrodes are perpendicular to the potential electrodes. Fig. 6j shows the signals for the  $Sna$  directly above the structure whilst Fig. 6k and l is slightly displaced, respectively. This array is able to identify the fractures's direction independently of the distance from the structure.

Amongst the presented arrays, the MAN is therefore the most appropriate one to determine the fracture's direction quite precisely independently from the distance from the structure.

In the field however there are often no isolated fractures, but a whole series of them. As a consequence, the phenomenon of the so-called anisotropy paradox (Keller and Frischknecht, 1966; Taylor and Fleming, 1988) plays a role. It results in the rotation of the diagrams by  $90^\circ$ , i.e. the direction of the fracture will be described by the long axis of the ellipse, not by the short one, for both the MAN and the  $W\gamma na$ . The situation is otherwise similar for the classical Schlumberger

array (Taylor and Fleming, 1988). The explanation and the implications of the anisotropy paradox and its conditions will be discussed in a separate paper.

#### 4. Field application

The aim of the field application was to test and validate the results of the numerical analysis in a setting, where the geological fractures could also be mapped. Hence, the position and the orientation of the fractures could be cross-validated and compared with the results from the geophysical survey which was carried out during a fortnight.

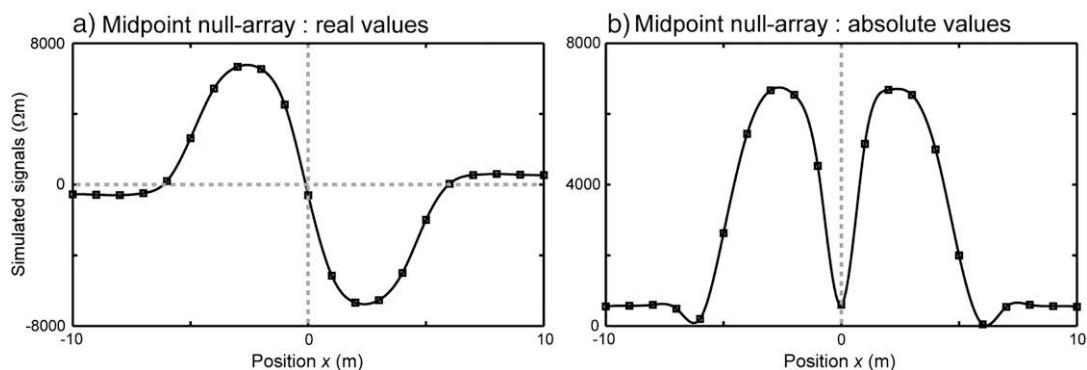
After a brief description of the methods, the setting and the field setup are described. Then, results from classical geophysical investigations, comprising electrical resistivity tomography, classical array profiling and very low frequency electromagnetics VLF-EM (e.g. Müller et al., 1995) and VLF-Grad (Bosch, 2002) are presented, leading over to the field results for the null-array profiling and azimuthal measurements. The different field approaches are then compared and discussed with respect to their performance in fracture characterisation.

##### 4.1. Methodology

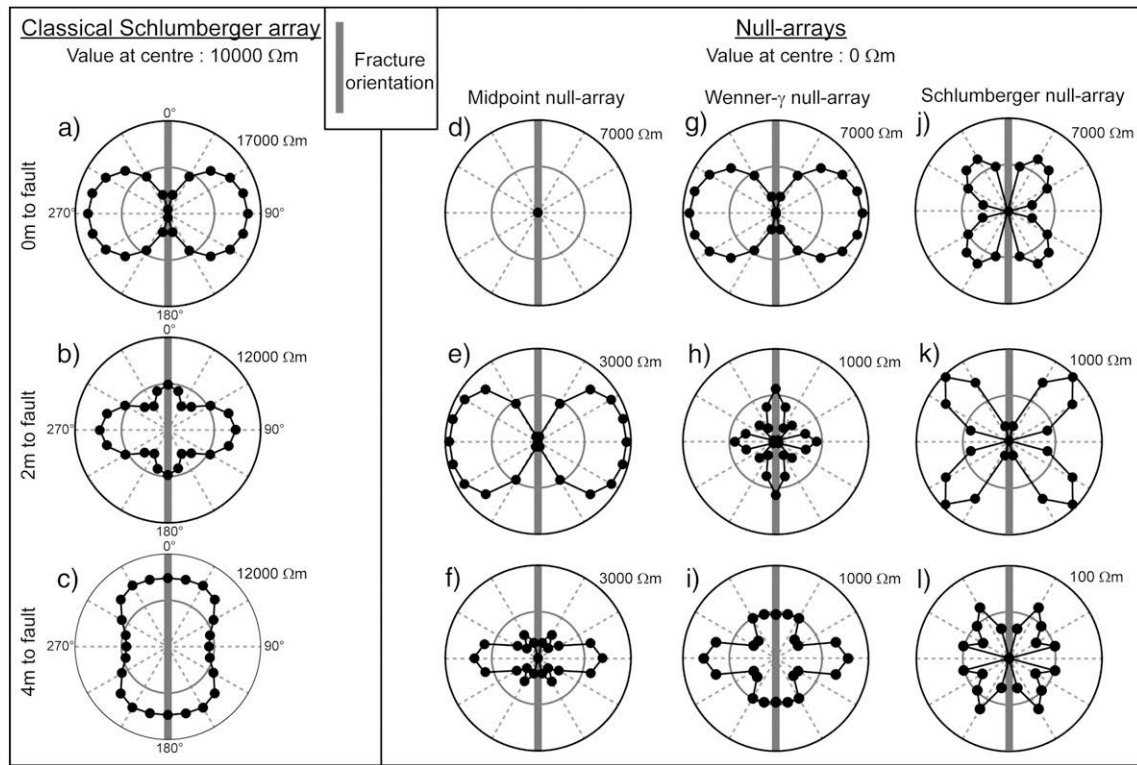
The equipment used in the field consisted of two different devices: a) a SYSCAL Junior Switch 72 (IRIS instruments), used for the ERT and null-array profiles and b) a VLF-receiver with a VLF-EM antenna and VLF-Grad antenna (J. Duperrex; Chateau d'Oex, Switzerland).

