HAL
open science

Évaluation de l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical (Bénin, Afrique de l'Ouest) : apport de la tomographie de résistivité électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique

Iboukoun Christian Alle

▶ **To cite this version:**

Iboukoun Christian Alle. Évaluation de l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical (Bénin, Afrique de l'Ouest) : apport de la tomographie de résistivité électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique. Hydrologie. Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 2019. Français. NNT : . tel-02546348v3

HAL Id: tel-02546348

https://theses.hal.science/tel-02546348v3

Submitted on 1 Jul 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Évaluation de l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical (Bénin, Afrique de l'Ouest) : apport de la tomographie de résistivité électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique

Thèse de Doctorat

Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA - Chaire UNESCO)

Université d'Abomey-Calavi (UAC)
Cotonou, République du Bénin

par

Iboukoun Christian Y. M. ALLE

Sous la Direction de :

- Dr Nicaise YALO, Maitre de Conférences, UAC, Bénin
- Dr Marc DESCLOITRES, Ingénieur de recherche, HDR, IRD, France

ICMPA PUBLISHING © 2019

CIPMA – CHAIRE UNESCO

Université d'Abomey-Calavi (UAC), BENIN
Chaire Internationale en Physique Mathématique et Applications
(CIPMA - Chaire UNESCO)

PhD N°10571207-19/PhD/CIPMA/FAST/UAC

Évaluation de l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical (Bénin, Afrique de l'Ouest) : apport de la tomographie de résistivité électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique

Thèse de Doctorat
Présentée pour obtenir le grade de
Docteur en Sciences de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin.
Option : **Hydrologie et Gestion Intégrée des Ressources en Eau**
Spécialité : **Hydrogéophysique**

Soutenue publiquement le 21 décembre 2019 à Abomey-Calavi
par
Iboukoun Christian Y. M. ALLE

Jury

Monsieur Euloge AGBOSSOU	Professeur titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)	Président
Monsieur Emmanuel KOUADIO	Maître de Conférences, Université Félix Houphouët-Boigny (Côte-d'Ivoire)	Rapporteur
Monsieur Youssouf KOUSSOUBE	Maître de Conférences, Université Ouagadougou I (Burkina-Faso)	Rapporteur
Monsieur Moussa BOUKARI	Professeur titulaire, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)	Examinateur
Monsieur Nicaise YALO	Maitre de Conférences, Université d'Abomey-Calavi (Bénin)	Directeur de Thèse
Monsieur Marc DESCLOITRES	Ingénieur de recherche, HDR, Institut de Recherche pour le Développement (France)	Co-Directeur de Thèse
Monsieur Georges AGBAHUNGBA	Colonel de l'armée Béninoise, Cotonou (Bénin)	Invité

Cotonou, Rép. du Bénin, 21 décembre 2019

A mes parents,

A Oressan et Bayodé.

Remerciements

Cette thèse est le fruit d'une collaboration entre le Laboratoire d'Hydrologie Appliquée (LHA) de l'Institut National de l'Eau (INE) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD). Elle a été financée et réalisée grâce à une Allocation de Recherche pour une Thèse au Sud (ARTS) de l'IRD, au projet EuropAid Groundwater Ressources in Basement Rock of Africa (GRIBA) et à la Jeune Equipe Associée à l'IRD « Aqui-Bénin » (JEAI). Je remercie tous ceux qui ont initié et contribué à l'existence de ces opportunités.

Ce travail a été mené jusqu'au bout, grâce à l'accompagnement de mes Directeurs de thèse, Dr (MC) Nicaise YALO et Dr (HDR) Marc DESCLOITRES. Je tiens à leur exprimer ma profonde gratitude pour tout. L'ambiance de travail, les orientations et les encouragements de leur part, constituent le socle de cet aboutissement. J'exprime une gratitude particulière au Dr Jean-Michel VOUILLAMOZ, Coordinateur du projet GRIBA, pour la belle opportunité qu'il m'a donnée d'effectuer les travaux de terrain, et pour ses éclairages lumineux, merci !

Aux enseignants-chercheurs de l'INE qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'existence de ce travail, je dis merci, en particulier : à son actuel Directeur, le Professeur Daouda MAMA pour sa confiance ; aux Professeurs Moussa BOUKARI et Abel AFOUDA qui, avec le Directeur, ont initié la Formation Professionnelle en Hydrologie d'alors où tout a commencé avec la première promotion dont je fais partie ; à l'ex Directeur de l'INE, le Professeur Euloge AGBOSSOU qui a bien voulu présider mes points de thèse ; au Professeur Emmanuel LAWIN et au Dr (MC) Abdoukarim ALASSANE pour leurs encouragements.

J'exprime ma reconnaissance : au Professeur M. Norbert HOUNKONNOU, Président de la CIPMA - Chaire UNESCO, pour m'avoir accepté dans son école doctorale ; au Dr (MC) Ezinvi BALOITCHA et au Colonel Georges AGBAHUNGBA pour leurs accompagnements.

A l'IGE de Grenoble, je remercie Sylvie GALLE, Co-coordinatrice du LMI « REZOC » pour les possibilités de financement, Anatoly LEGCHENKO, Marie BOUCHER, Jean Martial COHARD et Basile HECTOR pour leurs éclairages sur certaines questions.

Aussi, à l'ISTerre de Grenoble, j'ai eu la chance de rencontrer Bruno LANSON et Nathaniel FINDLING qui ont accepté m'aider à faire la diffraction de rayons X. Je tiens à les remercier pour cette aide. Merci à Patrick LACHASSAGNE pour l'accueil à Evian et pour avoir *reviewé* mon article avec perspicacité.

Merci également à l'équipe IRD de Cotonou installée à la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) où je suis resté durant la thèse. Spécialement : à Théodore OUANI et Simon AFOUDA avec qui j'ai effectué des travaux de terrains dans des conditions difficiles ; à Maxime WUBDA et Marc ARJOUNIN pour l'ambiance dans le bloc IRD ; et aux volontaires internationaux, notamment Aurélien CAMPOY pour le code R et Jean KEMPF pour la convivialité. Je n'oublie pas Médard, Saré et Moussa à Djougou.

Travailler à la DG-Eau a été très agréable. Merci à tout le personnel, particulièrement : à Philippe ADJOMAYI, actuel DG avec qui j'ai eu le plaisir de faire du terrain ; au Dr Arnaud ZANNOU (ex DG) pour son accueil d'alors ; à Martial DOSSOU pour son encouragement ; et à Francis AZONWADE pour son aide dans la réalisation des tests de bleu de méthylène.

La Représentation de l'IRD à Cotonou a été d'une importance capitale pour toutes les facilités administratives. Je dis merci à toute l'équipe à travers l'actuel Représentant, Mr Florent ENGELMANN qui, par sa promptitude à réagir, a été d'une aide remarquable.

Un remerciement SPECIAL à mes collègues et camarades de promotion, Fabrice LAWSON et Valerie KOTCHONI ; après de nombreuses années de travail passées ensemble dans GRIBA et dans d'autres projets, nous sommes devenus aujourd'hui une équipe. Merci pour ces moments de complémentarité et de fraternité. Je ne saurais omettre Jean-Baptiste GNONHOUE, l'homme à tout faire de l'équipe, un merci parmi tant d'autres pour le câble de diagraphie. A mes camarades Consolas ADIHOU et Raoul KPEGLI, avec qui j'ai réalisé des travaux de terrains dans GRIBA, merci, et bon vent à vous !

Au Burkina Faso, dans le cadre de GRIBA, j'ai travaillé avec Dimitri SORO, un ami avec qui j'ai passé des moments agréables. Je te remercie en espérant que nos collaborations futures seront prospères. Ce séjour m'a permis de connaître aussi Dr (MC) Mahamadou KOITA qui m'a accueilli à 2IE avec plaisir. Merci à lui et au Dr (MC) Youssouf KOUSSOUBE que j'ai connu par la même occasion et qui n'a cessé de m'encourager lors de ses passages au Bénin.

Merci à mon frère, Dr Ulrich ALLE pour ses conseils. Je fais un clin d'œil à mon oncle Grégoire ALE et ses collègues du cabinet COWI, Thierry HELSENS et Marc VAN LIERDE, pour leurs encouragements. A mon feu beau-père, Dr Laurent AGOSSA, merci pour ton accueil à Ouagadougou et pour tout, repose en paix !

Résumé

En zone de socle d'Afrique de l'Ouest et particulièrement au Bénin, constitué de 80 % de roche de socle, malgré l'étude d'implantation préalable, 40 % des forages d'eau sont « négatifs » (<700 l/h), constituant ainsi une perte importante. Cette thèse vise à améliorer la partie géophysique de l'implantation des forages afin d'améliorer le taux de succès des forages. Pour cela, une évaluation de la méthode géophysique dite « électrique à courant continu » (principalement utilisée par les praticiens), est faite après avoir défini la cible hydrogéologique à privilégier pour l'implantation de forage dans un contexte de socle à altération épaisse. Pour cette évaluation, nous avons vérifié sur 6 sites expérimentaux la sensibilité des paramètres de la méthode électrique (résistivité et chargeabilité) *(1)* à la cible hydrogéologique en comparant les valeurs mesurées en forages (diagraphies) aux relevés des forages, *(2)* aux paramètres hydrodynamiques (porosité de drainage et conductivité hydraulique obtenues via essais de pompage), et *(3)* à la teneur en argile (via diffractométrie de rayons X et test de bleu de méthylène). Nous avons par la suite, évalué la capacité des techniques de mesure géophysiques (Profils Electrique – PE, Sondages Electrique – SE, et Tomographie de Résistivité Electrique – ERT) à caractériser la cible depuis la surface grâce à *(1)* des modélisations numériques et *(2)* des mesures de terrain sur 7 sites.

Les résultats révèlent que la cible hydrogéologique à privilégier dans un contexte de socle en milieu tropical (où l'altération est généralement considérable) est la zone où l'épaisseur de la « Zone Altérée » (ZA) et les premiers mètres de la « Zone Fracturée Stratiforme » (ZFS) sont les plus importants, zones qui doivent être caractérisées par des résistivités respectivement comprises entre 150 et 400 ohm.m et entre 800 et 2.000 ohm.m. La résistivité est plus discriminante que la chargeabilité pour l'identification de la cible hydrogéologique. Ces deux paramètres géophysiques augmentent avec la porosité de drainage et la conductivité hydraulique, et diminuent significativement avec la teneur en argile gonflante (smectites). Il s'avère que les techniques géophysiques traditionnelles pratiquées (PE et SE) peuvent largement tromper les praticiens : ainsi les PE produisent des anomalies importantes sur les zones argileuses et ne caractérisent pas la cible hydrogéologique, tandis que les SE sous-estiment quasiment systématiquement l'épaisseur de la cible (ZA+ZFS). Par contre, la technique la plus élaborée, l'ERT, caractérise bien la cible hydrogéologique en donnant une information fiable sur sa géométrie et permet d'apprécier sa qualité hydrogéologique en identifiant clairement les zones argileuses qu'il faut éviter pour une implantation de forage. Une analyse du modèle économique actuel des prospections géophysiques au Bénin montre que le surcoût de son utilisation en routine devrait être largement compensé par la diminution d'au moins 5 % du taux d'échec, chiffre qui sera très probablement dépassé grâce au gain d'information très significatif que cette technique apporte dans la connaissance des conditions hydrogéologiques locales autour d'un futur forage. En conséquence, nous préconisons l'abandon des techniques de profils et de sondages électriques traditionnellement employées, au profit de la Tomographie de Résistivité Electrique.

Mots clés : *aquifère de socle, implantation géophysique de forage, profil électrique, sondage électrique, tomographie de résistivité électrique, Bénin.*

Abstract

In the basement rocks of West Africa and particularly in Benin, which consists of 80% basement rock, despite prior borehole siting studies, 40% of boreholes are considered "negative" (<700 l / h) thus constituting a significant loss in effort. This study aims to improve the geophysical aspects of borehole siting in order to improve the borehole success rate. An evaluation of the so-called "Direct Current" geophysical method (mainly used to date by practitioners) is carried out, after having determined the hydrogeological target to be favored for the borehole sitting. For this evaluation, at 6 experimental sites we evaluated the sensitivity of the parameters of the electrical method (resistivity and chargeability) to *(1)* the hydrogeological target (by comparing the parameter values measured in boreholes with borehole logs), *(2)* the hydrogeological parameters (specific yield and hydraulic conductivity obtained by pumping tests), and *(3)* the clay content (via X-ray diffractometry and methylene blue test). Subsequently, we assessed the capacity of different geophysical measurement techniques (Electrical Profiles - EP, Electrical Soundings - ES, and Electrical Resistivity Tomography - ERT) to characterize the target from the surface by means of *(1)* numerical modeling and *(2)* field measurements at 7 sites.

The results reveal that the hydrogeological target to be favored in a basement context in tropical environments (where saprolite is generally considerable) is the zone where the thickness of the “saprolite” and the first meters of the “Stratiform Fractured Layer” (SFL) are the most important. Saprolite and SFL must be characterized by resistivities respectively between 150 and 400 ohm.m and between 800 and 2,000 ohm.m. Resistivity is more discriminating than chargeability. These two geophysical parameters increase with specific yield and with hydraulic conductivity, and decrease significantly with swelling clay content (smectites). This work demonstrates that the currently applied traditional geophysical techniques (EP and ES) can largely deceive the practitioners: the EP produces important anomalies in clayey zones and do not characterize the hydrogeological target, while the ES underestimates almost systematically the target thickness (saprolite + SFL). However, the most elaborate technique, the ERT, characterizes well the hydrogeological target by giving reliable information on its geometry. ERT allows the assessment of the hydrogeological quality of the target because it adequately recognizes the clay zones which are to be avoided while drilling. An analysis of the current economic model of geophysical prospecting in Benin shows that the extra cost due to the use of ERT as a matter of routine should be largely compensated by the reduction of the failure rate by at least 5%, a figure which will most probably be exceeded thanks to the gain in very significant information that this technique provides regarding the knowledge of the local hydrogeological conditions around a future borehole. Consequently, we recommend the abandonment of the techniques of electrical profiles and soundings traditionally used for the benefit of the Electricity Resistivity Tomography.

Key words: *basement aquifer, geophysical borehole siting, electrical profiling, electrical sounding, electrical resistivity tomography, Benin.*

Sommaire

Sommaire vii
Liste des figures x
Liste des tableaux xiii
Introduction générale 1
Chapitre 1 : Aquifères de socle et définition de la cible hydrogéologique à privilégier pour un forage productif 10
Introduction 10
1.1. Zone de socle du Bénin 10
1.2. Aquifères de socle du Bénin 15
1.3. Modèle conceptuel hydrogéologique des roches de socle 23
1.4. Cible hydrogéologique pour un forage productif 25
1.5. Quelques questions posées en général au géophysicien par l'hydrogéologue pour l'implantation d'un forage 36
Conclusion partielle 37
Chapitre 2 : Résistivité et chargeabilité électrique : Définitions et mesures par la méthode électrique 38
Introduction 38
2.1. Résistivité électrique 38
2.2. Mesure de la résistivité avec la méthode électrique à courant continu 44
2.3. Chargeabilité électrique 59
2.4. Mesure de la chargeabilité totale et des paramètres Cole-Cole dérivés de la courbe de décharge 63
Conclusion partielle 66
Chapitre 3 : Evaluation de la sensibilité de la résistivité et de la chargeabilité à la cible hydrogéologique 68
Introduction 68
3.1. Méthodologie mise en œuvre 69
3.2. Sites d'étude sélectionnés 69
3.3. Acquisition et traitement des données de diagraphie 72
3.4. Lithologie des forages et les informations du foreur 81
3.5. Evaluation de la sensibilité des paramètres électriques 83
3.6. Relation entre la résistivité et la chargeabilité de la ZA 88
Conclusion partielle 90
Chapitre 4 : Relations entre paramètres géophysiques électriques, paramètres hydrodynamiques et les argiles 91
Introduction 91

4.1. Méthodologie mise en œuvre 92
4.2. Diffractométrie de rayons X 92
4.3. Test de bleu de méthylène 101
4.4. Autres paramètres utilisés : porosité de drainage et conductivité hydraulique 104
4.5. Présentation des relations obtenues 105
Conclusion partielle 113
Chapitre 5 : Comparaison des techniques de prospection électrique par modélisation numérique 114
Introduction 114
5.1. Méthodologie mise en œuvre 115
5.2. Construction des modèles numériques 2D 116
5.3. Génération et traitement des données 119
5.4. Résultats et inter-comparaisons 122
Conclusion partielle 129
Chapitre 6 : Validation in-situ de la technique ERT pour l'implantation géophysique des forages 131
Introduction 131
6.1. Méthodologie mise en œuvre 131
6.2. Mise en œuvre de l'ERT et des autres techniques in situ 132
6.3. Traitement des données 136
6.4. Résultats 138
6.5. Discussions : doit-on faire évoluer nos pratiques de la méthode électrique pour l'implantation ? 146
Conclusion partielle 154
Conclusion générale 156
Références 162
Publications 179
Table des matières 186
Annexes I

Liste des figures

Figure 1.1 – Carte de localisation du Bénin et de sa zone de socle (source : Institut Géographique National). 11
Figure 1.2 – Extension de la zone de cisaillement de Kandi. (Adissin Glodji *et al*., 2014).... 13
Figure 1.3 – a) Roches de socle du Bénin (source : Office Béninois des Mines) ; b) formations géologiques en Afrique - 40% de roches de socle (MacDonald *et al*., 2012)..... 14
Figure 1.4 – Altération des roches de socle en fonction de la latitude (Renard *et al.*, 2018).. 20
Figure 1.5 – a) Cristal de biotite en voie d'altération dans l'horizon fissuré (Granite de Langonnet, Morbihan, France). Noter la déformation des clivages de la biotite et l'apparition de microfissures ; b) Ellipsoïde des contraintes σ1≥ σ2>> σ3 (Wyns *et al.*, 2015)..... 21
Figure 1.6 – Modèle conceptuel hydrodynamique d'une discontinuité verticale dans une roche de socle (Lachassagne *et al.*, 2011)..... 22
Figure 1.7 – Synthèse des terminologies les plus utilisées pour la description du modèle conceptuel hydrogéologique en zone de socle dans le monde (Comte *et al.*, 2012)..... 23
Figure 1.8 – Modèle conceptuel hydrogéologique de la zone de socle en milieu tropical : exemple du Bénin (inspiré de Dewandel *et al.*, 2011 ; Lachassagne *et al.*, 2017, 2014, 2011). 24
Figure 1.9 – Zone d'étude (Vouillamoz *et al.*, 2015a).. 27
Figure 1.10 – Localisation des sites expérimentaux et carte géologique simplifiée de la fenêtre régionale (Vouillamoz *et al.*, 2014). 27
Figure 1.11 – Analyse statistique des forages (Vouillamoz *et al.*, 2015a).. 29
Figure 1.12 – Fenêtre régionale (Vouillamoz *et al.*, 2015a). 29
Figure 1.13 – Analyse longitudinale (Vouillamoz *et al.*, 2015a). 30
Figure 1.14 – Représentation 3D des corrélations entre les variables (propriétés de l'aquifère et du forage) et les composantes (F1, F2 et F3). 31
Figure 1.15 – Corrélations obtenues à l'échelle régionale (Vouillamoz *et al.*, 2015a).. 32
Figure 1.16 – Variogramme de l'épaisseur de la ZA (Vouillamoz *et al.*, 2015a). 32
Figure 1.17 – Sites expérimentaux (Vouillamoz *et al.*, 2015a).. 33
Figure 1.18 – Forage vs distance aux linéaments (Vouillamoz *et al.*, 2015a).. 34
Figure 1.19 – Rabattements relevés lors des essais de pompage.. 34
Figure 2.1 – Schématisation de la conductivité électrolytique (inspiré de Kunetz, 1966)..... 39
Figure 2.2 – Schématisation du principe de la mesure de résistivité par la méthode électrique (inspiré de Chapellier, 2000). 46
Figure 2.3 – Circulation du courant dans le sous-sol (inspiré de Chapellier, 2000).. 48
Figure 2.4 – Principaux dispositifs de mesure de la méthode électrique (inspiré de Chapellier, 2000)..... 48
Figure 2.5 – Circulation du courant dans le sous-sol (inspiré de Chapellier, 2000).. 49
Figure 2.6 – Mise en œuvre d'un profil électrique Schlumberger (inspiré de Chapellier, 2000)..... 50
Figure 2.7 – Exemples de profils électriques réalisés par différents bureaux d'études au Bénin sur différents sites en zone de socle. 50
Figure 2.8 – Mise en œuvre d'un sondage électrique Schlumberger (inspiré de Chapellier, 2000)..... 51
Figure 2.9 – Exemple de résultat de sondage électrique réalisé par un bureau d'études en zone de socle. 54
Figure 2.10 – Acquisition des résistivités apparentes en dispositif Wenner (Marescot, 2000). 56
Figure 2.11 – Schéma de l'inversion par méthode itérative (Marescot, 2000). 56