##### 4.1.1. ERT and null-array instrumentation

ERT measurements were carried out using 72 steel electrodes and four multi-core cables with a maximum electrode spacing of 5 m. ERT was performed with both dipole-dipole and Wenner arrays for



**Fig. 5.** Synthetic example illustrating the transformation from (a) theoretical values to (b) absolute values for the data set corresponding to Fig. 4a.

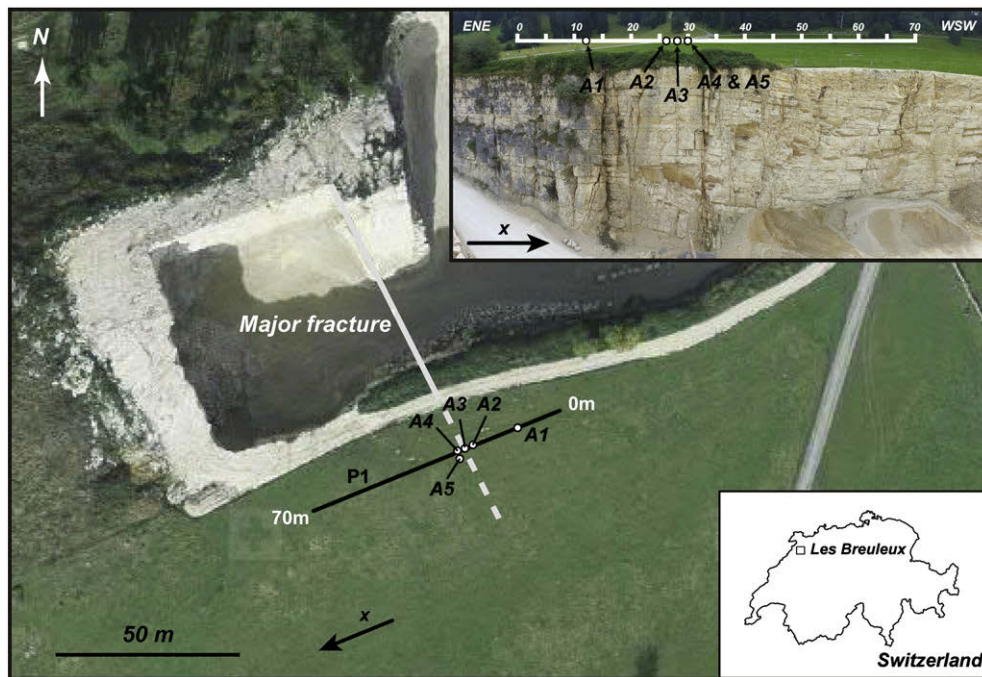


**Fig. 6.** Classical and null-arrays azimuthal diagrams for two positions to the fracture: classical Schlumberger at a) 0 m, b) 2 m and c) 4 m, midpoint null-array (MAN) at d) 0 m, e) 2 m and f) 4 m, Wenner- $\gamma$  null-array (W $\gamma$ na) at g) 0 m, h) 2 m and i) 4 m, Schlumberger null-array (Sna) at j) 0 m, k) 2 m and l) 4 m. External values give the apparent resistivity of the outer circle, whilst the centre is zero for null-arrays. For the classical Schlumberger array, the centre value is given. Direction of the fracture is 0°. Array length is 10 m for all arrays.

two electrode spacings, 1 m and 2 m. ERT profiles with 2 m electrode spacings were performed on a 142 m-long profile. The precision of the potential measurement and the accuracy of the resistivity are  $\sim 0.5\%$ . Potentials up to 400 V and currents up to 1.25 A were applied during

measurements, and corrected for self-potential. ERT acquisitions were performed with 3 to 6 stacks with a cycle time of 500 ms.

For the null-array profiles, the device adapts the potential in the range of 5–400 V, by varying the injected current ( $\sim 20$  mA). Depending



**Fig. 7.** Les Breuleux's quarry situated in the Jura, north-western Switzerland. Black line indicates the 70 m-long profile P1 (0m is on the eastern side). Grey line shows the direction of the major fracture at 30 m on P1, cropping out in the quarry. Positions A1–A5 reflect azimuthal measurement positions. Top right photo shows the quarry wall below the profile. Reproduced by permission of swisstopo (BA12058).

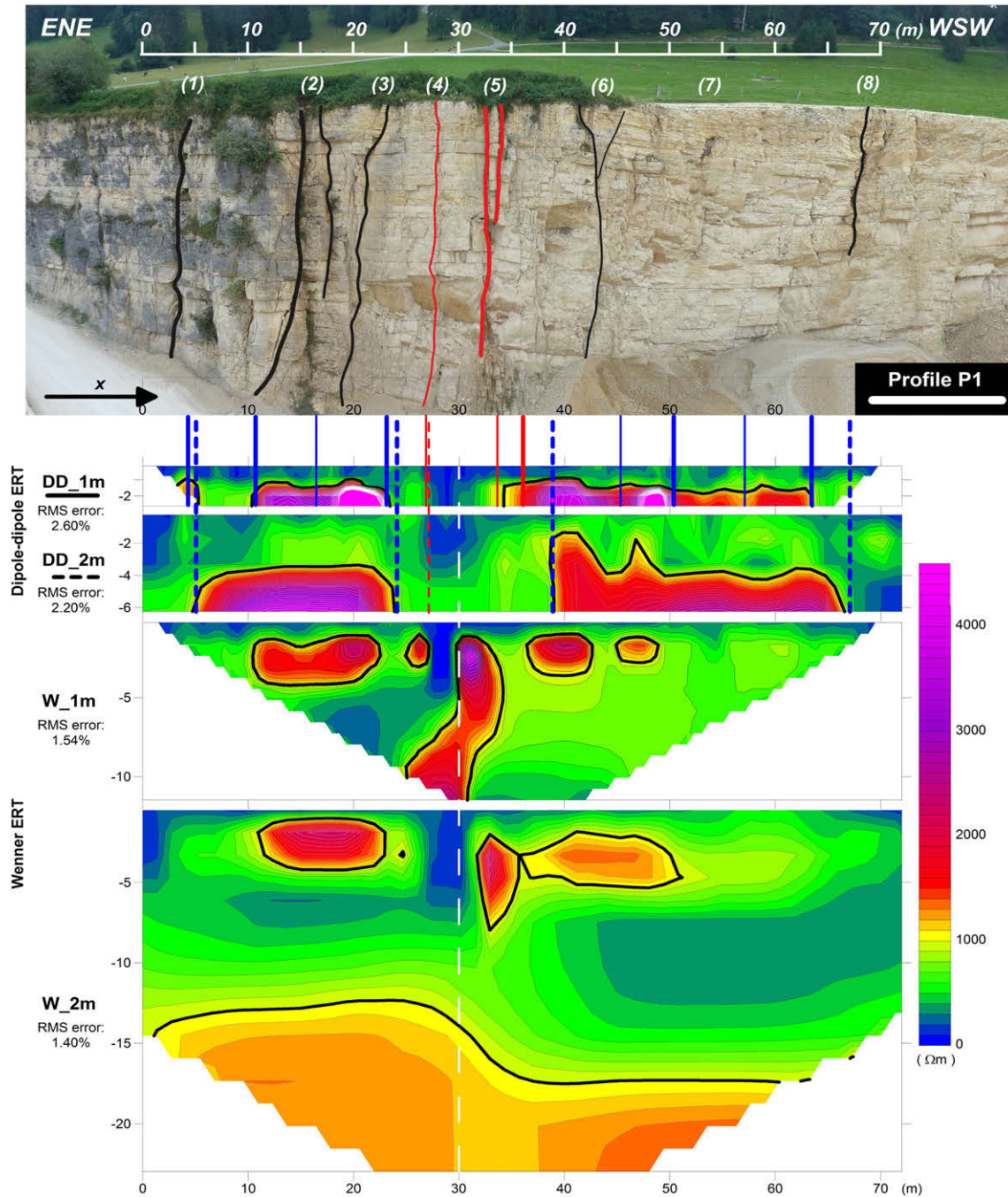
on the signal, current values can vary from 3 to 450 mA, whilst measured potential can vary between 1 and 150 mV.

#### 4.1.2. VLF-EM and VLF-Grad instrumentation

VLF-EM and VLF-Grad measurements were performed with two frequencies: 23.4 kHz and 183 kHz with an azimuth of the transmitter antennas in the north direction, i.e. roughly parallel to the direction of the fractures. The VLF-EM measurements are expressed as the imaginary parts (i.e. quadrature) of the ratio  $H_z/H_y$ , expressed in percent (%). Due to the asymmetry of the electromagnetic field with respect to a local

anomaly, the localisation of the anomaly has therefore to be interpreted as the inflexion point of the measured signal curve (Bosch, 2002; Müller et al., 1995).

In the VLF-Grad method, developed by Bosch (2002), measurements are expressed as the imaginary part of the difference of the horizontal magnetic component  $\Delta H_y$  measured at two altitudes ( $\Delta z = 1$  m for this device). The result is represented in percent with respect to the horizontal field, and multiplied by a device specific amplification factor  $k$  ( $\% * k$ ). The peaks are then interpreted as the positions of the anomalies (Bosch, 2002).



**Fig. 8.** Top photo: Les Breuleux quarry wall with indicated steep fracture structures (black lines). Red lines indicate the main fracture at about meter 30 along P1. Lower graphs: results from ERT survey: bold lines show transition zones in the limestone below the soil cover detected by dipole–dipole 1m electrode spacing array (DD\_1 m), dashed lines indicate transition zones detected with the dipole–dipole 2 m electrode spacing array (DD\_2 m), white line indicates detected zones corresponding to the main anomaly at 30 m, also detected by Wenner tomographies, W\_1 m and W\_2 m (white dashed lines). Contour interval of iso-values 200  $\Omega$ m.