Figure 2.12 – Dispositif de mesure des normales (pôle pôle) (d'après Chapellier, 1987). 58
Figure 2.13 – Polarisation Provoquée temporelle : séquence d'injection de courant (en haut) et potentiel enregistré (en bas), dans un milieu polarisable (en rouge), et dans un milieu non polarisable (en noir) (Abdul Samad, 2017). 60
Figure 2.14 – a) distribution normale des ions dans un grès poreux ; b) polarisation de membrane due à l'application d'une tension continue (inspiré de Telford *et al.*, 1990). 61
Figure 2.15 – a) distribution normale des ions autour d'un minéral métallique; b) polarisation d'électrode due à l'application d'une tension continue (inspiré de Telford *et al.*, 1990). 62
Figure 2.16 – Mesures de plusieurs chargeabilités partielles pour différents intervalles de temps donnés (d'après le manuel d'utilisation du Syscal Pro)..... 64
Figure 3.1 – Situation de la zone d'étude et carte géologique simplifiée (Vouillamoz et al., 2014)..... 70
Figure 3.2 – Présentation de la disposition des piézomètres et du forage en exploitation sur chaque site : exemple du site FD17..... 71
Figure 3.3 – Mise en œuvre de la diagraphie de résistivité électrique : exemple du Site F68, piézomètre P2. 73
Figure 3.4 – Schéma descriptif du protocole d'acquisition avec le dispositif pôle-pôle pour le piézomètre P1 du site F68. 74
Figure 3.5 – Mesure de chargeabilité avec une électrode impolarisable (Site FD19)..... 75
Figure 3.6 – Courbes de décroissance de la polarisation mesurée. 79
Figure 3.7 – Exemple de courbe de décroissance affectée par une croissance dans les 50 premières ms.. 80
Figure 3.8 – Présentation des cuttings du forage P1 du site FD30. a) planche de cuttings, b) cuttings échantillonnés dans des sacs de congélation (e.g. 10 premiers et 10 derniers mètres). 81
Figure 3.9 – Caractéristiques et lithologie du forage P1du site F68. 82
Figure 3.10 – Logs de diagraphie de résistivité, chargeabilité et paramètres Cole-Cole (m, c et τ) face aux lithologies et aux profondeurs forées du site F68. 84
Figure 3.11 – Gammes de résistivités (avec un « whisker » de 10/90 percentile) par compartiment et par site (SS non atteint à FD17). 86
Figure 3.12 – Gammes de résistivités (avec un « whisker » de 10/90 percentile) par compartiment pour l'ensemble des sites. 87
Figure 3.13 – Gammes de chargeabilité (avec un « whisker » de 10/90 percentile) par compartiment et par site. 88
Figure 3.14 – Relation entre la résistivité médiane de la ZA et la chargeabilité totale médiane de la ZA sur tous les sites. 89
Figure 4.1 – Emission d'un rayon X. 93
Figure 4.2 – Préparation de l'échantillon. a) broyage à la main (mortier et pilon) de l'échantillon (préparation pour broyage à la machine) ; b) broyage à la machine jusqu'à 2 µm. 94
Figure 4.3 – Schéma descriptif du fonctionnement du diffractomètre à rayons X..... 94
Figure 4.4 – Image du diffractomètre à rayons X utilisé pour cette étude (diffractomètre à rayons X D5000 de l'Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) de l'Université de Grenoble Alpes, en 2016). 95
Figure 4.5 – Schéma d'un diagramme résultant d'une diffractométrie de rayons X avec des illustrations de phases de quelques minéraux. 96
Figure 4.6 – Résultats de diffractométrie de rayons X de l'échantillon F68..... 98
Figure 4.7 – Structure des minéraux argileux avec présentation des espaces interfoliaires (Beauchamp, 2005). 100
Figure 4.8 – Procédure du test de bleu de méthylène..... 102

Figure 4.9 – Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et d'une part la porosité de drainage, d'autre part la conductivité hydraulique.. 106
Figure 4.10 – Relations obtenues entre la résistivité médiane de la ZA et la présence d'argile. 109
Figure 4.11 – Relations obtenues entre la chargeabilité totale médiane de la ZA et la présence d'argile. 110
Figure 4.12 – Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et la présence d'argile via le test de bleu de méthylène.. 111
Figure 4.13 – Relations obtenues entre la valeur de bleu sols des échantillons analysés au diffractomètre à rayons X et la présence d'argile..... 112
Figure 5.1 – Schéma descriptif de la démarche méthodologique de la modélisation numérique..... 115
Figure 5.2 – Modèles numériques utilisés pour la modélisation (104 modèles)..... 118
Figure 5.3 – Résistivités minimales et maximales des anomalies de profils électriques. 120
Figure 5.4 – Contrastes de résistivité en fonction de la largeur des anomalies de profils électriques..... 121
Figure 5.5 – Exemples de profils électriques (PE) issus de différentes catégories de structures ; à gauche, les modèles ; au centre, les PE ; à droite, le graphique de contraste des anomalies obtenu à partir de l'analyse des PE basée sur le seuil de sélection des anomalies.. 125
Figure 5.6 – Inversions de sondages électriques (SE) sur les anomalies de profil électrique (PE) des structures B, C et D..... 126
Figure 5.7 – Tomographie de résistivité électrique (ERT) de toutes les structures. 128
Figure 6.1 – Géologie et localisation des 6 sites LETS et du site test..... 132
Figure 6.2 – Présentation du matériel d'acquisition des données d'ERT. 134
Figure 6.3 – Modèle synthétique numérique complexifié de notre zone d'étude. 136
Figure 6.4 – Jeux de données de résistivités apparentes générés numériquement par les dispositifs Wenner alpha (WA) et Wenner beta (WB)..... 137
Figure 6.5 – Résultat d'inversion du modèle numérique évaluant les choix pour l'application de l'ERT sur le terrain (dispositifs WA+WB combinés et paramètres d'inversion par défaut). 138
Figure 6.6 – Profil électrique (PE), sondage électrique (SE) et tomographie de résistivité électrique (ERT) sur le site FD19.. 140
Figure 6.7 – Profil électrique (PE) et tomographie de résistivité électrique (ERT) sur les sites FD30 et F68..... 142
Figure 6.8 – Profil électrique (PE), sondage électrique (SE) et tomographie de résistivité électrique (ERT) sur le site Saré. 144
Figure 6.9 – Photographie du forage F2 du site Saré en exploitation, implanté sur la base d'une section ERT..... 145
Figure 6.10 – Superposition des valeurs de résistivité ERT avec celles de diagraphie au droit de P1, P2 et P3..... 149
Figure 6.11 – Géologie et localisation des 7 nouveaux sites prospectés en ERT et RMP, en plus des sites expérimentaux (LETS)..... 150
Figure 6.12 – Résultats d'inversion ERT avec représentation de la partie recouverte par le sondage RMP, exemple du site FD92. 151
Figure 6.13 – Relation RhoZA/Sy enrichie..... 152

Liste des tableaux

Tableau 2.1 – Paramètres m, a et porosité pour différents types de grains ou de roches, d'après Keller (1988). 42
Tableau 2.2 – Exemple de valeur de résistivité (Kunetz, 1966). 43
Tableau 3.1 – Formation géologiques et roches rencontrées sur chaque site (Vouillamoz *et al.*, 2014). 70
Tableau 3.2 – Données de diagraphie de résistivité mesurées et corrigées de F68-P1. 77
Tableau 4.1 – Résultats de diffractométrie de rayons X de l'échantillon F68 : les phases de minéraux modélisées, leur teneur et les types de minéraux auxquels elles appartiennent.. 99
Tableau 4.2 – Résultats de la diffractométrie de rayons X pour tous les sites (profondeurs des cuttings échantillonnés, teneurs en type d'argile et en quartz, paramètres géophysiques).. 99
Tableau 4.3 – Présentation des résultats issus des tests de bleu de méthylène. 103
Tableau 4.4 – Présentation des valeurs de porosité de drainage, de conductivité hydraulique et rappel des valeurs médianes de résistivité (ZA et FZS) et de chargeabilité totale (ZA).... 105
Tableau 5.1 – Géométries tabulaires de base (source : 2.122 forages de la base de données nationale de la Direction Générale de l'Eau). 116
Tableau 6.1 – Présentation des données utilisés pour le calcul des coûts de l'EP+SE et de l'ERT. 154

Introduction générale

Généralités et Contexte

Au même titre que l'air, l'eau, particulièrement l'eau douce, est un élément primordial à la vie sur Terre. Elle est vitale pour les êtres vivants en général, et représente par exemple pour l'humain 60 % de son poids avec les deux tiers contenus dans les cellules de son corps (König, 2016). L'eau douce constitue également un facteur indispensable de développement et de bien-être (agriculture, industrie, hygiène etc.).

L'eau recouvre 72 % de la surface de la Terre. Mais seulement 2,5 % de la totalité de l'eau sur Terre est douce, les 97,5 % restant sont constitués d'eaux salées (océans et mers). (McCandless, 2014). Les eaux douces sont constituées de 69 % de calottes glaciaires et de neiges, 30 % d'eaux souterraines et 1 % partagé entre les eaux de surface, les organismes, l'atmosphère et les sols (McCandless, 2014). Les calottes glaciaires et les neiges étant difficilement consommables et inégalement accessibles à tous, les eaux de surface étant susceptibles d'être polluées, nécessitant un traitement onéreux et étant très sensibles aux changements climatiques, l'eau souterraine devient la source d'eau douce à privilégier car, elle est en général protégée de la pollution de surface et moins sensible aux changements climatiques. Elle est plus ou moins disponible presque partout dans le sous-sol et constitue, pour une partie considérable, une ressource renouvelable. En Afrique par exemple, la source principale d'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) est l'eau souterraine (Calow *et al*., 2010; Mukherji, 2008).

Mais l'exploitation de l'eau souterraine se heurte à certaines difficultés qui, en général, selon les géologies, sont : *(1)* l'accessibilité difficile ; *(2)* la faiblesse et la précarité des débits souvent insuffisants pour développer un réseau de distribution d'eau ou une agriculture intensive.

Dans les zones dites « de socle » où la géologie est constituée de roches cristallines et cristallophylliennes, la difficulté à capter (accéder à) l'eau souterraine est accentuée à cause du caractère discontinu des aquifères de ce type de géologie. Les roches de socle couvrent 80 % de la superficie du Bénin et 40 % de celle de l'Afrique où plus de 220 millions de personnes vivent en milieu rural (Calow *et al*., 2010).

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

Situation de l'AEP en zone de socle au Bénin : enjeu et problématique

Au Bénin les eaux souterraines représentent 95 % des eaux exploitées pour l'AEP, et l'eau de surface 5 %. En zone de socle, faute de débits suffisants des forages dans certaines régions, 4 communes (villes) sur les 69 communes couvertes par la Société Nationale des Eaux du Bénin (SONEB), sont alimentées par les eaux de surface à savoir : Parakou, Savalou (entièrement alimentées par les eaux de surface), Djougou et Natitingou (partiellement alimentées par les eaux de surface), ce qui augmente considérablement le coût de l'AEP en zone de socle (SONEB, 2014).

En effet, pour l'AEP en zone de socle à partir des eaux souterraines, deux types d'ouvrages sont généralement réalisés : *(1)* le forage équipé de pompe à motricité humaine pour lequel le débit minimum recherché à la « foration[1] » est 0,7 m^3/h (il est réalisé pour les villages ou agglomérations d'un minimum de 250 hab.) ; *(2)* le forage à gros débit équipé de pompe électrique pour lequel le débit minimum recherché est de 3.6 m^3/h à la foration (il est réalisé pour l'alimentation d'un réseau d'Adduction d'Eau Villageoise – AEV pour une population minimum de 2.000 hab.). Tous les forages qui produisent un débit mesuré à la fin de la foration inférieur à 0,7 m^3/h sont considérés comme négatifs et donc abandonnés (Ministère de l'Energie de l'Eau et des Mines - République du Bénin, 2017).

La réalisation d'un forage en zone de socle, exige au préalable une étude d'implantation pour définir le point où le forage sera réalisé à cause du caractère discontinu des aquifères de socle qui ne garantit pas la réussite d'un forage n'importe où. L'implantation d'un forage au Bénin et en général dans le monde, est réalisée en appliquant des méthodes de prospections géophysiques après une étude géomatique, hydrogéologique (analyse photo aérienne) et une reconnaissance de terrain. La principale méthode géophysique utilisée au Bénin, dans la sous-région et dans le monde pour l'implantation des forages est la méthode électrique (Aizebeokhai *and* Oyeyemi, 2017; CIEH, 1984; Lloyd, 1999 ; voir aussi les Termes De Référence des Appels d'Offres au Bénin et en Afrique de l'Ouest pour l'implantation des forages).

A partir de la base de données des forages de la Direction Générale de l'Eau (DG-Eau) du Bénin (près de 8.000 forages renseignés jusqu'en 2015), les analyses statistiques montrent

[1] Terme utilisé dans cette étude pour définir l'action de forer (terme communément employé par les professionnels)

que : *(1)* le taux d'échec des forages (forages négatifs) en zone de socle est de 40 % avec 34 % représentant des forages à débits nuls (forages secs), et *(2)* les forages à gros débits ne représentent que 17 % des forages positifs (Vouillamoz *et al*., 2014). Ces résultats sont semblables à ceux du Burkina Faso qui montrent 35 % de forages négatifs, 32 % de forages à débits nuls, et les forages à gros débit ne représentent que 23 % des forages positifs (Courtois *et al*., 2010). Dans le monde le taux d'échec des forages est compris entre 10 et 50 % en zone de socle (Wright *and* Burgess, 1992).

Considérant :

- le coût unitaire moyen important d'un forage négatif (plus de 2.500.000 F CFA, soit environ 4.000 € - implantation du forage, foration de 60 m de profondeur en moyenne et équipement du forage en PVC sans système de pompage) ;
- les financements importants des gouvernements et des partenaires techniques et financiers (PTF) pour l'AEP des populations et les pertes financières induites par ce taux important d'échec (perte = 40 % des forages de la base de données DGEau en zone de socle [environ 3.200 forages] multipliés par le coût approximatif d'un forage négatif [2.500.000 F CFA], soit 8.000.000.000 F CFA [environ 12.000.000 € au minimum en 2015]) ;
- l'importante population vivant en zone de socle au Bénin (près de 45 % de la population totale, soit plus de cinq millions d'habitants, INSAE, 2015), appelée à augmenter compte tenu de la forte croissance démographique de 2,7 %, identique pour le Bénin et l'Afrique (Banque mondiale, 2018; d'Abbundo, 2017) ;
- la fragilité économique de la majorité des pays d'Afrique, illustrée par la baisse de la croissance économique des pays d'Afrique subsaharienne qui est de 2,3 % en 2018, contre 2,5 % en 2017, restant toujours inférieure au taux de croissance de la population (Banque mondiale, 2019) ;
- l'intensité et la fréquence des catastrophes naturelles liées au climat (inondations et sécheresses), favorisant l'accentuation de la pollution et l'assèchement des eaux de surface mobilisées pour l'AEP (*e.g.* au Bénin : la retenue d'eau de Djougou) (BBC, 2017; IDMC, 2018; RFI, 2019) ;
- l'atteinte de l'ODD 6 : garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau – 844 millions de personnes n'ont pas encore de l'eau potable (ONU, 2015) ;

la réduction du taux d'échec des forages en zone de socle s'avère une urgence pour les Etats, les bailleurs de fonds, la communauté internationale, les bureaux d'études et surtout les populations.

Questions de recherches

L'implantation géophysique pouvant être l'une des principales causes de l'échec d'un forage, du fait que c'est elle qui situe finalement l'endroit où le forage sera réalisé (après les étapes préliminaires du processus d'implantation - photo interprétation et étude géomorphologique in situ), **la question centrale de recherche** suivante est posée : comment améliorer l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical ?

L'implantation géophysique consiste à rechercher une cible[2] hydrogéologique avec une méthode géophysique mesurant des paramètres géophysiques depuis la surface, qui doivent être capables de caractériser la cible. La méthode géophysique électrique à courant continu utilisée pour l'implantation des forages, mesure la résistivité électrique et aussi la chargeabilité électrique (via le phénomène de polarisation provoquée) en appliquant diverses techniques que sont : le profil électrique, le sondage électrique (techniques traditionnelles) et la tomographie de résistivité électrique (technique plus élaborée et très rarement appliquée au Bénin).

Les sous-questions de recherche sont alors les suivantes :

1- quelle est la cible hydrogéologique à privilégier pour obtenir un forage positif en zone de socle en milieu tropical ?
2- comment identifier la cible hydrogéologique avec les paramètres résistivité et chargeabilité électrique ?
3- comment caractériser la cible du point de vue hydrogéologique à partir des paramètres résistivité et chargeabilité électrique ?
4- quelle est la meilleure technique de la méthode électrique pour caractériser la cible hydrogéologique depuis la surface du sol ?

Pour répondre à ces questionnements, les hypothèses suivantes sont émises.

[2] Terme issu de la géophysique, désigne l'objet recherché en appliquant la méthode géophysique, et représente ici l'objet « visé » par la réalisation d'un forage

Hypothèses

Les hypothèses ci-dessous sont construites à partir des connaissances préalables à notre étude, notamment les publications scientifiques des 15 dernières années. **L'hypothèse principale** est : La méthode de tomographie électrique à courant continu permet sûrement d'améliorer l'implantation géophysique des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical.