### 4.2. Field setup

The Breuleux quarry, located in the Jura mountains (Switzerland) was chosen as the field test site (Fig. 7). In this quarry, outcrops of Jurassic massive limestones of the Jura fold and thrust belt are well exposed on the 25 m high quarry wall. The quarry has been excavated within a fold with an axis of about N80°. The limestones exposed in the quarry are crosscut by several sub-vertical fractures and overlain by a soil cover (top right photo, Fig. 7). The geometry of the structures in this quarry reflects a whole series of steep fractures, similar to the synthetic structure used for the numerical analysis (Fig. 2). Eight fracture families (1)–(8) were mapped on the quarry wall (Fig. 8). The thickness of the lines drawn on the discrete fractures are related to the fracture aperture and persistence.

The black line in Fig. 7 shows the 70 m long east–west oriented profile P1 which was investigated with the different geophysical methods. The profile and its approximate projected scale are indicated on the photo at the top right of Fig. 7. The projection of the geophysical results onto this profile may lead to a positioning error of 2–3 m. Positions of azimuthal measurements (Fig. 7) were defined from the results of the profiling measurement, in order to be located between two fractures (A1), close to a major fracture (A2 and A3), and directly above the fracture (A4 and A5).

### 4.3. Results of geophysical profiling investigations

In order to obtain as much information as possible, measurements along the profile P1 were done with multiple classical geophysical methods as well as with the null-array configurations. In the following, the results of the electrical resistivity tomography (ERT) are first presented, followed by the results derived from classical profiling measurements, leading over to the null-array profiling results.

#### 4.3.1. Electrical resistivity tomography (ERT)

The results of the Wenner ERT shows roughly two layers: an overlying conductive one of 10 to 15 m thickness and a more resistive lower layer (Fig. 8). A conductive anomaly appears at ~30 m, at a depth between 2 and 10 m (Fig. 8). This anomaly corresponds to the major fracture that crosscuts the quarry (cf. Fig. 7). A step is observed at the interface between the two layers in the Wenner 2 m ERT profile (Fig. 8). Dipole–dipole ERT is known to be more sensitive than Wenner ERT to vertical structures. The sensitivity to lateral heterogeneity is

clearly shown in Fig. 8 for the two dipole–dipole ERT, whilst the investigation depth is smaller than for the Wenner ERT. The main anomaly detected with the Wenner ERT at 30 m is still the most pronounced, but additional anomalies appear too. Secondary fractures are also detected by the dipole–dipole ERT (blue lines in Fig. 8).

#### 4.3.2. Classical profiling methods

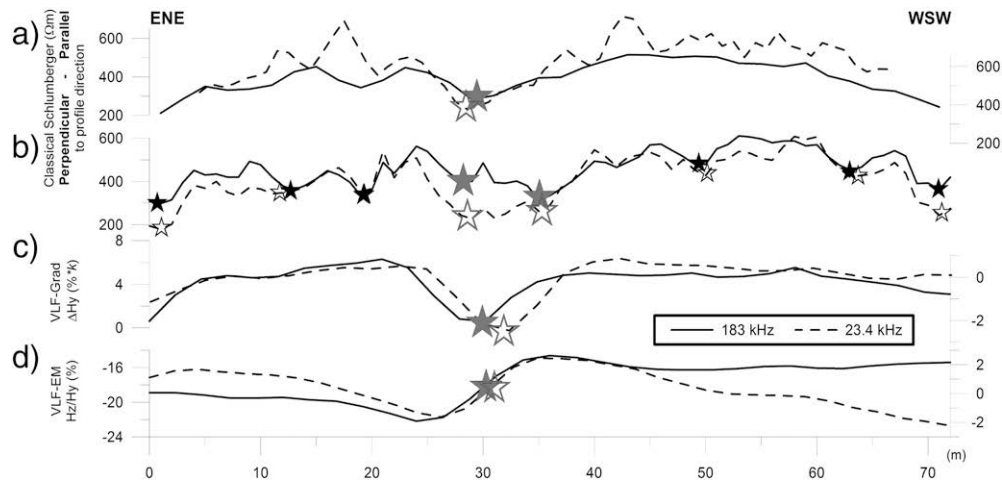
Classical geoelectrical and electromagnetic measurements were carried out for cross-validation and comparison purposes. A profile along P1 was carried out with the classical Schlumberger array with two array lengths (AL), 10 and 20 m with measurement steps of 1 m: one profile with the array in the same direction as P1 (in-line measurement), and one profile with the array perpendicular to P1 (offset measurement). The results of the classical geoelectrical and electromagnetic profiles along P1 are shown in Fig. 9.

The only clear feature identified by the Schlumberger profile parallel to P1 (by coinciding minimas for both electrode spacings) is the main fracture at 30 m, being coherent with the ERT measurements (Fig. 9a). On the profile perpendicular to P1, the fracture at 30 m is characterised by two clear minima (Fig. 9b). As for the dipole–dipole ERT, other anomalies (black stars in Fig. 9b) can be identified. The VLF curves shown in Fig. 9c and d only reveal the main anomaly at about 30 m on the profile P1. It corresponds to the inflexion point for the VLF-EM (Fig. 9c) and to the peak maximum for the VLF-Grad (Fig. 9d). This prominent anomaly, also detected by all classical electrical methods, is the only feature that both VLF methods detected. This can be explained by a far higher resistivity contrast and/or width and vertical extension.

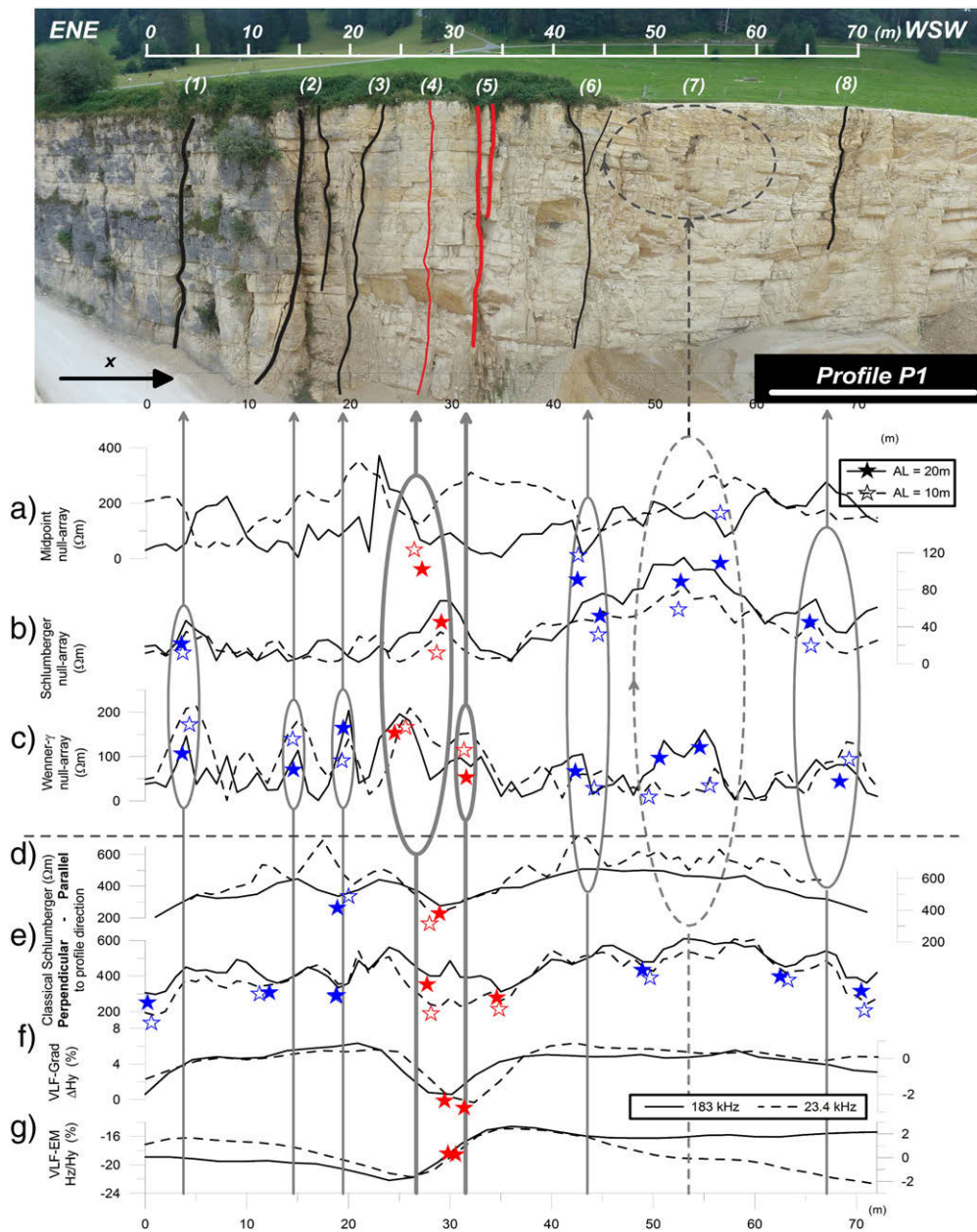
#### 4.3.3. Profiling with null-arrays

According to the numerical analysis, all three presented null-arrays are capable of detecting the position of fractures in the profiling mode, yielding strong signals (Fig. 4). For Sna and Wyna, the position of the fracture is defined by the maximum of the peak, whilst for the MAN array the fracture is theoretically defined by the minimum between two symmetrical peaks (Fig. 5).

Field data for null-arrays data along P1 are shown in Fig. 10 together with the data retrieved from the classical methods. All null-array profiles were carried out for two electrode spacings, 10 m (dashed lines) and 20 m (full lines), with a measurement step of 1 m. The angle offset between the direction of the profile P1 and the array axis was approximately 45°. Only anomalies detected by both array lengths were considered. The MAN profile along P1 reveals one



**Fig. 9.** Results of classical geophysical profiles along P1: classical Schlumberger profile a) with array parallel to P1 and b) with array perpendicular to P1, for two electrode spacings (10 m and 20 m); c) VLF-Grad  $\Delta H_y$  (% , amplified by a factor); d) VLF-EM quadrature Hz/Hy (%). Classical Schlumberger profiles lead to apparent resistivity values ( $\Omega m$ ). Dashed lines indicate the near-surface measurements (array length 10 m for Schlumberger profiles and 183 kHz frequency for VLF profiles), full lines for deeper investigation depth (array length 20 m and 23.4 kHz frequency). Grey stars indicate main anomaly at 30 m detected by the given methods. Black stars indicate minor anomalies.