Les sous-hypothèses sont :

1- la cible hydrogéologique à privilégier pour l'implantation d'un forage en zone de socle en milieu tropical est certainement l'épaisseur et la nature de l'altération ;
2- les paramètres géophysiques, résistivité et chargeabilité électrique, mesurés par la méthode électrique sont certainement efficaces pour différencier les compartiments du sous-sol et donc utiles pour identifier la cible hydrogéologique ;
3- les paramètres géophysiques, résistivité et chargeabilité électriques sont certainement liés à des paramètres hydrodynamiques et à la présence d'argile ;
4- les techniques traditionnelles de la méthode électrique (profils et sondages) ne sont pas suffisamment adaptées pour la zone de socle en milieu tropical et la tomographie de résistivité électrique est probablement plus efficace pour la caractérisation de la cible hydrogéologique.

Afin de vérifier les hypothèses émises, les objectifs suivants sont définis.

Objectifs

L'objectif général de la présente étude est de contribuer, à travers l'évaluation de la méthode géophysique électrique à courant continu, à l'amélioration de l'implantation des forages d'eau en zone de socle en milieu tropical comme au Bénin.

Spécifiquement il s'agit de :

1- définir la cible hydrogéologique pour l'implantation d'un forage ;
2- évaluer la sensibilité de la résistivité et de la chargeabilité électrique par rapport à la cible hydrogéologique pour son identification ;
3- établir des relations entre les paramètres géophysiques (résistivité et chargeabilité électrique), hydrodynamiques et la présence d'argile ;

4- comparer les techniques de la méthode géophysique électrique entre elles afin d'en déduire la meilleure pour la caractérisation de la cible hydrogéologique ;

La démarche scientifique suivante est adoptée pour atteindre les objectifs ci-dessus.

Démarche scientifique

La démarche scientifique générale de la thèse propose une approche méthodologique pour l'atteinte des résultats, approche qui a été construite en quatre étapes qui respectent chacune les quatre objectifs spécifiques.

Étape 1 (OS1) : Synthèse des connaissances et analyse des informations sur les aquifères de socle en milieu tropical pour la définition de la cible hydrogéologique.

Une recherche bibliographique est faite au préalable sur les aquifères de socle, particulièrement ceux situés en milieu tropical, pour aboutir à un modèle conceptuel hydrogéologique. Ensuite, une analyse statistique multi-variables et multi-échelles de la base de données nationale des forages en zone de socle est présentée pour définir les paramètres de contrôle des aquifères en zone de socle au Bénin afin d'en déduire la cible hydrogéologique pour l'implantation d'un forage. L'analyse présentée est faite à l'échelle nationale, régionale et du site.

Étape 2 (OS2) : Evaluation de la sensibilité des paramètres géophysiques (résistivité et chargeabilité électrique) par rapport à la cible hydrogéologique.

On compare, depuis la surface jusqu'au substratum, les variations des valeurs de résistivité et de chargeabilité électrique mesurées en forage (diagraphies) et considérées comme des valeurs « témoins/vraies/bulk », aux informations « de référence » relevées de forages (lithologie, profondeur forée par outil, venue d'eau, fractures sèche). La comparaison est faite sur 6 sites expérimentaux (LETS - *Learning, Experimentation and Testing Site)* représentant les principales formations de socle au Bénin. Des gammes de résistivité par compartiment hydrogéologique (et donc de la cible selon les compartiments qui la constitue) sont ensuite établies pour vérifier/apprécier la sensibilité (le pouvoir discriminant) de la résistivité et de la chargeabilité électrique pour l'identification de la cible.

Étape 3 (OS3) : Etablissement de relations entre les deux paramètres géophysiques (résistivité et chargeabilité électrique) et les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère ainsi que la présence d'argile.

Une mise en relation est faite entre les valeurs médianes (obtenues par *diagraphie*) de chacun des deux paramètres géophysiques pour les compartiments constituant la cible, et, d'une part, les paramètres hydrodynamiques (porosité de drainage et conductivité hydraulique obtenues par *essais de pompage longue durée*) et d'autre part, la présence d'argile dans l'altération non consolidée (type et teneur en argile obtenus par *analyse au diffractomètre de rayons X* et par *test de bleu de méthylène* sur les cuttings issus des forages).

Étape 4 (OS4) : Inter-comparaison des techniques de la méthode géophysique électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique depuis la surface. Cette étape est faite en deux temps, par modélisation numérique (étape 4a) et par mesures in-situ (étape 4b).

Etape 4a - Une analyse des performances des différentes techniques est faite pour identifier celle qui caractérise au mieux la cible hydrogéologique depuis la surface, à partir des résultats de simulation par modélisation numérique sur des modèles du sous-sol représentant les situations souvent rencontrées ; cela permet de ressortir les capacités mais aussi les limites des techniques à caractériser la cible hydrogéologique.

Etape 4b - Une application in situ des différentes techniques est faite sur les LETS et un site test pour comparer les résultats de la technique jugée efficace d'après la modélisation à ceux des autres techniques, afin de confirmer ou infirmer les résultats de la modélisation numérique. Une analyse du coût de la mise en œuvre de la technique jugée efficace in situ est faite en comparaison avec le coût de la mise en œuvre des autres techniques.

Présentation du manuscrit

Le présent document est rédigé en respectant la logique de la démarche scientifique. Outre l'introduction générale qui présente la problématique, les questions de recherche, les hypothèses et les objectifs de la thèse, il est constitué de 6 chapitres et se termine par une conclusion générale. La méthodologie spécifique à chaque étape est décrite et détaillée dans les chapitres correspondants.

Chapitre 1 (étape méthodologique 1) : il décrit les aquifères en zone de socle en général et en milieu tropical, définit le modèle conceptuel et les compartiments hydrogéologiques, présente la cible à privilégier par l'hydrogéologue pour maximiser les chances d'obtenir un forage positif et expose quelques questions posées au géophysicien par l'hydrogéologue pour l'implantation du forage.

Chapitre 2 : c'est un chapitre préalable à la réalisation des étapes 2 à 4. Il présente les généralités sur les paramètres (résistivité et chargeabilité électrique) et la mesure de ces derniers via les techniques traditionnelles et la technique la plus élaborée de la méthode électrique dans le contexte d'implantation de forage d'eau. Il décrit la pratique des techniques traditionnelles au Bénin avec des illustrations de bureaux d'études.

Chapitre 3 (étape méthodologique 2) : il évalue la sensibilité de la résistivité et de la chargeabilité électrique pour l'identification de la cible hydrogéologique. Il présente les LETS, l'acquisition et le traitement des données de diagraphie, et montre la variation des deux paramètres avec les informations du forage. Les gammes obtenues par compartiment hydrogéologique pour chaque paramètre sont présentées.

Chapitre 4 (étape méthodologique 3) : il établit les relations entre les deux paramètres géophysiques et les paramètres hydrodynamiques (porosité de drainage, conductivité hydraulique) ainsi que la présence d'argile (type et teneur). Il présente les méthodes supplémentaires utilisées pour étudier la présence d'argile (la diffraction aux rayons X et le test de bleu de méthylène), les différents résultats et les relations obtenues.

Chapitre 5 (étape méthodologique 4a) : il compare, à travers une modélisation numérique, la capacité des différentes techniques de la méthode électrique à caractériser la cible hydrogéologique en zone de socle en milieu tropical depuis la surface. Ce chapitre présente la construction des modèles géophysiques, le processus de modélisation, une analyse et une discussion des résultats obtenus.

Chapitre 6 (étape méthodologique 4b) : il valide les résultats numériques sur des cas réels de terrain où les techniques de la méthode électrique sont appliquées. Ce chapitre présente l'acquisition des données, les résultats in situ et leur inter-comparaison en les discutant. Aussi, une estimation du coût de la mise en œuvre de la meilleure technique en comparaison avec les autres est faite.

Conclusion générale : elle reprend les principaux résultats et fait des recommandations en vue de faire évoluer l'implantation géophysique des forages pour une plus grande réussite de ceux-ci en zone de socle au Bénin et dans les zones de socle d'Afrique de l'Ouest. Elle fait ensuite une ouverture sur de futures études envisageables.

Chapitre 1

Aquifères de socle et définition de la cible hydrogéologique à privilégier pour un forage productif

Introduction

Après une présentation de la géographie et de la géologie de la zone de socle du Bénin, ce chapitre présente les aquifères poreux et de fissures pour mieux définir i) les aquifères de socle à altération épaisse, ii) les processus d'altération qui ont conduit à leur mise en place et iii) leur modèle conceptuel. Ensuite la cible hydrogéologique recherchée pour un forage productif est présentée à travers une analyse statistique. Enfin, on énumère les questions de l'hydrogéologue qui sont posées au géophysicien pour la caractérisation de la cible hydrogéologique.

1.1. Zone de socle du Bénin

1.1.1. Cadre géographique

Le Bénin est un pays de l'Afrique de l'Ouest. Sa superficie est constituée d'environ 20 % de bassins sédimentaires (le bassin de la volta, le bassin de Kandi et le bassin sédimentaire côtier) et 80 % de socle cristallin qui représente une surface d'environ 87.000 km^2 (Figure 1.1). Cette superficie de socle cristallin est appelée communément « zone de socle ». Cette dernière, objet de notre étude, est située à une latitude comprise entre environ 7 °N et 12,4 °N et à une longitude comprise entre environ 1 °E et 4 °E. Elle a un relief accidenté qui part de la commune de Djidja au sud du pays (dans le département du Zou) dont l'altitude moyenne est de 300 m, pour monter jusqu'au Mont Atacora qui culmine à 658 m au Nord-Ouest du pays dans la commune de Natitingou (département de l'Atacora).

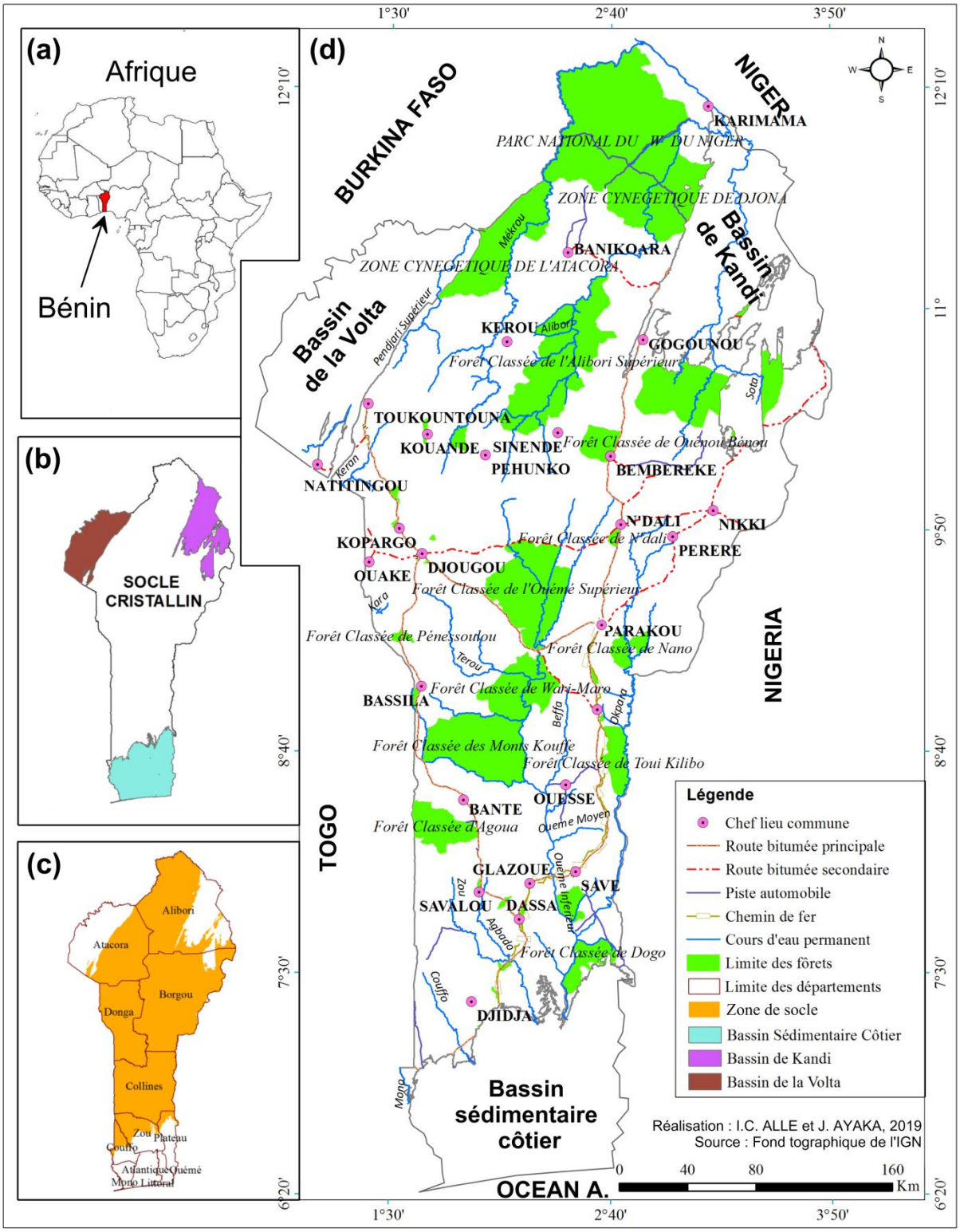


Figure 1.1 – Carte de localisation du Bénin et de sa zone de socle. a) localisation du Bénin en Afrique ; b) le Bénin : socle cristallin (zone de socle) et bassins sédimentaires ; c) le Bénin : situation de la zone de socle par rapport aux départements administratifs ; d) la zone de socle du Bénin : quelques informations géographiques (source : Fond topographique de l'Institut Géographique National).

Le climat dans la zone de socle (septentrionale) est soudanien avec une moyenne de pluie annuelle de 1190 mm (Le Lay *and* Galle, 2005). Le déclenchement des saisons des pluies et les rythmes pluviométriques sont principalement liés à la phase d'installation du système de mousson (Louvet *et al*., 2003) qui résulte d'un différentiel énergétique interhémisphérique entre l'océan et le continent. L'ÉvapoTranspiration Actuelle (ETA) représente environ 68 à 86 % de la pluie annuelle (Séguis *et al*., 2011).

1.1.2. Origine et géologie

Les roches de socle du Bénin sont constituées de roches métamorphiques et magmatiques. Elles font partie de la ceinture des Dahoméyides du Néoprotérozoique pan-Africain qui résulte de la collision entre le craton Ouest-Africain, le craton du Congo et celui du block du Sahara de l'Est il y a environ 600 Ma (610 - 570 Ma) pendant l'assemblage de l'Ouest du Gondwana (Figure 1.2a) (Affaton *et al*., 1991; Ajibade *and* Wright, 1989; Castaing *et al*., 1993; Dada, 2009; Trompette, 1994). La région a été érodée et plus tard altérée pendant le climat chaud et humide qui a prévalu en Afrique de l'Ouest au début du Cénozoïque (65 Ma) (Office Béninois des Mines, 1984a). La ceinture des Dahoméyides appartient à la large ceinture Pan-Africaine/Brésilienne qui s'étend de l'Afrique du Nord au Nord-Est du Brésil (Caby *et al*., 1991). Le long de la ceinture des Dahoméyides, existe la faille de Kandi qui a été successivement active durant le Néoprotérozoïque, le Paléozoïque et le Mésozoique (Guiraud *and* Alidou, 1981; Konate, 1996). La disposition quasi Nord-Sud de la ceinture des Dahoméyides et donc de la faille de Kandi, s'impose aux différentes roches métamorphiques existant autour de la faille de Kandi. Ces roches ont généralement une foliation orientée Nord-Sud et une linéation minérale subhorizontale ainsi que des indicateurs cinématiques en accord avec une zone de cisaillement transversale dextre (Figure 1.2b) (Adissin Glodji *et al*., 2014). Les récentes observations sur le terrain et les études pétrologiques mettent en évidence de nouveaux résultats concernant les roches métamorphiques et les intrusions granitiques dans cette zone de socle : les intrusions granitiques et les roches volcaniques sont associées à la faille de Kandi dans la partie Ouest du bouclier bénino-nigérian de la ceinture des Dahoméyides (Adissin Glodji, 2012). L'altitude moyenne de la zone centrale correspondant à la faille de Kandi (environ 320 m) est plus basse de 100 m par rapport aux parties Est et Ouest (environ 420 m). Cette variation d'altitude se justifie très certainement par l'accentuation du phénomène de l'érosion dans cette zone de faille. La faille est un lieu préférentiel de circulation des fluides et de début des processus d'altération mécanique ou d'érosion.

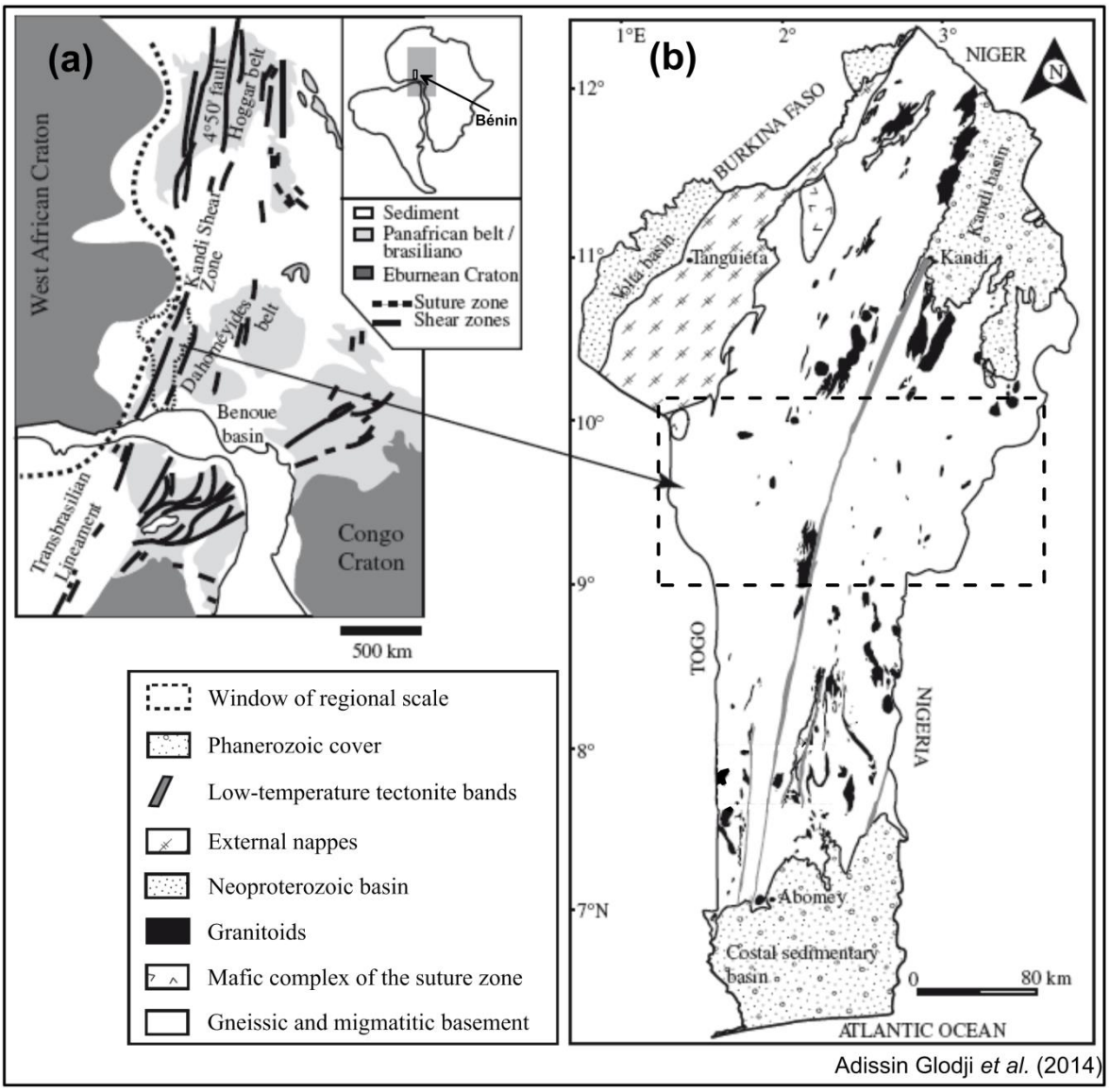


Figure 1.2 – Extension de la zone de cisaillement de Kandi. a) à travers l'Afrique de l'Ouest et le Nord-Est du Brésil avant l'ouverture de l'océan Atlantique sud (d'après Caby *et al*., 1991) ; b) au Bénin soulignant l'association étroite dans l'espace de la zone de cisaillement de Kandi, les roches plutoniques et volcaniques (Adissin Glodji *et al*., 2014).