**Fig. 10.** Photo of the quarry wall with numbered mapped fractures (black lines) and main fractures (red lines). Profiles of null-arrays carried out with electrode spacings 10 m (dashed lines) and 20 m (full lines): a) midpoint null-array (MAN), b) Schlumberger null-array (Sna), c) Wenner- $\gamma$  null-array (Wyna); d)–g) correspond to the profiles shown in Fig. 9. Stars show anomalies detected by the given methods. The red stars highlight the signals related to the major fracture at 30 m, the blue stars indicate other detected fracture zones. The grey ellipses group anomalies which can be assigned to corresponding geological features, indicated with arrows. The dashed ellipse corresponds to the wide fractured zone (7).

prominent anomaly corresponding to fractures (4) and (5) (Fig. 10a). Two other anomalies are also detected towards the WSW (Fig. 10a). The Sna profile also identifies the main fractures (4) and (5), as well as four other anomalies correlating with quarry fractures (Fig. 10b). The amplitude for the electrode spacing 10 m was exaggerated by a factor 2.

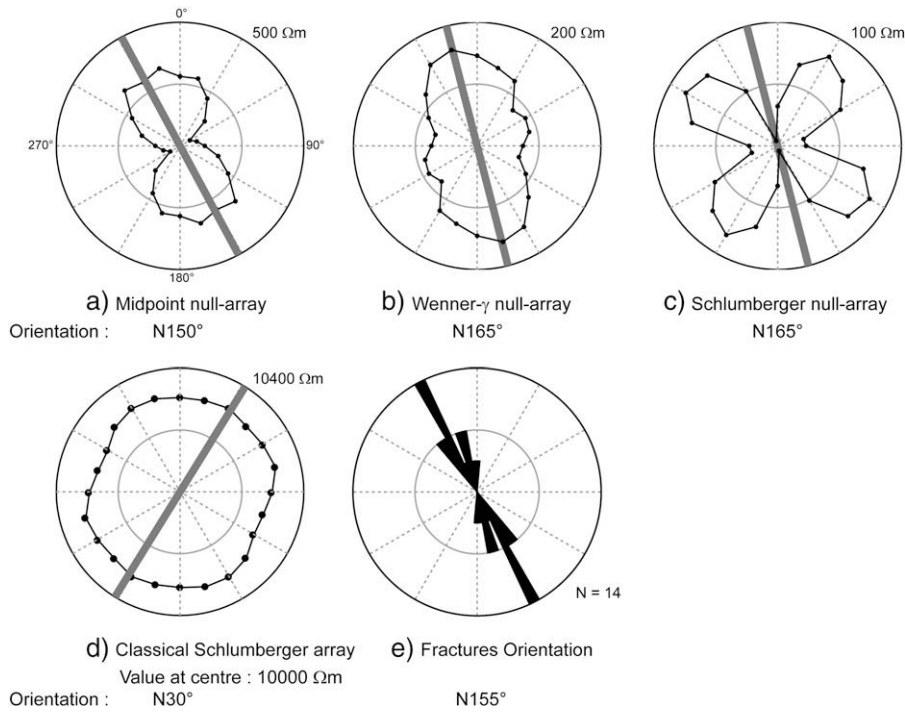
The Wyna profile distinguishes eight anomalies (Fig. 10c). Five of them are prominent, with sharp and high peaks, including two attributed to the main fractures (Fig. 10c). Three minor anomalies correlate well with the observed geological fractures (Fig. 10c).

The fracture zones (4) and (5), characterised by a mapped vertical displacement, are detected with all profiling methods (Fig. 10). Moreover, as all observed fractures were identified with Wyna, this array seems to be the most appropriate for fracture localisation.

#### 4.4. Azimuthal measurements with null-arrays

Fourteen azimuthal measurements were performed at five different positions (Fig. 7). The positioning was done in accordance with the geological mapping, which also included mapping of the orientation of the fractures: position A1 located between fracture zones (1) and (2), A2 located near to fracture zone (5), A3 slightly displaced from the position of A4, located above the major fracture zone (5) and A5 another location to study the effect of mispositioning close to A4. In accordance with the numerical simulation, measurements were carried out every 15° around the central point of the array.

As an example of results, Fig. 11a–c show the azimuthal diagrams obtained at the position A4 for all null-arrays, yielding a fracture orientation of 150°–165°. The shapes of the measured diagrams are in very good



**Fig. 11.** Azimuthal measurements at position A4 on profile P1 with an array length of 20 m: a) midpoint null-array (MAN), b) Wenner- $\gamma$  null-array (W $\gamma$ na), c) Schlumberger null-array (Sna), d) classical Schlumberger array. e) Rose diagram representing the strike of the fractures in the quarry. Measured orientations are written below.

accordance with the numerical analysis if the anisotropy paradox is taken into account (Fig. 6). Fig. 11d shows the azimuthal diagrams measured at position A4 with the classical Schlumberger array. According to Keller and Frischknecht (1966), if the anisotropy paradox occurs, the long axis of the ellipse on polar diagrams should be parallel to the fracture, e.g. N30° in that case. Fig. 11e represents the rose diagram of all the fracture orientations measured on the quarry wall, where the orientation of fracture zone (5), i.e. 150°, high-lighted as a stippled line, is in very good accordance with the azimuthal measurements.