1.1.3. Formations géologiques

Les unités et formations de la zone de socle du Bénin et celles rencontrées dans la présente étude sont décrites dans la notice générale de la carte géologique du Bénin (Office Béninois des Mines, 1984a). En résumé, de l'Ouest vers l'Est, dans la région septentrionale qui recoupe l'ensemble des formations, on rencontre : la formation de Djougou constituée de gneiss et de micaschistes, les migmatites de Pira-Kandi, le complexe mylonitique de l'Alibori,

le sillon de l'Ouémé suivant la faille de Kandi, constitué de gneiss et d'amphibolites, les migmatites d'Agramarou et le complexe de Nikki-Pèrèrè constitué de granite (Figure 1.3).

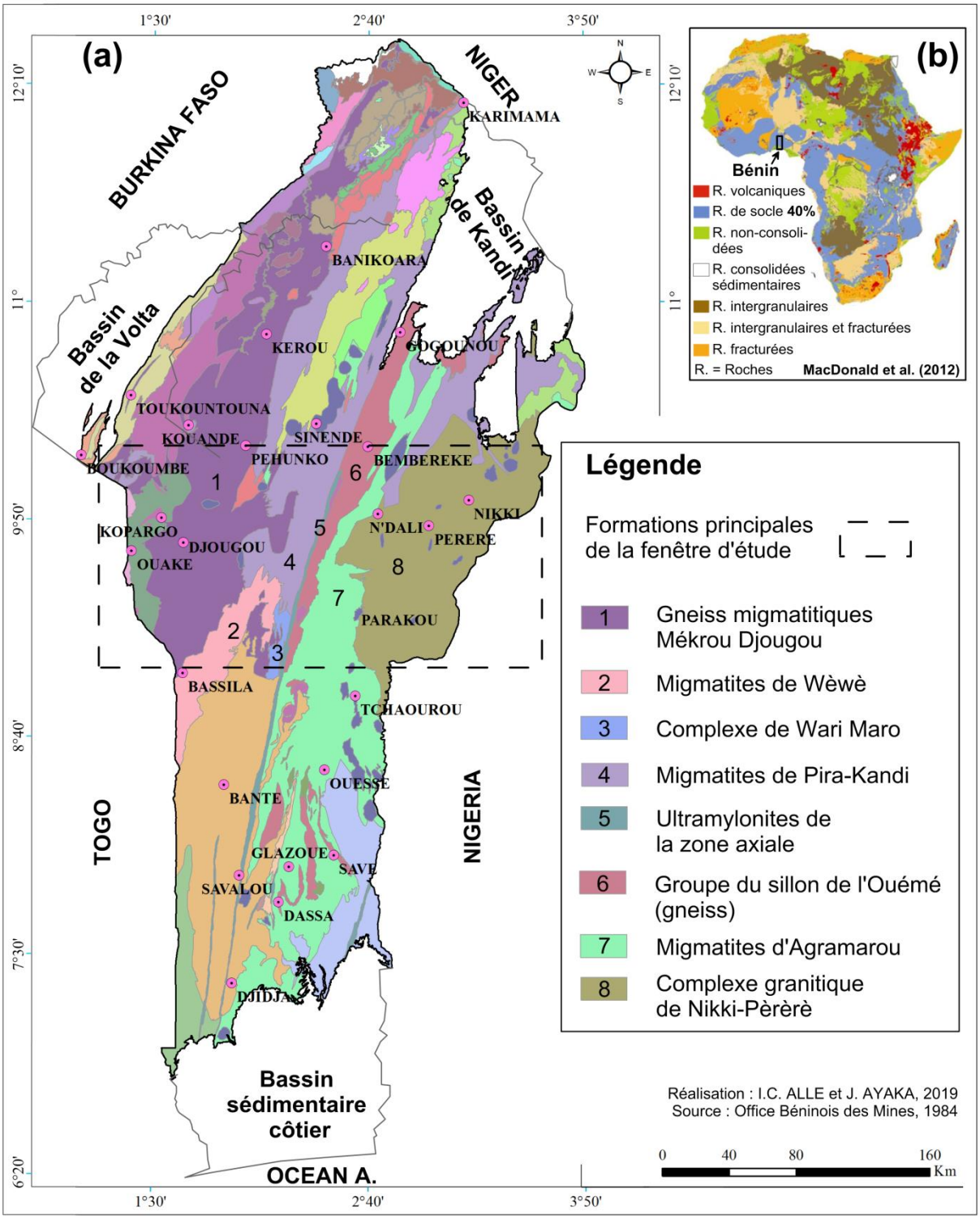


Figure 1.3 – a) Roches de socle du Bénin (source : Office Béninois des Mines, 1984a) ; b) formations géologiques en Afrique - 40% de roches de socle (MacDonald *et al*., 2012).

Il faut noter la présence d'intrusions panafricaines, majoritairement constituées de granites, par endroits et sur l'ensemble de la zone de socle (*e.g.* Dassa et Parakou). Les formations géologiques ne sont pas forcément calquées sur leur intérêt hydrogéologique bien que certaines (*e.g.* quartzites) dont les matériaux altérés sont réputés beaucoup plus poreux et perméables, donc plus productifs, tandis que d'autres (*e.g.* granites) ont des produits d'altération plus argileux, donc a priori moins productifs. Ces observations sont cependant des généralités qu'il convient de considérer avec prudence, tant le processus d'altération peut, dans le détail et localement, conduire à des situations très différenciées.

1.2. Aquifères de socle du Bénin

1.2.1. Définitions

Aquifère

L'aquifère, du latin *aqua fero* qui signifie *porter l'eau*, est la structure (ou matériau) géologique perméable contenant de l'eau souterraine remplissant entièrement les interstices (Foucault *et al*., 2014). Il est caractérisé par sa géométrie, sa superficie, sa profondeur et par les propriétés des couches qui le forment (lithologie, porosité, perméabilité, fracturation, homogénéité) (Renard *et al*., 2018). Lorsqu'un matériau aquifère n'est pas recouvert par un autre matériau moins perméable (absence de matériau recouvrant ou matériau sus-jacent de perméabilité inférieure), ce matériau constitue alors un aquifère libre. Lorsque le matériau aquifère est recouvert d'un matériau imperméable, il constitue un aquifère captif. Si le matériau sus-jacent est moins perméable, mais sans pouvoir être considéré imperméable, alors le matériau aquifère constitue un aquifère semi-captif (Banton *and* Bangoy, 1997). Selon la forme des vides qui contiennent l'eau, on distingue différents types d'aquifères : Les aquifères poreux et les aquifères fissurés/fracturés (Renard *et al*., 2018).

Aquifères poreux

Dans les aquifères poreux, les vides sont des espaces intergranulaires d'origine sédimentaire (pores sensu stricto) ou diagénétique (dissolution de cristaux). Ces aquifères correspondent à des roches « granuleuses » constituées de blocs, graviers, sables, silts, calcaires grainstones, qui peuvent être meubles (alluvions, colluvions, sables détritiques et

oolithiques, arènes granitiques etc.) ou cohérentes (grès, calcaires) si la cimentation n'a pas oblitéré toute la porosité (Renard *et al*., 2018). Nous verrons par la suite que ce type d'aquifère poreux peut-être aussi rencontré en zone de socle.

Aquifères fissurés/fracturés

Dans les aquifères fissurés/fracturés, les vides proviennent de ruptures (diaclases, failles et de fissures) de longueurs inframétriques à plurikilométriques dans la roche consolidée. Il n'y a pas de porosité intergranulaire pour ce type d'aquifère. On les retrouve en zone de socle avec ou sans une altération meuble au-dessus. On trouve aussi ce type d'aquifère dans certaines roches sédimentaires (grès et calcaires – lorsque la cimentation est très avancée). Les aquifères en zone de socle sont communément considérés comme des aquifères fissurés/fracturés, mais cet emploi est restrictif pour les roches de socle en milieu tropical car, nous le verrons au long de notre étude, associer le terme d'aquifère de socle à la seule partie fissurée/fracturée est limitatif puisqu'un aquifère de socle en milieu tropical est en général aussi constitué, dans sa partie supérieure, d'un « important » aquifère poreux (altération meuble). L'aquifère fissuré/fracturé se retrouve ainsi, en milieu tropical, dans la zone de transition entre l'altération meuble et la roche saine.

Aquifères de socle du Bénin

Dans la zone subsaharienne d'Afrique de l'Ouest (dont fait partie le Bénin), du fait des conditions climatiques actuelles et surtout passées (au Cénozoïque), les roches de socle sont recouvertes d'une couche d'altérites qui représente une caractéristique fondamentale des milieux tropicaux. L'épaisseur de ces formations de surface varie avec la latitude, la nature du substratum et les conditions locales d'altération qui se sont mises en place sur des temps géologiques. Braun *et al*. (2009) en Inde, estiment que la vitesse d'altération des roches de socle, de la surface en profondeur, est d'environ 1 mètre / million d'années. Les aquifères de socle à altération épaisse (comme au Bénin) forment un système d'aquifères intégré constitué de deux « couches altérées » (Taylor *and* Howard, 2000). La partie supérieure, de type aquifère poreux constituée par les altérites, lorsqu'elle est saturée, joue un rôle essentiellement capacitif (porosité plus importante). La partie inférieure de type fissurée/fracturée assure surtout une fonction conductrice (conductivité hydraulique plus importante).

La *porosité* et la *conductivité hydraulique*, deux propriétés fréquemment utilisées pour caractériser les aquifères.

Porosité

Du latin *porus* qui signifie *passage*, *conduit* (Foucault *et al*., 2014), la porosité est le rapport du volume des vides par le volume total de la couche considérée (elle n'a pas d'unité et s'exprime en pourcentage - %) (Renard *et al*., 2018). Elle représente l'ensemble des volumes pouvant être occupés par des fluides (gaz, eau, pétrole) à l'intérieur d'une roche. La porosité peut être primaire (*e.g.* espace intergranulaire dans une région sédimentaire détritique, incomplètement cimentée et aussi la partie supérieure des aquifères de socle) ou secondaire (*e.g.* dissolution succédant à une fracturation) (Foucault *et al*., 2014). Le volume d'eau qui peut s'écouler d'un matériau sous le seul effet de la gravité caractérise la ***porosité de drainage*** ou ***porosité efficace*** de ce matériau (*specific yield* en anglais). Une fois le matériau désaturé par gravité, le contenu en eau demeurant encore dans ce matériau en détermine la ***capacité de rétention*** ou ***capacité au champ***, qui représente la capacité du matériau à retenir l'eau. Une partie de l'eau de la capacité de rétention est cependant encore déplaçable par centrifugation ou par application d'une succion et une extraction par les racines des plantes. Cette eau correspond aux eaux capillaires (restant dans les pores) et pelliculaires (à la surface des solides ou grains). Le volume d'eau déplacé est d'autant plus important que la centrifugation est rapide ou que la succion appliquée est négativement grande. Une partie du contenu en eau n'est cependant toujours pas déplaçable par ces moyens. Ce contenu résiduel en eau correspond à l'eau adsorbée aux grains et fortement liée à ceux-ci. La ***porosité totale*** d'un matériau est donc la somme de la porosité de drainage et de la capacité de rétention (eau capillaire, pelliculaire et adsorbée) (Banton *and* Bangoy, 1997).

Pour l'hydrogéologue, c'est en premier lieu la porosité de drainage qu'il lui faut connaître car c'est seulement l'eau contenue dans cette porosité qui est sollicitée par le forage lors du pompage. D'où l'intérêt de l'hydrogéologue à rechercher les matériaux sableux car ces derniers ont une porosité de drainage élevée à l'opposé des matériaux argileux qui ont plutôt une capacité de rétention élevée. La porosité de drainage des aquifères de socle est surtout contrôlée par la porosité de la partie supérieure, les altérites poreuses, qui peut varier entre 2 et 8 % au Bénin (Vouillamoz *et al*., 2014). Ces valeurs concordent avec celles obtenues en général dans ce type d'aquifère (3 à 10 %, Wyns *et al*., 1999).

Conductivité hydraulique

La connaissance de la *perméabilité* permet de définir convenablement la *conductivité hydraulique.* Du latin *per* et *meare* qui signifient respectivement *à travers* et *passer*, la ***perméabilité*** est la prédisposition d'une roche ou d'une couche à se laisser traverser par un fluide (Foucault *et al*., 2014). C'est la proportion de la surface de la section de roche qui est traversée par un fluide. Elle représente une caractéristique intrinsèque du matériau. Son unité est celle d'une surface (m^2). Il faut dissocier les notions de porosité et de perméabilité : une roche poreuse peut être imperméable si les pores ne sont pas interconnectés (*e.g.* argile pure) (Renard *et al*., 2018).

La ***conductivité hydraulique*** d'un matériau, représente son aptitude à laisser circuler l'eau à travers lui. Elle caractérise donc la façon dont l'eau circule à travers la perméabilité unitaire du matériau. Son unité est celle d'une vitesse ($m.s^{-1}$) (Banton *and* Bangoy, 1997). Elle est définie par l'équation suivante :

$$K = \frac{k\rho g}{u} \tag{1.1}$$

avec k = perméabilité intrinsèque du matériau en m^2 ; ρ = masse volumique du fluide (kg/m^3) ; g = gravité ou accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$) ; μ = viscosité ($kg.m^{-1}.s^{-1}$).

La *conductivité hydraulique* est à l'origine de la transmissivité qui contribue au débit d'un forage : la ***transmissivité*** d'un aquifère est le produit de la *conductivité hydraulique* du matériau aquifère par son *épaisseur*. Elle s'exprime en unité de surface par rapport au temps ($m^2.s^{-1}$) (Banton *and* Bangoy, 1997). Au Bénin, les valeurs de transmissivité des aquifères de socle varient entre 10^{-5} et 10^{-3} $m^2.s^{-1}$ (Vouillamoz *et al*., 2014). Ces valeurs concordent avec celles obtenues en Côte d'Ivoire dans ce même type d'aquifère (2.10^{-4} à 8.10^{-7} $m^2.s^{-1}$, Razack *and* Lasm, 2006). C'est la transmissivité de la partie inférieure (les fissures/fractures) qui contrôle le plus la transmissivité du système aquifère (Lachassagne *et al*., 2011). Cela est dû à la circulation préférentielle de l'eau dans les fissures/fractures.

1.2.2. Mise en place des aquifères de socle : le processus d'altération

Un concept largement partagé depuis des décennies en hydrogéologie est que les fissures/fractures secondaires, qui confèrent à la partie inférieure des aquifères de socle leur conductivité (Boutt *et al*., 2010), sont d'origine tectonique et/ou dues à un processus de décompression. Mais récemment il a été démontré par Lachassagne *et al*. (2011) que ces deux concepts (fracturation tectonique et processus de décompression) sont erronés, ou du moins très largement minoritaires dans l'existence de fissures et de fractures au sein de la roche.

Avant Lachassagne *et al*. (2011), Jahns (1943) a présenté une description complète de fissures/fractures à partir d'observations dans plusieurs pays. Il a clairement démontré que la genèse de ces structures n'est pas liée à la mise en place et au refroidissement des roches plutoniques. Il a invoqué plusieurs hypothèses à l'origine de la genèse : la décompression, l'insolation, l'hydratation et l'altération, l'action de la chaleur, du froid et de la végétation, mais il n'a proposé aucune démonstration. Des observations similaires ont été faites pour les granites aux États-Unis (Mabee *et al*., 2002; Mandl, 2005), en Suède (Carlsson *and* Olsson, 1980), en Australie (Hill *et al*., 1995; Ollier, 1988; Taylor *and* Eggleton, 2001; Twidale, 1982), en Afrique (Chilton *and* Foster, 1995; Wright *and* Burgess, 1992), à Hong-Kong (Shaw, 1997) mais également sans aucune démonstration de leur genèse (Lachassagne *et al*. (2011).

Cependant, après 10 années d'observations effectuées partout dans le monde : France (Lachassagne *et al*., 2001; Wyns *et al*., 2004), Corée du Sud (Cho *et al*., 2003), Burkina Faso (Courtois *et al*., 2010), Inde (Dewandel *et al*., 2006) et aussi de plusieurs autres observations effectuées par les auteurs dans diverses régions de la France (Bretagne, Massif Central, Vosges, Corse), d'autres pays d'Afrique, Guyane française, etc. (principalement des rapports BRGM, voir : http://www.brgm.fr), Lachassagne *et al*. (2011) proposent une nouvelle explication de la mise en place ou de la genèse des fissures/fractures. Ils concluent que ces dernières résultent d'un processus d'altération qui engendre principalement une couche fracturée *stratiforme* située en dessous de la partie supérieure (altérites) des aquifères de socle et qui présente des fissures/fractures souvent horizontales. Dans une moindre mesure, et de façon irrégulière, il peut aussi exister une zone fracturée verticalement à la périphérie (ou à l'intérieur) de discontinuités préexistantes (veines, articulations, failles anciennes, contacts lithologiques, etc.). Le concept fondamental de ce modèle issu d'observations flagrantes est de considérer que la partie fracturée horizontalement *appartient au profil d'altération*

(puisqu'elle est issue de ce processus d'altération) au même titre que la partie supérieure poreuse.

Les facteurs principaux agissant dans ce processus d'altération sont en premier l'***eau*** qui va lessiver et extraire les éléments chimiques dissouts de la roche - les déserts chauds ou froids ne sont donc pas favorables aux altérations (Acworth, 1987; Wyns *et al*., 2003). En second, la ***température*** agissant uniquement sur la cinétique du processus d'altération, avec un facteur d'environ 1,7 entre un climat tropical (28 °C) et un climat tempéré (15 °C) (Oliva *et al*., 2003). La mise en place d'un profil d'altération suffisamment épais pour être efficace d'un point de vue hydrogéologique est d'abord une question de ***temps*** : des millions à des dizaines de millions d'années (Wyns *et al*., 2003, 2002).