Fig. 11a shows the diagram for the MAN, yielding a fracture orientation of 150°, normal to the well-defined minimum orientation. Fig. 11b shows the diagram of W $\gamma$ na. In this case, the direction with its major axis being N165° corresponds to the fracture orientation. Fig. 11c shows the diagram for the Sna measurements, yielding two possible fracture orientations, N165° or N75°. The classical Schlumberger array does not seem in accordance with other measurements. Since the orientations derived from Sna have a higher accuracy than the other arrays, combining them with the MAN will allow the choice of the correct orientation.

Table 1 shows the summary of all azimuthal data results. All measurements lead to a very similar orientation, between 150° and 165°, which are in good agreement with the geological measurements (Fig. 11e).

**Table 1**

Orientations obtained from azimuthal measurements with the three null-arrays at different positions on profile P1 (except for A5). Results given as a range indicate a lack of measurement accuracy.

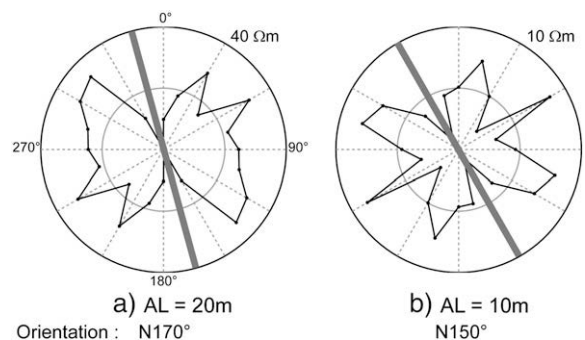
Name	A1	A2	A3	A4	A5
Position	12 m	26 m	28 m	30 m	30 m, 2 m South
MAN AL = 10 m			N150°	N150°	N165°
W $\gamma$ na				N165°	
Sna	N165°–150°	N150°		N165°	
MAN AL = 20 m			N150°	N150°–165°	N150°–165°
W $\gamma$ na				N165°–150°	
Sna	N130°–150°	N165°		N165°	

In some cases, interpretation of the azimuthal diagram is not straight-forward, possibly due to near-surface effects on the measured signal. But even in such cases, it is possible to evaluate the orientation of the fracture. As an example, Fig. 12 shows the azimuthal diagrams of the Sna at position A2 (Fig. 12a with array length 20 m and Fig. 12b with 10 m array length). It reveals that the distortion of the theoretical shape is most likely the consequence of a measuring error (at 45° and its pair at 225° in Fig. 12b). However, the real fracture orientation is still identified by the clear minima (at N150°).

4.5. Discussion of field measurements

The field measurements have shown that null-arrays have a considerable potential in detection of the position and orientation of fractures, correlating in most cases with the numerical analysis.

As shown in Fig. 10, null-array profiles are far more sensitive to a variety of fractures at different scales than VLF profiles which only detected the major fractures. The W $\gamma$ na was found to be the most sensitive of all methods. Of the classical geophysical methods, the Schlumberger array perpendicular to the profile proved to be the most sensitive with respect



**Fig. 12.** Azimuthal diagrams obtained at position A2 with Schlumberger null-array (Sna) illustrating the possible distortion of field measurements diagram with respect to the theoretical analysis for two electrode spacings: a) array length 20 m; b) array length 10 m.

to the identification of fractures, but the correlation with the mapped geological fractures is rather questionable.

For azimuthal measurements, the orientation of the fracture was best defined by the combined use of MAN and Sna. The field results matched well to the numerical analysis, and to the geological data gathered in the quarry. The classical Schlumberger array is the only one which does not match with other data.

For profiling and azimuthal measurements, the array size should, on the one hand, not be chosen too long, to avoid overlapping of fractures. On the other hand, it should be long enough in order to reach the required depth. Ideally, the array length should be similar or slightly bigger than the distance between main fractures. In field situations, where this distance is typically not known, it is recommended to carry out the same profile with at least two distinctly different array lengths in order to identify the optimal size.

The investigation depth for null-array measurements is difficult to determine. It is expected that they are at least sensitive to shallow fractures. Since no inversion of data is carried out, more precise evaluation of the investigation depth is not possible.

For azimuthal measurements, a step-wise rotation of 15° seems to be a good compromise between accuracy, given by the number of data points and efficiency.

For profiling with null-arrays in the field, the Wγna is the most recommended array, although results from Sna are also satisfactory. The major disadvantage of the Sna, in addition to its lower sensitivity is related to its implementation in the field, requiring twice as much time to perform a profile than for the Wγna.

For azimuthal measurements, the MAN yields a unique but less precise orientation allowing to choose between the two more precise perpendicular directions determined by the Sna.

## 5. Conclusions

This study has shown that geoelectrical null-arrays are a powerful tool for the characterisation of fractures, comprising localisation and determination of orientation. Three null-array methods were investigated, in profiling and azimuthal modes, first in a numerical analysis, followed by a field application.

In the profiling mode, the numerical analysis revealed that the position of the fracture for both Wγna and Sna coincides with the maximum of the peak, allowing very precise localisation. For the MAN, the position of the fracture is localised by the inflexion point of the curve at a theoretical value of zero, rendering identification more delicate. The results from the field profiles revealed that the Sna detected more fractures than the MAN, but the Wγna was the only null-array capable of localising all the observed fractures. All classical geophysical methods applied in the field were only able to detect the major fracture zone but none of them was capable of detecting the minor fractures. Hence, the use of null-arrays, in particular the Wγna, which has been rarely used so far, has proved to be a powerful method in the field for characterisation of fractures.