La zone de socle d'Afrique de l'Ouest n'ayant pas subi d'effets majeurs de la tectonique depuis 600 Ma environ (facteur temps), et le climat tropical ayant été chaud (facteur température) et humide (facteur eau) il y a 65 Ma et encore aujourd'hui, cela expliquerait l'épaisseur assez importante des altérites - jusqu'à 40 m et plus par endroits (Alle *et al.*, 2018). Dans d'autres régions (*e.g.* Europe) qui ont subi des évènements géologiques récents (climat tempéré et moins humide), il n'existe pas d'altérites aussi épaisses, elles sont presque inexistantes, ce qui conduit à considérer ces aquifères de socle des hautes latitudes comme étant essentiellement des aquifères fracturés (voir Figure 1.4).

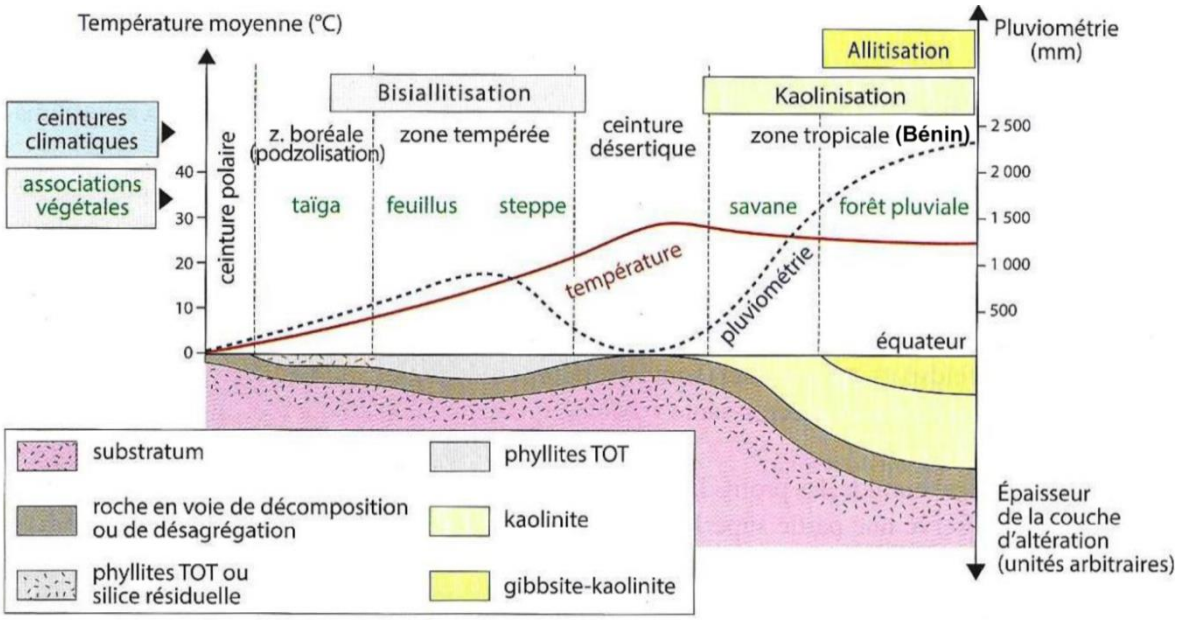


Figure 1.4 – Altération des roches de socle en fonction de la latitude (Renard *et al.*, 2018).

En plus de l'action de ces facteurs - eau, température et temps - un contexte géodynamique favorable est nécessaire pour la mise en place d'un aquifère de socle à altération épaisse car l'érosion (liée à la géodynamique) compense en partie l'épaississement de la couverture d'altération. Le taux d'érosion ne doit pas dépasser la vitesse d'altération (Wyns *et al.*, 2003) pour permettre l'accumulation de l'altération sur place.

Les fissures/fractures sont causées par la contrainte induite par le gonflement de certains minéraux en particulier la biotite (Figure 1.5a) : elle est progressivement hydratée et se transforme en hydro-biotite, puis en vermiculite, puis en couches d'argiles mélangées (Hill, 1996; McFarlane, 1992; Wyns *et al.*, 2003) provoquant ainsi une augmentation potentielle du volume du cristal d'environ 40 %. Par exemple, dans les roches granulaires comme les granites avec une orientation aléatoire des minéraux gonflants, le potentiel de dilatation de l'expansion est isotrope, mais la dilatation est impossible dans le plan horizontal, car le milieu est infini dans cette direction. Ainsi, les composantes de la contrainte horizontale augmentent pendant l'altération. Dans l'axe vertical, la contrainte augmente jusqu'à ce que la composante lithostatique soit compensée, offrant alors une expansion verticale. Dans le tenseur de contrainte résultant, la composante mineure (sigma3) est verticale et les principaux (sigma1 et sigma2) sont horizontaux (Figure 1.5b). Lorsque le déviateur de contraintes atteint la limite élastique de la roche, des fissures de tension apparaissent (Wyns *et al.*, 2015).

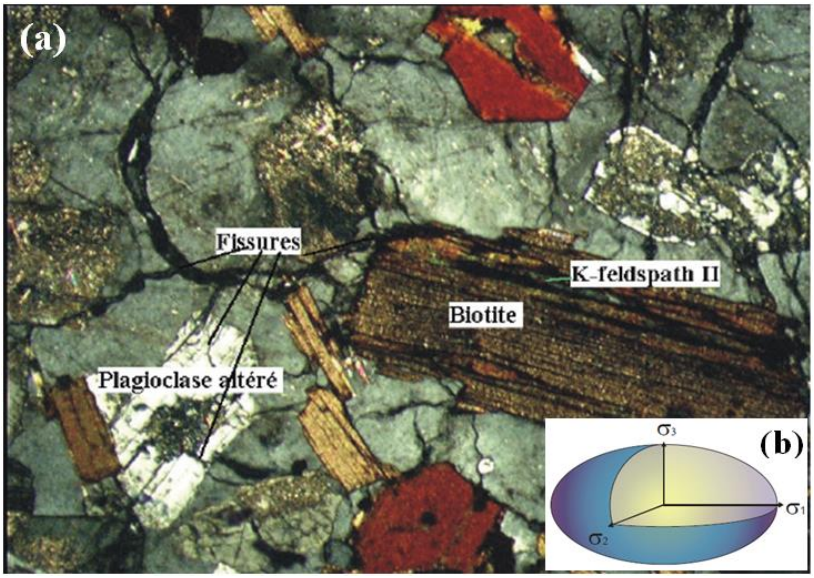
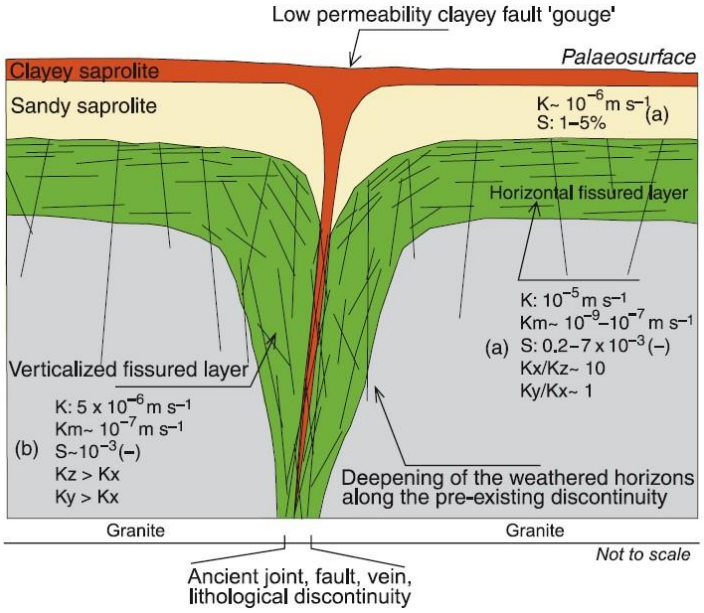


Figure 1.5 – a) Cristal de biotite en voie d'altération dans l'horizon fissuré (Granite de Langonnet, Morbihan, France). Noter la déformation des clivages de la biotite et l'apparition de microfissures ; b) Ellipsoïde des contraintes σ1≥ σ2>> σ3 (Wyns *et al.*, 2015).

Ces descriptions démontrent clairement que c'est le stade précoce de l'altération de la biotite et son gonflement qui conduit à une fracturation horizontale la plupart du temps, avec apparition de fentes, ou de vides horizontaux, dans laquelle l'eau peut circuler. Les étapes ultérieures produisent de l'argile qui présente une tendance à combler les pores nouvellement formés autour des minéraux fracturés et résistant à l'altération (Bisdom *et al.*, 1982). Mais la densité des biotites dans les roches mères n'est pas suffisamment élevée pour obstruer la perméabilité de toutes les fractures de tension créées, donnant lieu à une couche fissurée/fracturée à une échelle du mètre au décamètre. La densité des fissures/fractures diminue avec la profondeur vers la base du profil d'altération (Lachassagne *et al.*, 2011).

En plus de la fracturation horizontale maintenant admise, comme l'ont décrit plusieurs auteurs (*e.g.* Acworth, 1987; Biscaldi, 1968; Chilton *and* Smith-Carington, 1984; Owen *et al.*, 2007; Sander, 1997), des hétérogénéités préexistantes dans les roches de socle, comme des veines (de quartz, pegmatite, aplite, etc.), des dykes, des fractures tectoniques anciennes, des articulations, ou des contacts entre unités géologiques peuvent favoriser localement le processus d'altération. Près de ces discontinuités, le profil d'altération se caractérise par un approfondissement des couches d'altérites, la couche fracturée étant verticale parallèlement à la veine (Figure 1.6). En conséquence, la couche fracturée verticale peut concerner des profondeurs importantes (jusqu'à plusieurs centaines de mètres) (*e.g.* Rhén *et al.*, 2007).



low permeability clayey fault = faible perméabilité faille argileuse ; clayey saprolite = altération argileuse ; sandy saprolite = altéraion sableuse ; horizontal fissured layer = couche fissurée/fracturée stratiforme ; vertical fissured layer = couche fissurée/fracturée verticale ; deepening of the weathered horizons along the pre-existing discontinuity = approfondissement des horizons altérés le long de la discontinuité préexistante.

Figure 1.6 – Modèle conceptuel hydrodynamique d'une discontinuité verticale dans une roche de socle (Lachassagne *et al.*, 2011).

1.3. Modèle conceptuel hydrogéologique des roches de socle

1.3.1. Profil d'altération des roches de socle dans le monde

La figure 1.7 de Comte *et al.* (2012) présente le profil d'altération d'une roche de socle dans le monde en général d'une région à une autre. Comme décrit précédemment, cette figure (première colonne à droite du profil d'altération) montre que le processus d'altération des roches de socle en milieu tropical, est plus avancé et produit une épaisseur d'altération bien plus importante, comparativement aux zones tempérées où une bonne partie supérieure de l'altération (latérite et altération plus ou moins argileuse) est généralement absente. La figure révèle également que plusieurs terminologies sont utilisées pour décrire un même profil ou modèle conceptuel hydrogéologique dans le monde (*e.g.* Acworth, 1987; Koita *et al.*, 2013).

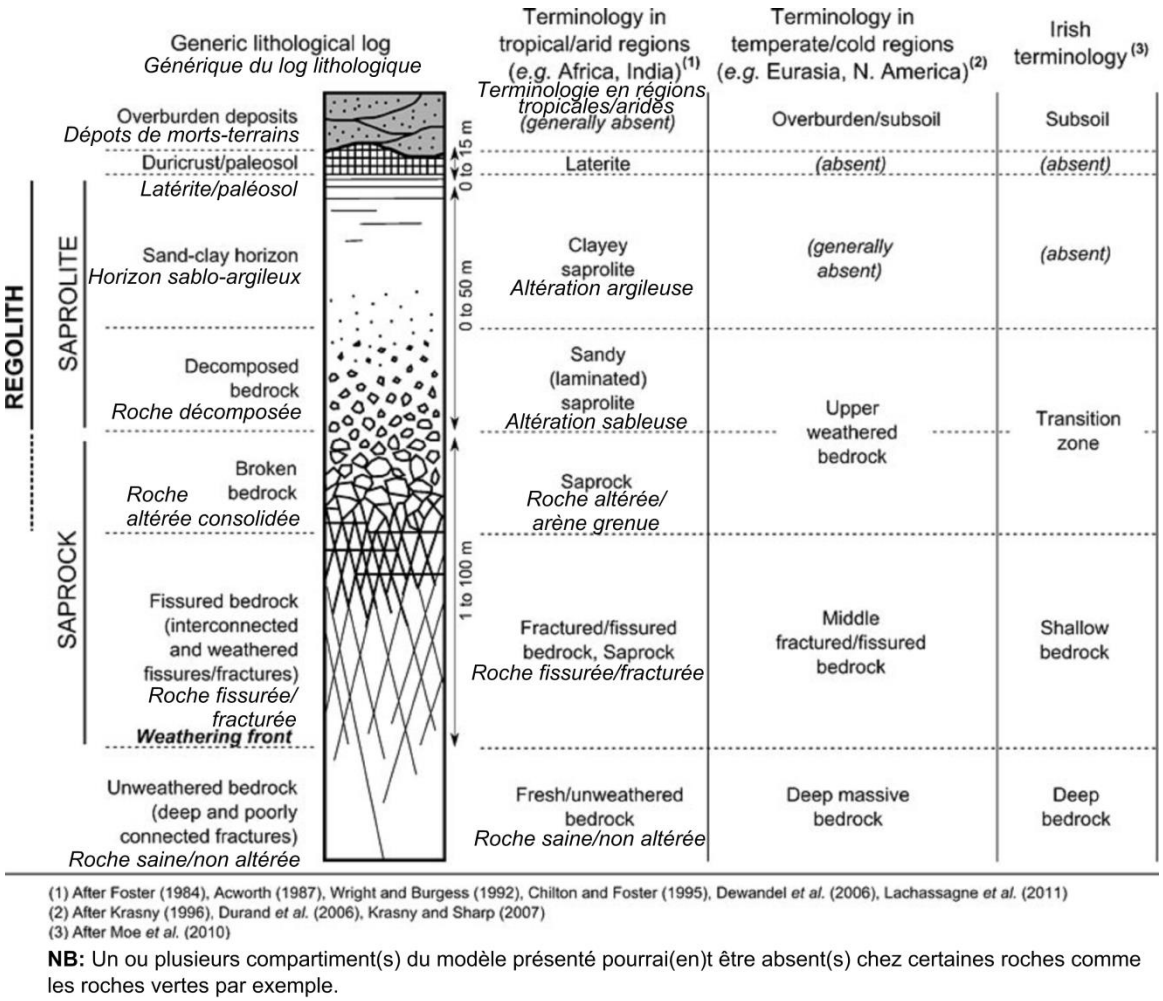


Figure 1.7 – Synthèse des terminologies les plus utilisées pour la description du modèle conceptuel hydrogéologique de zones de socle dans le monde (Comte *et al.*, 2012).

1.3.2. Modèle conceptuel hydrogéologique des roches de socle en milieu tropical : exemple du Bénin

Dans cette étude, la terminologie et le modèle conceptuel développé ont été inspirés de (Dewandel *et al.*, 2011; Lachassagne *et al.*, 2017, 2014, 2011). La figure ci-dessous (Figure 1.8) présente schématiquement le modèle conceptuel hydrogéologique des roches de socle en milieu tropical avec globalement quatre compartiments.

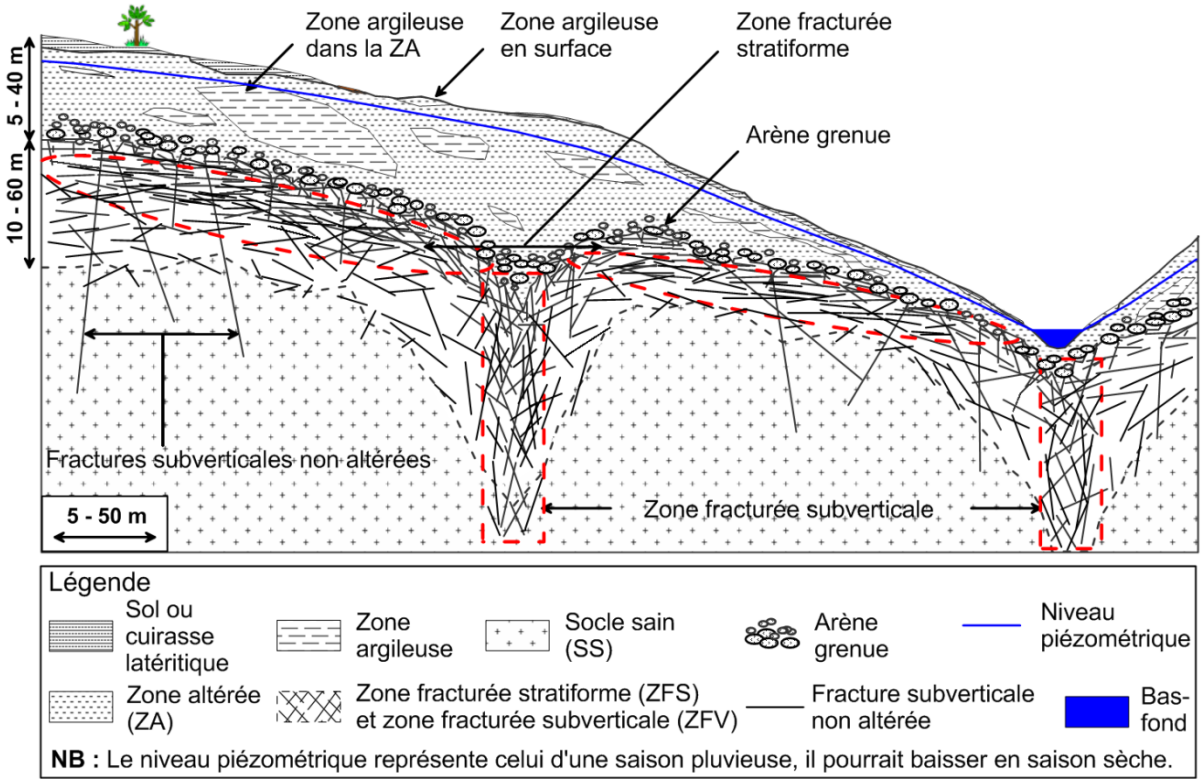


Figure 1.8 – Modèle conceptuel hydrogéologique de la zone de socle en milieu tropical : exemple du Bénin (inspiré de Dewandel *et al.*, 2011 ; Lachassagne *et al.*, 2017, 2014, 2011).

De la surface en profondeur, le premier compartiment nommé Zone Altérée (ZA) représente la couche d'altérites constituée de roches altérées non consolidées et meubles avec une épaisseur moyenne de 5 à 40 m, voire plus (argile et sable avec de la cuirasse latéritique par endroits en surface). En dessous de la ZA se trouve la couche fissurée/fracturée constituée de roches altérées consolidées. Elle représente le deuxième compartiment et est nommée Zone Fracturée Stratiforme (ZFS) avec une épaisseur moyenne de 10 à 60 m. Au droit des discontinuités géologiques subverticales présentes dans la roche saine comme l'a montré la figure 1.6, la ZA et la ZFS peuvent s'approfondir. Cette zone de discontinuité verticale

favorisant une altération préférentielle est nommée Zone Fracturée subVerticale (ZFV) et constitue un troisième compartiment possible. Enfin en dessous des trois compartiments se trouve le quatrième qui est la roche saine et qui est nommé Socle Sain (SS). Ce dernier peut être parcouru par quelques fractures profondes dont la densité diminue avec la profondeur. Le SS est « hydrogéologiquement » stérile et inintéressant (sauf rarement lorsque des discontinuités profondes traversées par certains forages peuvent s'avérer productrices).

Cette présentation des compartiments a été validée par plusieurs études (Dewandel *et al.*, 2010, 2006; Taylor *and* Howard, 2000). Nous insistons sur le fait que tout le profil d'altération se présente en général comme *un continuum avec des zones d'interface où le passage d'un compartiment à l'autre se fait plus ou moins progressivement selon les conditions locales*. Lorsque les quatre compartiments définis ci-dessus sont comparés à ceux définis par Comte *et al.* (2012), en utilisant les mêmes terminologies qu'en milieu tropical, on retient que : la ZA regroupe la *latérite*, la *saprolite argileuse* et la *saprolite sableuse* ; la ZFS regroupe la *saprock* et la *saprock fracturée/fissurée* ; Si la figure 1.7 représentait une section au lieu d'un profil, on verrait la ZFV comme un approfondissement de la *saprolite* et de la *saprock*. Enfin le SS est l'équivalent du *socle non altéré*.

1.4. Cible hydrogéologique pour un forage productif

La réalisation des forages pour l'approvisionnement en eau des populations en zone de socle est conduite souvent par les bureaux d'études privés ou des structures étatiques spécialisées. Depuis plusieurs décennies maintenant, en Afrique de l'Ouest (mais aussi sur le continent africain d'une manière générale et même en Inde), l'implantation des forages a toujours été guidée par l'idée que le forage devrait capter les discontinuités géologiques subverticales, principalement les fractures tectoniques, pour être productif en sachant que ces dernières peuvent être associées ou non à une altération préférentielle autour (*e.g.* CIEH, 1984 en Afrique et Dutta *et al.*, 2006 en Inde). La localisation de ces fractures tectoniques est faite souvent à l'aide de la télédétection (traitement de photo aérienne) qui permet d'identifier des linéaments considérés comme étant la « signature » en surface de ces fractures tectoniques profondes. Ensuite les méthodes géophysiques sont appliquées pour localiser plus précisément au sol la fracture et tenter de la caractériser (Dutta *et al.*, 2006; Keller *and* Frischknecht, 1966).

Malgré cette procédure, le taux d'échec des forages reste élevé. Et lorsqu'un forage est positif, on ne sait généralement pas si ce succès est dû à la rencontre de fractures profondes. Les foreurs notent les venues d'eau, mais ces venues d'eau *peuvent tout aussi bien s'expliquer par la rencontre avec les fractures horizontales de la ZFS (fractures issues de l'altération et non de la tectonique)*. On se pose dès lors la question de savoir si cette procédure basée sur le repérage de fractures tectoniques est réellement adaptée et s'il ne faudrait pas plutôt tenter de mettre en évidence les zones de fissures/fractures horizontales que constitue la ZFS.

Afin de vérifier si la cible de la fracture tectonique subverticale est pertinente et si d'autres cibles pourraient être intéressantes, une analyse multi-variable et multi-échelle des paramètres de contrôle des propriétés des aquifères a été conduite dans le cadre du projet GRIBA par Vouillamoz *et al.* (2015a), en utilisant la base de données des forages réalisés en zone de socle au Bénin. Les résultats de cette analyse ont été présentés aux « vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie » de l'Association Internationale des Hydrogéologues. Une présentation de cette analyse est faite ici pour montrer comment la cible hydrogéologique est définie.

1.4.1. Méthodologie mise en œuvre pour la définition de la cible

La méthodologie adoptée considère plusieurs paramètres à différentes échelles.

A l'échelle nationale, l'analyse est faite sur la base de données des forages de toute la zone de socle du Bénin (87.000 km^2, Figure 1.9a). Les propriétés des forages et des aquifères (venues d'eau, taux d'échec des forages, profondeur et épaisseur de la ZA et de la ZFS, débit instantané, etc.) sont respectivement calculées, estimées et analysées à l'échelle nationale.

A l'échelle régionale, l'analyse est faite sur les propriétés des forages suivant leurs coordonnées géographiques et leur formation géologique. Une fenêtre régionale de 27.000 km^2 (Figure 1.9b) a été définie en interceptant les directions des formations majeures de socle du Bénin afin de considérer la plupart des formations géologiques. A cette échelle, des relations ont été recherchées entre les propriétés des aquifères et celles des forages (épaisseur de la ZA, débit spécifique, densité des linéaments et taux de succès des forages).

A l'échelle du site (1 à 10 km^2), les relations entre le taux de succès des forages, le débit spécifique et la distance aux linéaments sont analysées (Figure 1.9c). Six sites

expérimentaux du projet GRIBA où des essais de pompage ont été réalisés sont sélectionnés dans la fenêtre régionale dans différentes formations géologiques majeures (Figure 1.10).

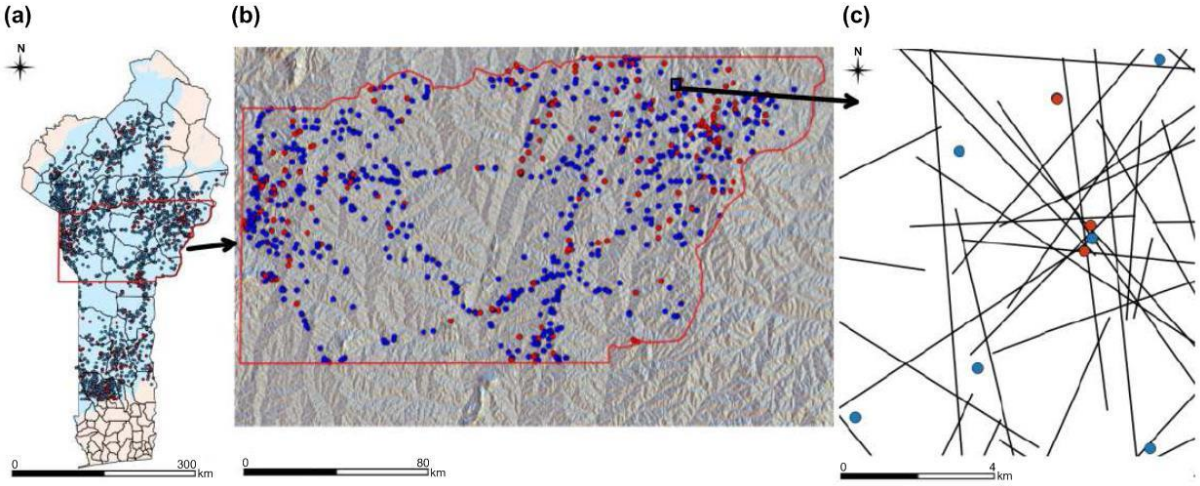


Figure 1.9 – Zone d'étude. a) zone de socle du Bénin (bleu) et forages utilisés (positifs en bleu et négatifs en rouge) ; b) fenêtre régionale, forages et relief nuancé ; c) exemple d'un site expérimental, forages et linéaments (Vouillamoz *et al.*, 2015a).

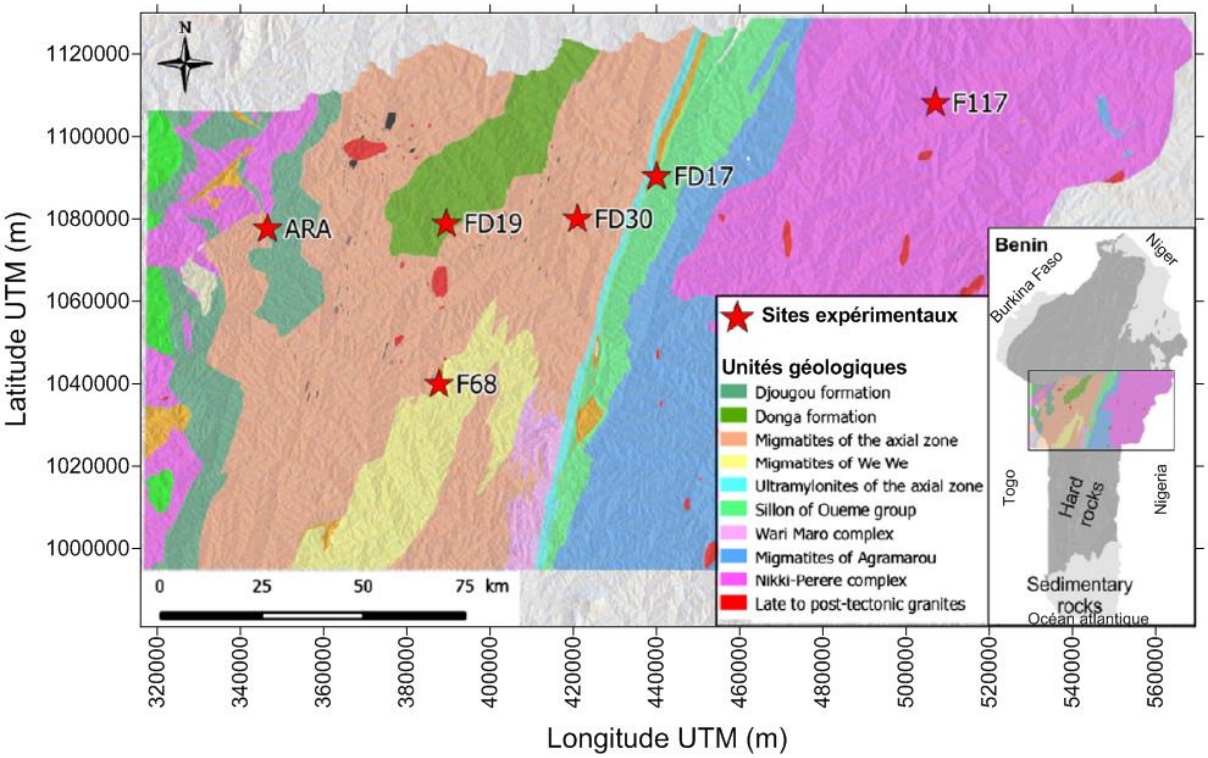


Figure 1.10 – Localisation des sites expérimentaux et carte géologique simplifiée de la fenêtre régionale (Vouillamoz *et al.*, 2014).

Après un contrôle-qualité (élimination des forages dont les données sont incomplètes ou absurdes), 3.415 forages ont été retenus dans la base de données nationale de la Direction Générale de l'Eau (http://eaubenin.bj/site/index.php/bdi/) pour l'analyse à l'échelle nationale tandis qu'à l'échelle régionale 1.203 forages sont retenus. Les épaisseurs de la ZA et de la ZFS ont été considérées comme étant respectivement celles des roches altérées non consolidées forées au Rotary et celles des roches altérées consolidées forées au marteau fond-de-trou. Les débits spécifiques ont été obtenus en faisant le rapport entre le débit instantané mesuré après le développement du forage et le rabattement induit. Les profondeurs des venues d'eau sont notées par le foreur pendant la foration, et ces informations sont enregistrées dans la base de données. Les linéaments et les altitudes ont été obtenus en utilisant les images SRTM avec une résolution de 90 m en longitude et latitude (http ://www2.jpl.nasa.gov/srtm/). L'image satellitaire utilisée est celle de Landsat 8 (2013) et la carte géologique à 1/200.000 de la fenêtre régionale a été digitalisée (Office Béninois des Mines, 1984b). L'ensemble de l'analyse spatiale a été réalisée avec le logiciel libre QGIS (http ://www.qgis.org/fr/site/).

1.4.2. Résultats conduisant à la définition de la cible

A l'échelle nationale

Sur les 3.415 forages, aucune venue d'eau n'est détectée pour 34 % des forages, 40 % sont déclarés négatifs car ayant un débit instantané inférieur à 700 l/h (Figure 1.11a). 17 % des débits instantanés sont supérieurs à 3,6 m^3/h représentant le débit minimal pour une adduction d'eau villageoise (AEV). 50 % des forages positifs ont une profondeur située entre 43 et 60 m (Figure 1.11b).

En considérant les 1er et 3e quartiles, les épaisseurs de la ZA et de la ZFS sont respectivement comprises entre 11 et 25 m (Figure 1.11c) et entre 21 et 41 m. 80 % des 4.600 venues d'eau ont été enregistrées à moins de 48 m de profondeur (et 90 % à moins de 56 m) aussi bien à la base de la ZA que dans les premiers mètres de la ZFS (Figure 1.11c). A l'échelle nationale on retient *que c'est la partie saturée de l'aquifère qui doit être considérée comme productive grâce aux venues d'eau situées dans la ZA et dans les premiers mètres de la ZFS*. Une étude réalisée en Côte d'ivoire a obtenue des résultats semblables en identifiant la tranche de profondeur des meilleurs débits entre 20 et 50 m (Gnamba *et al.*, 2014, voir aussi Dibi *et al.*, 2004).

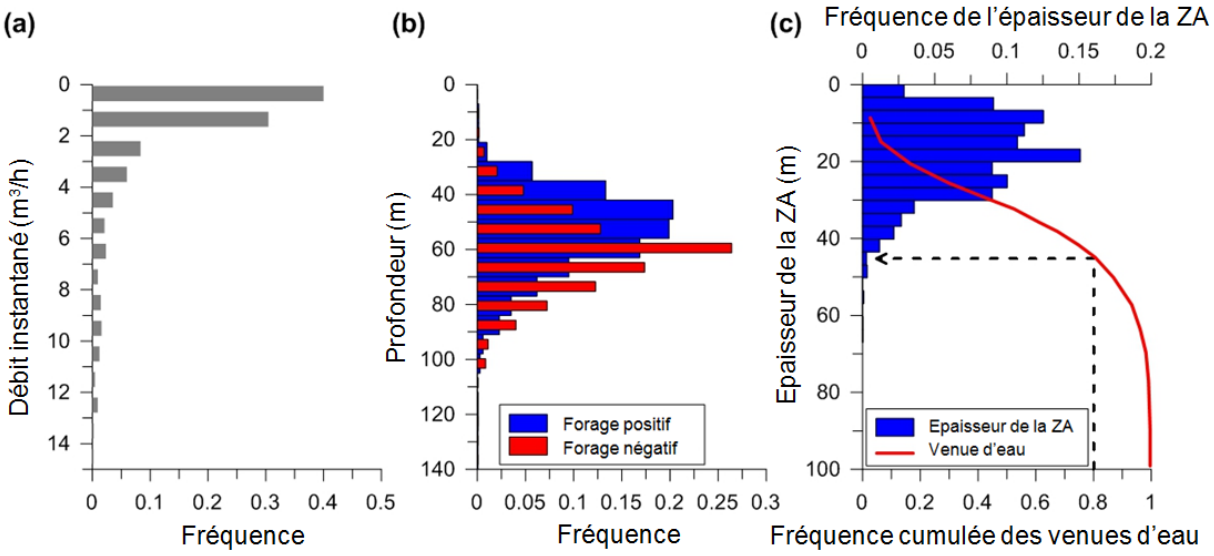


Figure 1.11 – Analyse statistique des forages. a) débits instantanés; b) profondeur des forages; c) épaisseur de la ZA et profondeur des venues d'eau (Vouillamoz *et al.*, 2015a).

A l'échelle régionale

L'épaisseur de la ZA ainsi que le débit spécifique des 1.203 forages de la fenêtre régionale ne semblent pas être contrôlés au premier ordre par les formations géologiques telles que définies par les géologues sur la carte géologique du Bénin (Figure 1.12).

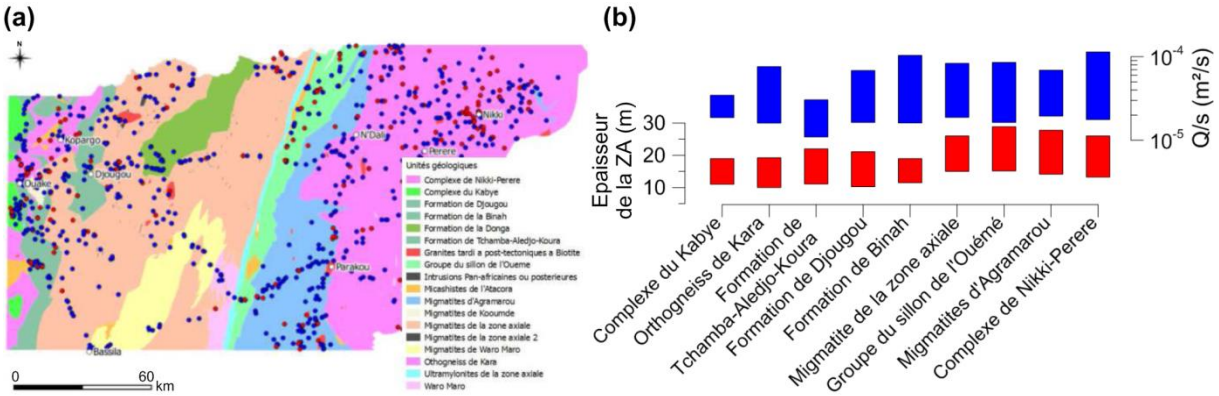


Figure 1.12 – Fenêtre régionale. a) formations géologiques et forages (nom des agglomérations) ; b) épaisseur de la ZA et débit spécifique pour les principales formations géologiques (Vouillamoz *et al.*, 2015a).

Afin de vérifier si les propriétés des forages suivent une logique longitudinale Est-Ouest, la fenêtre régionale a été subdivisée en bandes verticales (Figure 1.13a) en faisant l'hypothèse qu'il existerait des variations Est-Ouest induites par la tectonique ancienne qui a donné aux formations une direction structurale quasi Nord-Sud. La largeur de chaque bande est de 10 km pour pouvoir prendre en compte la longueur des linéaments qui varie de 1,2 km à 4 km (1er et 3e quartiles). Le résultat montre que le taux de succès des forages suit remarquablement une distribution longitudinale. Il est maximum dans la moitié Ouest de la fenêtre (entre 350.000 et 400.000 m de longitude) (Figure 1.13b).

L'épaisseur de la ZA suit également à peu près la même distribution longitudinale alors que la densité des linéaments a une distribution quasi-inverse : elle est plus importante au centre de la fenêtre qui correspond à la zone de basse altitude (zone de la faille de Kandi) où l'épaisseur de la ZA est minimale. Une hypothèse d'interprétation avancée (sans toutefois avoir entrepris des études complémentaires pour la vérifier) est que l'érosion pourrait, dans la partie centrale, avoir décapé une bonne partie de la ZA, ce qui permet aux linéaments (possibles fractures subverticales) d'apparaître clairement.