In the azimuthal mode, the numerical analysis resulted in typical polar diagrams for each null-array. They revealed two possible orientations of a fracture perpendicular to each other for the Sna and the Wγna, whilst the MAN array yields a unique solution. However, the orientations derived from Sna have the highest accuracy. The field results, carried out at different positions with respect to the major fracture zone, yielded polar diagrams mostly in very good accordance with the numerical analysis. The orientation of the fracture was best determined by combining the Sna with the MAN: the MAN allowing the choice of the correct orientation given with the best precision by the Sna.

In summary, the Wγna is the most appropriate and efficient for the profiling mode, whilst the combined use of MAN and Sna yields the best results for the azimuthal mode in field situations. The MAN is easy in its implementation, allowing evaluation of the orientation.

The Sna, being far more cumbersome in its implementation will only add accuracy to the MAN results.

Being relatively time-consuming in comparison with other geophysical methods reflects a major draw-back of null-arrays. Another weakness is related to the array length, ideally similar to the distance between the fractures, which in turn are the unknown object of investigation.

In this paper, only one synthetic structure was analysed and compared to the field situation. Therefore, field measurements may be misinterpreted, since the behaviour of these arrays on other structures still has to be investigated. However, the presented results show that geoelectric null-arrays can play an important role in characterising fractures.

## Acknowledgments

We gratefully acknowledge Prof. Christian Hauck and the University of Fribourg for lending the geophysical device and for fruitful discussions. Thanks to the physicist Lucien Falco for the assistance during the field work. The careful reviews and conspicuous comments by Dr. Markus Gurk were highly appreciated.

## References

- Bogolyubov, N.P., 1984. Guide to Interpreting Two-component Modified VES. Stroyizdat, Moscow (In Russian).
- Bosch, F., 2002. Shallow depth karst structure imaging with the Very Low Frequency-Electromagnetics Gradient (VLF-EM GRAD) method: a new geophysical contribution to aquifer protection strategies compared with other near surface mapping geophysics. PhD Thesis. University of Neuchâtel.
- Edwards, L.S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics* 42 (5), 1020–1036.
- Keller, G.V., Frischknecht, F.C., 1966. *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press.
- Lanczos, C., 1961. *Linear Differential Operators*. Van Nostrand, New York.
- Loke, M.H., 2012. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Copyright (1996–2012). Available via <http://www.geotomosoft.com/downloads.php> (Accessed 8 September 2012).
- Marescot, L., 2004. Modélisation directe et inverse en prospection électrique sur des structures 3D complexes par la méthode des éléments finis. Thèse de Doctorat. Université de Nantes.
- Müller, I., Stiefelwagen, W., Intchi, A.R., 1995. Réflexions sur les résultats obtenus par l'enregistrement en continu des paramètres géophysiques, électromagnétiques (VLF-EM) et magnétiques, pour l'exploration hydrogéologique des aquifères karstiques (Grotte de Milandre, Jura Suisse). *Bulletin de la Société Neuchâtoise de Sciences Naturelles* 118, 109–119.
- Parker, L.R., 1984. The inverse problem of resistivity sounding. *Geophysics* 49, 2143–2158.
- Roy, A., Apparao, A., 1971. Depth of investigation in direct-current methods. *Geophysics* 36 (5), 943–959.
- Szalai, S., Szarka, L., 2006. Parameter sensitivity maps of surface geoelectric. ICEEG, Wuhan, China, *Geophysical Solutions for Environment and Engineering*, vol. 1. Science Press USA, Inc. 260–264.
- Szalai, S., Szarka, L., 2008a. Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays. Part 1: linear arrays. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 43, 419–437.
- Szalai, S., Szarka, L., 2008b. Parameter sensitivity maps of surface geoelectric arrays. Part 2: nonlinear and focussed arrays. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 43, 439–447.
- Szalai, S., Szarka, L., 2008c. On the classification of surface geoelectric arrays. *Geophysical Prospecting* 56, 159–175.
- Szalai, S., Szarka, L., 2011. Expanding the possibilities of two-dimensional multielectrode systems, with consideration to earlier geoelectric arrays. *Journal of Applied Geophysics* 75 (1), 1–8.
- Szalai, S., Szarka, L., Prácsér, E., Bosch, F., Müller, I., Turberg, P., 2002. Geoelectric mapping of near-surface karstic fractures by using null-arrays. *Geophysics* 67, 1769–1778.
- Szalai, S., Szarka, L., Marquis, G., Sailhac, P., Kaikonen, P., Lahti, I., 2004. Colinear null-arrays in geoelectrics. IAGA WG 1.2 on Electromagnetic Induction in the Earth.
- Tarkhov, A.G., 1957. On electric geophysical exploration methods of a pure anomaly. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR. Seriya Geofizika* 8, 979–989.
- Taylor, R.W., Fleming, A.H., 1988. Characterizing jointed systems by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water* 26, 464–474.
- Van Nostrand, R.G., Cook, K.L., 1966. Interpretation of resistivity data. Geological Survey Professional Paper 499. US Government Printing Office, Washington DC.
- Winter, H., 1994. Tensor-Geoelektrik an der Kontinentalen Tiefbohrung. *Fortschrittberichte, VDI, Reihe 8, Nr. 379*. VDI Verlag.