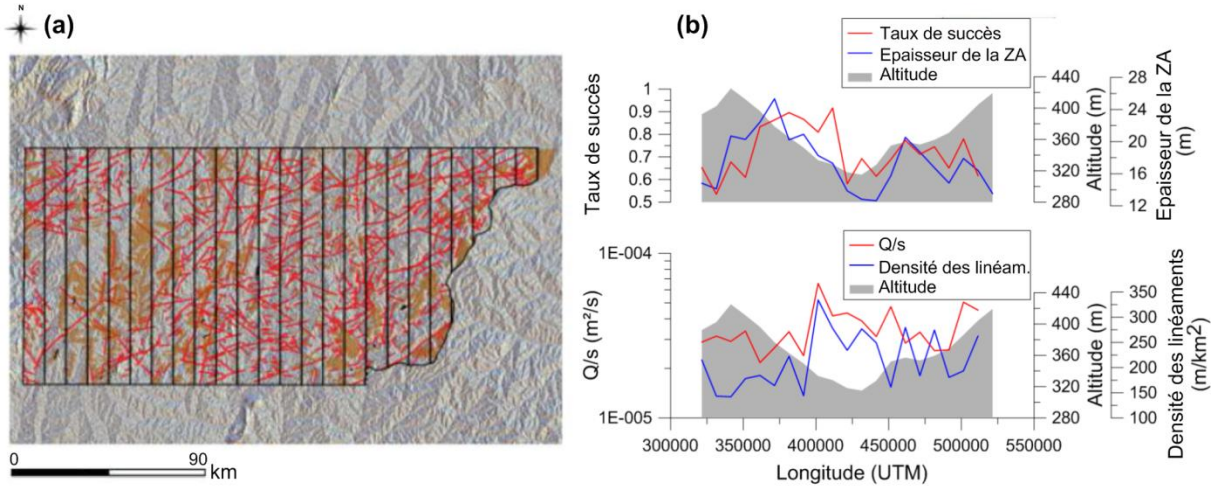


Figure 1.13 – Analyse longitudinale. a) fenêtre régionale et bandes longitudinales avec le relief en nuancé, linéaments et cartographie des surfaces des ZA ; b) variations longitudinales (Vouillamoz *et al.*, 2015a).

Dans le but de quantifier statistiquement les relations qui ressortent des premières analyses, une analyse en composantes principales a été réalisée. Il ressort de cette analyse

qu'avec trois axes ou composantes (F1, F2 et F3) qui forment les axes du graphique 3D (Figure 1.14), on explique 73 % des informations contenues dans les variables initiales (propriétés de l'aquifère et du forage). L'analyse du graphe montre que l'épaisseur de la ZA, sa surface (et par conséquent son volume aussi), et le taux de succès pourraient être corrélés entre eux. Le graphique montre également que les variables de débit spécifique, de direction des linéaments et de densité des linéaments pourraient être corrélées entre elles.

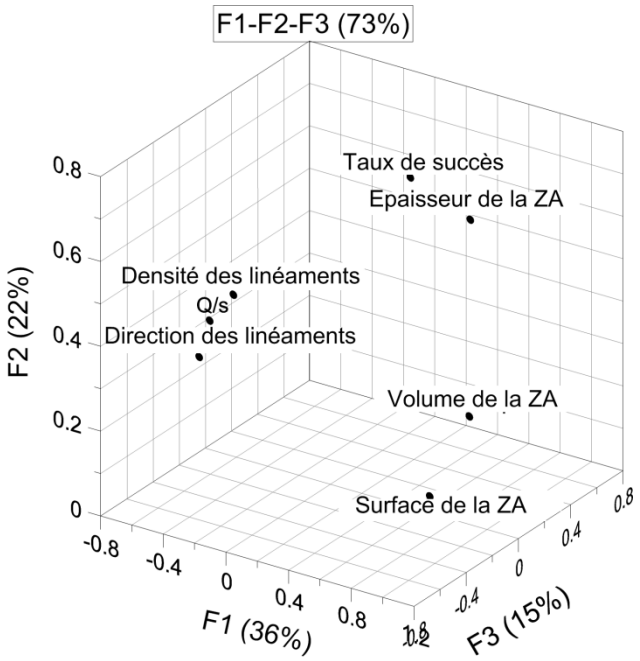


Figure 1.14 – Représentation 3D des corrélations entre les variables (propriétés de l'aquifère et du forage) et les composantes (F1, F2 et F3) (réalisée par J.-M. Vouillamoz).

La Figure 1.15 renseigne sur les corrélations du graphique 3D en représentant deux à deux les variables présentant les plus fortes corrélations. Les résultats montrent qu'à l'échelle régionale, *le taux de succès des forages est corrélé avec (1) l'épaisseur de la ZA* avec un coefficient de corrélation de 0,56 (Figure 1.15a) *et (2) la surface de la ZA* calculée à partir de la carte géologique, avec un coefficient de corrélation de 0,53 (Figure 1.15b). Il faut noter que la meilleure corrélation obtenue est celle entre le taux de succès et le volume de la ZA (coefficient de corrélation de 0,66), ce qui est logique puisque le volume est le produit de l'épaisseur et de la surface. Une corrélation moins forte est observée entre le débit spécifique et la densité des linéaments (coefficient de corrélation de 0,43) (Figure 1.15c).

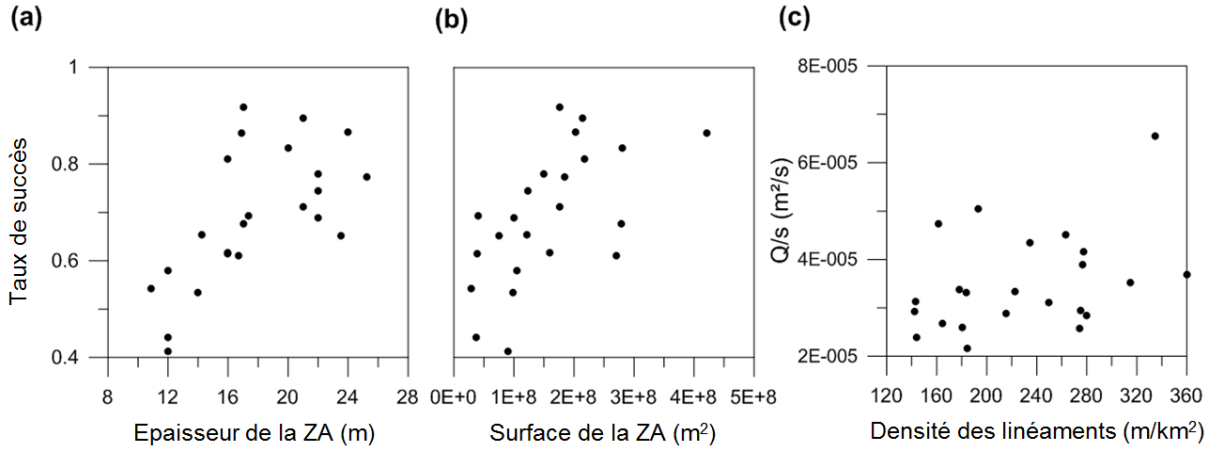


Figure 1.15 – Corrélations obtenues à l'échelle régionale. a) taux de succès et épaisseur de la ZA; b) taux de succès et surface de la ZA; c) débit spécifique et densité des linéaments (Vouillamoz *et al.*, 2015a).

Le variogramme de l'épaisseur de la ZA sur la fenêtre régionale (Figure 1.16) montre un effet de pépite à 55, ce qui signifie *qu'il y a une absence de corrélation (discontinuité) aux petites distances (i.e. il y a de larges variations dans les épaisseurs de la ZA entre deux points proches l'un de l'autre)*. Le palier qui représente la variance de l'épaisseur de la ZA est égal à environ 90 km. *La portée de 3,5 km montre que les épaisseurs de la ZA entre deux points distants de plus de 3,5 km ne sont pas corrélées*.

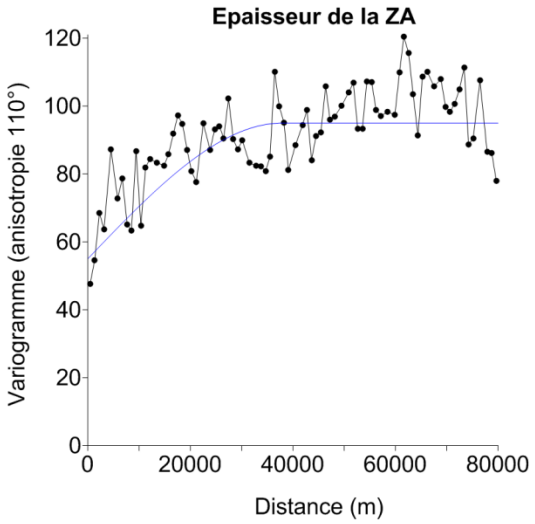


Figure 1.16 – Variogramme de l'épaisseur de la ZA (réalisée par J.-M. Vouillamoz).

A l'échelle du site

Dans la zone entourant les 6 sites expérimentaux GRIBA (Figure 1.17a), 42 forages ont été considérés (soit une moyenne de 8 forages par zone de site), parmi lesquels 15 sont négatifs et 27 sont positifs, soit 55 % d'échec (*e.g*: Figure 1.17b). L'incertitude sur la localisation des points est d'environ 100 m, ce qui permet de regrouper les forages par classes de distance de 100 m.

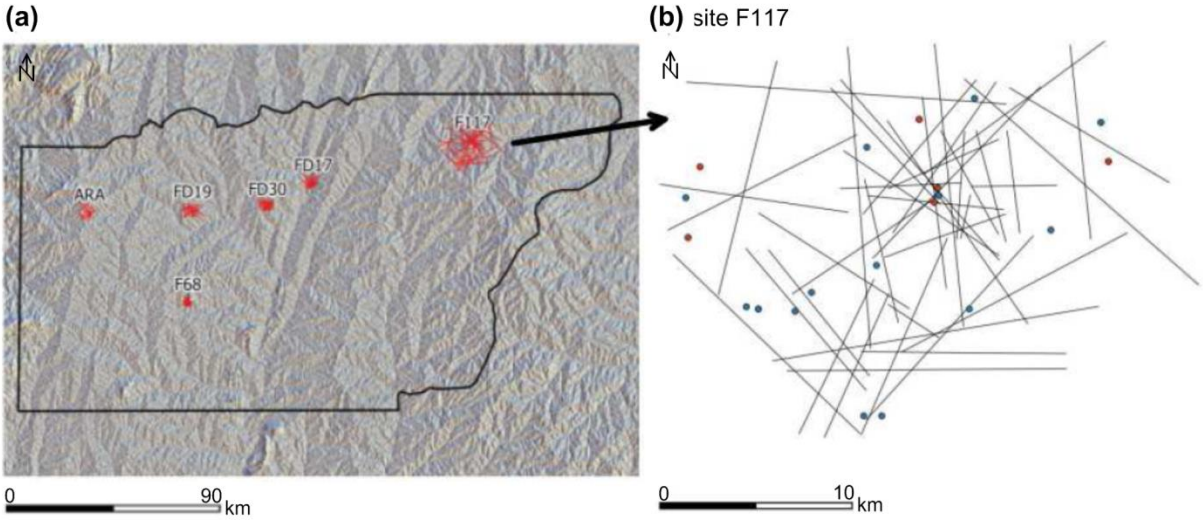


Figure 1.17 – Sites expérimentaux. a) localisation des linéaments observés par site sur la fenêtre régionale ; b) exemple de résultat du site F117, forages utilisés (positifs en bleu et négatifs en rouge) et linéaments (Vouillamoz *et al.*, 2015a).

A l'échelle du site, une relation semble se dessiner entre la distance horizontale au linéament et le débit spécifique des forages (Figure 1.18a). Cependant, le succès des forages n'est pas corrélé à la distance au linéament et le forage a encore une chance significative d'être négatif, même s'il est situé à moins de 200 m du linéament (Figure 1.18b). La conséquence pratique, établie sur un nombre relativement restreint de sites, est que le positionnement d'un forage à quelques mètres près d'un linéament ne constitue pas un objectif en soi et ne doit pas être considéré comme prioritaire. Seulement dans le cas où l'altération est décapée comme dans la zone de la faille de Kandi, la recherche de linéaments pourrait devenir une priorité.

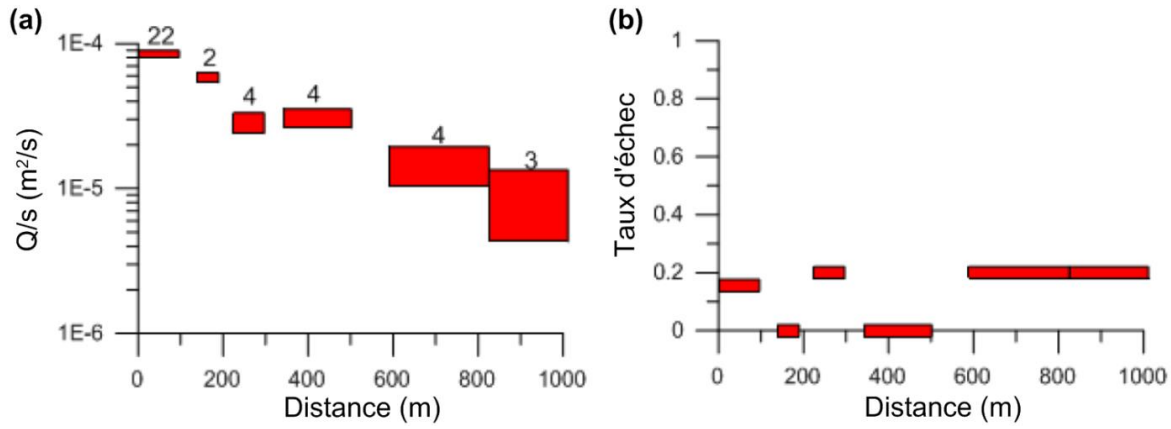


Figure 1.18 – Forage vs distance aux linéaments. a) débit spécifique vs distance, la valeur est le nombre de forage par classe de distance ; b) taux d'échec (forages négatifs) vs distance (Vouillamoz *et al.*, 2015a).

Enfin, les essais de pompage (72 h) montrent que sur quatre sites, les piézomètres sont connectés entre eux par la ZA et la ZFS, mais que sur deux sites (Figure 1.19), les piézomètres situés à moins de 20 m l'un de l'autre *ne sont pas hydrauliquement connectés à travers le réseau de fissures/fractures*, mais plutôt *à travers la ZA* dont la continuité latérale est certaine. Le niveau de l'eau dans le Piézomètre d'Observation N°2 (PO2) sur chacun des deux sites n'a pas réagi durant le pompage dans le Piézomètre de Pompage (PP), alors que le PO1 a toujours réagi. Ce résultat confirme *l'hétérogénéité locale des aquifères de socle à l'échelle d'un site* (PP, PO1 et PO2 ayant approximativement les mêmes profondeurs) et montre qu'à moins de 20 m, les fissures/fractures de la ZFS *peuvent être connectées ou non*.

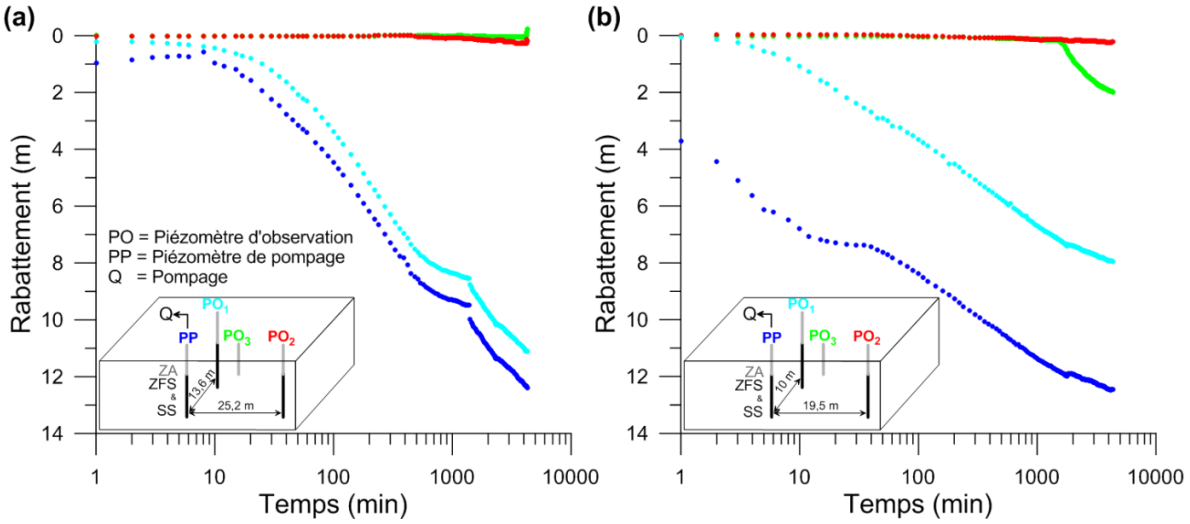


Figure 1.19 – Rabattements relevés lors des essais de pompage. a) site FD30 ; b) site F117.

1.4.3. Cible hydrogéologique

Les résultats obtenus sur le plan national en zone de socle s'apparentent à ceux obtenus par Courtois *et al.* (2010) au Burkina Faso : 23 % des forages ont un débit nul, 35 % sont négatifs, 23 % et 6 % ont un débit respectivement supérieur à 3,6 et 10 m^3/h. Plusieurs études dans le monde ont montré des relations entre le processus d'altération et les propriétés hydrodynamiques des aquifères de socle (Cho *et al.*, 2003; Dewandel *et al.*, 2006; Lachassagne *et al.*, 2001; Maréchal *et al.*, 2004; Taylor *and* Howard, 2000). Certaines études conduites en Afrique de l'Ouest ont également indiqué qu'il y aurait un lien entre le taux de succès des forages et la ZA - épaisseur et/ou teneur en argile (Berger *et al.*, 1980; Dibi *et al.*, 2004; Olayinka, 1992). Au Burkina Faso, Courtois *et al.* (2010) ont montré *(1)* qu'il n'y a pas de relation claire entre la profondeur totale des forages et leur débit, mais *(2)* que les débits instantanés les plus importants sont obtenus à la base de la ZA. En plus, Cho *et al.* (2003) et Dewandel *et al.* (2006) ont démontré que la partie de la ZFS située juste en dessous de la ZA, contribue au débit instantané des forages. Ces résultats confirment ceux qui ont été présentés ici : 80 % des 4.600 venues d'eau ont été relevés à moins de 48 m (et 90 % à moins de 56 m) représentant la gamme d'épaisseur qui intègre la base de la ZA et les premiers mètres de la ZFS.

Au Zimbabwé, la majorité des 163 forages implantés en se basant sur les linéaments ont montré qu'il n'y a pas de corrélation entre le succès des forages et la proximité aux linéaments, leurs azimuts et leurs longueurs (Wright *and* Burgess, 1992). Ceci confirme un des résultats présentés : *(1)* il n'existe pas de relation entre la densité des linéaments et la productivité des forages ; *(2)* la proximité des linéaments n'accroît pas les chances d'avoir un forage positif.

En considérant les résultats obtenus, la cible hydrogéologique prend en compte plusieurs zones ou compartiments du sous-sol. Préférentiellement, pour se donner toutes les chances d'obtenir un forage productif, la cible hydrogéologique à privilégier est le fait d'avoir à un même endroit :

- l'***épaisseur la plus importante possible de la ZA*.** En se référant à ce qui a été dit en 1.2 sur l'argile et le sable, la ZA doit non seulement être la plus épaisse possible, mais être *la plus sableuse possible*, plutôt qu'argileuse (on note que le paramètre de teneur en argile n'a pas pu être étudié dans l'analyse statistique présentée, car les données

sont inexistantes à ce sujet). Nous tentons, dans la suite du manuscrit, d'aborder cette question au chapitre 4.

- la ***ZFS sous-jacente particulièrement intéressante dans ses premiers mètres.*** Statistiquement, toute l'eau possible n'est pas captée dans la ZA et le reste (30 %) serait situé en majorité dans les premiers mètres de la ZFS.

La proximité avec un linéament pourrait être recherchée dans les zones d'altération érodée (zone de la faille de Kandi) pour avoir une chance d'avoir un débit de forage acceptable sans garantie de disponibilité de stock d'eau (en rappelant que dans un cercle de 200 m, la proximité d'un linéament n'indique pas une meilleure probabilité d'avoir un forage positif). Notons que la présence d'un linéament pourrait ne pas indiquer systématiquement la présence d'une fracture tectonique. Cette question a été récemment traitée, à l'échelle d'un site test au Burkina Faso par Soro *et al.* (2017) qui a montré, grâce à la géophysique, qu'il n'y a pas de relation, sur son site, entre les linéaments et les fractures tectoniques.

1.5. Quelques questions posées en général au géophysicien par l'hydrogéologue pour l'implantation d'un forage

Le géophysicien aura pour défi de contribuer à caractériser depuis la surface du sol la cible hydrogéologique pour l'implantation du forage. En effet, l'hydrogéologue, à part certaines déductions issues de l'étude de la topographie, la géomorphologie, les formations géologiques en présence et la végétation (alignement des arbres hydrophiles), n'a pas la possibilité de savoir ce qu'il y a exactement dans le sous-sol. Il fait donc appel au géophysicien qui, à l'aide de ses outils basés sur des principes physiques, « questionne » le sous-sol et obtient des « réponses » qu'il interprète afin d'en déduire les probables configurations du sous-sol. Les questions posées au géophysicien par l'hydrogéologue (considérant la cible définie) sont généralement de deux types : les questions liées *(1)* à la position du futur forage et *(2)* aux caractéristiques du forage qui sera réalisé. Elles sont les suivantes :

- **Questions liées à la position du futur forage**
    - Où se trouve la plus importante épaisseur de la ZA ?
    - Où se trouve la ZA la plus sableuse – la moins argileuse ?
    - Où se trouve la ZFS la plus épaisse ou une possible ZFV ?

- **Questions liées aux caractéristiques du forage**
    - A quelle profondeur serait-il probable de traverser des fractures et d'avoir des venues d'eau issues de la ZFS ?
    - Quelle est la profondeur possible du forage ?
    - Quel est le débit potentiel du forage ?

Conclusion partielle

Les aquifères de la zone de socle du Bénin sont des aquifères de types poreux et fissurés/fracturés structurés selon un continuum hérité du processus d'altération. Ces aquifères de socle ont été mis en place suite au processus d'altération dont les principaux acteurs sont le temps, l'eau, la température (climat) et le contexte géodynamique. Le modèle hydrogéologique de ces aquifères sous climat tropical (chaud et humide) présente plusieurs compartiments : la Zone Altérée (ZA), la Zone Fracturée Stratiforme (ZFS), la Zone Fracturée subVerticale (ZFV) et le Socle Sain (SS). L'analyse conduite dans le cadre du projet GRIBA par Vouillamoz *et al*. (2015a) pour définir la cible hydrogéologique pour l'implantation des forages dans cette zone de socle a révélé que la cible hydrogéologique à privilégier est l'épaisseur de la ZA (et sa faible teneur en argile logiquement) et les premiers mètres de la ZFS. Ceci dit, l'hypothèse N°1 de cette étude selon laquelle la cible à privilégier pour l'implantation d'un forage dans les zones de socle en milieu tropical comme celle du Bénin est certainement l'épaisseur et la nature de l'altération, est vérifiée. Il revient maintenant au géophysicien de la caractériser depuis la surface du sol via la mesure de paramètres géophysiques. Dans le chapitre suivant nous présentons les deux paramètres géophysiques utilisés dans cette étude pour la caractérisation de la cible hydrogéologique.

Chapitre 2

Résistivité et chargeabilité électrique : Définitions et mesures par la méthode électrique

Introduction

La géophysique est appliquée pour l'implantation des forages d'eau car elle permet, par l'utilisation d'appareillages basés sur un principe physique, de « questionner » le sous-sol depuis la surface pour obtenir des « réponses » correspondant à des valeurs de paramètres physiques mesurés, valeurs qui, interprétées, permettent de caractériser le sous-sol. Le géophysicien a le loisir de choisir le paramètre qu'il souhaite mesurer, la méthode adéquate pour sa mesure et au sein de cette méthode, la technique la plus adaptée (s'il en existe plusieurs). Ces choix sont faits en considérant *(1)* l'environnement et le contexte géologique, *(2)* la cible recherchée, *(3)* la sensibilité du paramètre mesuré à la cible, *(4)* la capacité de la méthode à bien mesurer le paramètre (plusieurs méthodes peuvent mesurer un même paramètre), *(5)* pour les méthodes ayant plusieurs techniques de mise en œuvre, l'aptitude (avantages et limites) d'une technique particulière selon le contexte et enfin, *(6)* les moyens financiers disponibles (Rubin *and* Hubbard, 2006). Pour l'implantation du forage, il faut donc choisir le paramètre qui, mesuré par une méthode via une technique, permet de relever les variations d'une propriété physique de la cible hydrogéologique. Cette variation doit être suffisamment importante pour engendrer une « anomalie » significative dans les réponses (signaux) enregistrées. Dans ce chapitre, nous présentons les deux paramètres électriques (résistivité et chargeabilité) utilisés dans cette étude et les techniques de la méthode électrique utilisées pour la mesure de ces paramètres.

2.1. Résistivité électrique

2.1.1. Définition et intérêt pour l'hydrogéologie

La résistivité d'un matériau (son inverse, la conductivité) est sa capacité à s'opposer au passage d'un courant électrique. Elle est définie comme étant la résistance ohmique d'un

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

cylindre d'une surface de section unitaire et d'une longueur unitaire (Kunetz, 1966). Les unités conventionnelles étant l'*ohm* pour la résistance et le *mètre* pour la longueur, l'unité de la résistivité est l'ohm.mètre (Ω.m ou ohm.m).

$$\rho = \frac{A.V}{L.I} = \frac{1}{\sigma} \tag{2.1}$$

avec : ρ = résistivité en ohm.m, A = surface en m^2, L = longueur en m, V = tension en V, I = intensité en A et σ = conductivité en S/m.

Pour l'hydrogéologue, la résistivité électrique constitue un paramètre physique intéressant en tout premier lieu car elle est liée au degré d'altération des roches en zone de socle (10 ohm.m pour des argiles et plus de 10.000 ohm.m pour des roches saines).

La résistivité électrique peut être caractéristique de plusieurs phénomènes de conduction : la conduction électronique (électrons libres dans les métaux), la conduction diélectrique (courants de déplacement sous l'influence de champs de très hautes fréquences) et la *conduction électrolytique* (fait intervenir le déplacement des ions en solution dans l'eau d'imbibition) (Figure 2.1). C'est ce dernier phénomène qui est mesuré par le géophysicien sur le terrain ; la conduction électrolytique est mise en jeu dans les sols et les roches et se produit grâce au déplacement des ions dissous dans l'eau existant entre les pores interstitiels du matériau (Kunetz, 1966).

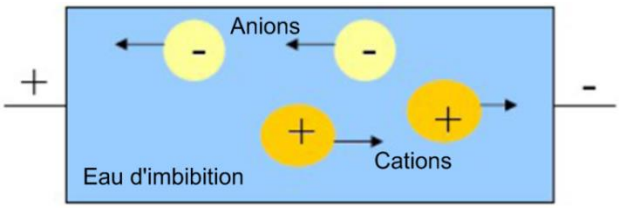


Figure 2.1 – Schématisation de la conductivité électrolytique (inspiré de Kunetz, 1966).

2.1.2. Facteurs influant sur la valeur de la résistivité électrique

Les facteurs influant sur la valeur de la résistivité sont largement décrits dans la littérature (*e.g.* Keller, 1988; McNeill, 1980; Ward, 1990). Étant donné que le phénomène mis

en jeu ici est la conduction électrolytique, les facteurs qui influent le plus sur la valeur de la résistivité sont les suivants :

- *La porosité totale* : définie comme le rapport entre le volume des vides et le volume total. Si la porosité augmente, la résistivité va diminuer (si les autres facteurs sont constants). Dans notre zone d'étude, la résistivité augmente de la zone argileuse à la zone sableuse, de la ZA à la ZFS et au SS, mais il est difficile d'en déduire une variation de porosité directement car d'autres facteurs interviennent, notamment les argiles et le degré d'altération de la roche.

- *La tortuosité* : définie par la taille et la forme des grains de la matrice. Elles contrôlent la forme des passages entre les pores ou les interstices. En général, la résistivité va augmenter avec la tortuosité.

- *La saturation* : définie comme le pourcentage des vides remplis par l'eau d'imbibition. L'augmentation de la saturation va diminuer la résistivité. Elle n'influe sur la résistivité que dans la zone non-saturée car en zone saturée, elle est égale à 1 (100 %).

- *La résistivité électrique (ou conductivité électrique) de l'eau d'imbibition* : définie par la concentration des ions dans l'eau. L'augmentation de la conductivité de l'eau fera baisser la résistivité de l'ensemble de la roche. La faible variation de la conductivité électrique des eaux dans notre zone d'étude (25 à 80 ohm.m sur une échelle logarithmique) fait que les variations de résistivité observées seront surtout dues aux autres facteurs plutôt qu'à la conductivité électrique de l'eau.

- *La température*: lorsqu'elle augmente, la viscosité diminue, la mobilité des ions devient plus grande, ce qui diminue la résistivité. La résistivité varie d'environ 2 % par degré Celcius. Dans notre zone d'étude, la température du sous-sol est suffisamment constante (autour de 27°C) et n'engendre pas des variations de résistivité significatives.

- *La quantité et la composition des colloïdes présents* : substance dissoute dans l'eau d'imbibition sous forme de particules de très petites tailles. Une augmentation des colloïdes de substance conductrice va diminuer la résistivité.

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

- *La résistivité ou conductivité de la matrice* : la composition même de la roche. L'augmentation de la teneur en argile va diminuer la résistivité de la roche. Ce facteur est d'une importance capitale dans cette étude, car elle permet de différencier les zones argileuses des zones sableuses, la ZA de la ZFS et la ZFS du SS.

En résumé, la résistivité est influencée dans notre zone d'étude en premier par la nature de la roche et la porosité, en second par la conductivité de l'eau d'imbibition (généralement négligée car sur nos sites, la plus importante variation de la conductivité de l'eau n'a changé la résistivité que de 5 % au maximum). En zone non saturée elle sera aussi influencée par le degré de saturation.

2.1.3. Relations avec la porosité : loi d'Archie modifiée dite « de saturation »

Dans certains types de formations « simples » ou « propres » (*i.e.* sans argiles), la loi d'Archie (Archie, 1942) modifiée - dite loi d'Archie de saturation - citée par exemple par Keller (1988) ou Ward (1990) et utilisée récemment au Bénin par Yalo *et al.* (2013a, 2013b), synthétise l'influence des facteurs précédemment cités par l'équation suivante :

$$\rho_f = \mathrm{a}\frac{\rho_w \emptyset^{-m}}{S_w^n} \tag{2.2}$$

et

$$F = \frac{\rho_f}{\rho_w} = \frac{a}{\emptyset^m} \tag{2.3}$$

avec : F = facteur de formation (sans dimension) ; ρ_f = résistivité de la formation (ohm.m) ; ρ_w = résistivité de la solution (ohm.m) ; ø = porosité totale (sans dimension) ; S_w = saturation (sans dimension et égale à 1 en milieu saturé) ; a = coefficient de saturation (sans dimension) ; m = facteur de cimentation (sans dimension) ; n = exposant de saturation (sans dimension).

La mesure de la résistivité sur le terrain donne la valeur de ρ_f. Si la formation en question ne contient pas d'argile, on peut, moyennant des hypothèses sur les valeurs de a, m et n, obtenir une estimation de la porosité ø connaissant ρ_w, ou de ρ_w connaissant ø.

- Le coefficient de saturation *a* est généralement proche de 1 mais peut atteindre des valeurs de 1,4 pour des roches cristallines et métamorphiques très denses (Keller, 1988).
- Le facteur de cimentation *m* traduit l'effet de la forme des particules. Par exemple, il est égal à 1,3 pour des sphères ; pour des sables constitués de fragments de coquille, il atteint la valeur 1,85 (Jackson *et al.*, 1978).
- L'exposant de saturation *n* a une valeur de saturation généralement très proche de 2. Quelques valeurs des facteurs *m* et *a* sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 – Paramètres m, a et porosité pour différents types de grains ou de roches, d'après Keller (1988).

Types de grains ou de roches	Coefficient m	Coefficient a	Porosité (%)
Roches détritiques faiblement cimentées (sable, grès, certains calcaire)	1,37	0,88	25 à 45
Roches sédimentaires modérément cimentées (grès et calcaire)	1,72	0,62	18 à35
Roches sédimentaires fortement cimentées	1,95	0,62	5 à 25
Roches volcaniques très poreuses	1,44	3,50	20 à 80
Roches cristallines et métamorphiques très denses	1,58	1,40	< 4

Dans le cadre de la loi d'Archie, la notion de porosité peut être discutée : la porosité concernée par la loi d'Archie peut être la somme de différentes porosités qui *(1)* sont disponibles pour contenir de l'eau et *(2)* permettent au courant électrique de circuler d'un vide saturé à l'autre via l'eau d'imbibition. Pour le géophysicien, cette porosité peut être qualifiée de « porosité communicante » contrairement à la « porosité fermée » qui est constituée de vides isolés qui ne communiquent pas (ex : les roches volcaniques vacuolaires comme les ponces non fracturées). Pour l'hydrogéologue, la porosité communicante représente la somme des porosités de drainage, capillaire et en partie pelliculaire (définies en 1.2.1). Donc, la porosité de la loi d'Archie peut être plus importante que la porosité de drainage qui intéresse l'hydrogéologue, notamment pour des formations contenant des éléments fins. En revanche, pour des sables « propres » (sans argile) la porosité de la loi d'Archie est très proche de la porosité de drainage.

La loi d'Archie a pour principal inconvénient de ne pas prendre en compte la présence d'argile, ce qui est défavorable pour l'étude de la zone de socle pour laquelle la ZA est bien souvent plus ou moins argileuse. Mais sachant que les minéraux argileux possèdent une capacité importante d'échange de cations, et qu'ils échangent une quantité d'ions adsorbés à leur surface, ces ions peuvent contribuer à augmenter la conductivité du milieu. Et considérant que cette conduction par la surface des grains d'argile s'ajoute à la conduction « volumique » par l'eau, Simandoux (1963) propose l'équation suivante pour prendre en compte la fraction argileuse :

$$\frac{1}{\rho_f} = \frac{V_{cl}}{\rho_{cl}} S_w + \frac{\emptyset^m}{a.\rho_w} S_w^2 \qquad (2.4)$$

avec : V_{cl} = volume d'argile / volume total, ρ_{cl} = résistivité « surfacique » de la fraction argileuse.

Cette équation n'est cependant pas facile à appliquer si on ne connait pas les volumes d'argile et surtout la résistivité surfacique de la fraction argileuse. Dans cette étude, nous avons pu avoir les teneurs en argile et aussi les types d'argile de certains échantillons mais pas le volume d'argile ni sa résistivité surfacique. L'application de cette équation n'a donc pas été possible mais des tendances de relation entre la présence d'argile (teneur et type) et la résistivité électrique ont pu être révélées.

2.1.4. Exemple de valeur de résistivité

La gamme des valeurs de résistivité peut varier d'environ 1 ohm.m (sable saturé d'eau salée) à plus de 10.000 ohm.m (roche de socle saine). Le tableau 2.2 présente des valeurs de résistivité représentatives de quelques roches plus ou moins saturées en eau.

Tableau 2.2 – Exemple de valeur de résistivité (Kunetz, 1966).

	Valeurs pour les formations saturées (ohm.m)
Argiles	5 à 10
Sables	50 à 400
Graviers	150 à 500

Schistes cristallins	100 à 10.000
Basaltes	10 à 50.000
Granites	100 à 50.000
Calcaires et dolomies	100 à 10.000
Eau de mer	< 0,2
Eaux douces de surfaces et de subsurface	10 à 300
Eaux connées	0,05 à 10
Limite de potabilité	2 à 6

Ces exemples appellent quelques remarques :

- Les grandes différences entre les résistivités observées pour un même type de roche s'expliquent en partie par une saturation incomplète (pour les sables et les graviers par exemple) ; par les différentes salinités des eaux d'imbibition (pour les sédiments) ; par la présence ou non d'argiles (dans les grès et les roches carbonatées) ; par les degrés d'altération plus ou moins poussés (pour les roches plutoniques et métamorphiques principalement) ;
- Ces variations peuvent entraîner des confusions ; ainsi des sables, des moraines et des grès marneux peuvent très bien présenter des résistivités identiques ;
- Malgré l'importance des variations observées et les chevauchements possibles, l'étude basée sur la mesure de la résistivité électrique appuyée sur une inter-comparaison géologique apporte, dans bien des cas, des informations sans ambiguïtés.

2.2. Mesure de la résistivité avec la méthode électrique à courant continu

La résistivité peut être mesurée par différentes méthodes (électromagnétique ou électrique). La méthode électrique est la plus utilisée pour l'implantation des forages d'eau.

2.2.1. Bref historique de la méthode électrique

C'est l'une des méthodes géophysiques les plus anciennes. Elle est employée dans divers domaines de prospection et de recherche. Le premier travail important sur la prospection électrique mesurant la résistivité électrique se doit d'être attribué à Fox (1789 -

1877), qui, de par ses connaissances en géologie et ses études sur la température de la Terre, l'électricité et le magnétisme terrestre, mérite d'être considéré comme étant le grand-père des géophysiciens. C'est Conrad Schlumberger qui a montré l'aspect dynamique de la circulation du courant électrique dans la terre.

La méthode est utilisée dans deux domaines majeurs de la prospection géophysique : *(1)* dans l'exploration directe des gisements de minéraux, particulièrement les minerais de fer et *(2)* dans l'exploration indirecte de la forme et de la nature des structures géologiques (d'où son intérêt pour l'hydrogéologie). Les premières applications et les développements majeurs ont été faits entre la première et la deuxième guerre mondiale. Depuis la fin de la deuxième guerre mondiale, la méthode prend un double aspect dans l'exploration géophysique : les explorations de proche surface (exploration minérale, d'eau, et d'ingénierie au Venezuela, au Brésil, en Afrique du Nord, au Gabon et à Madagascar) et les explorations à grande échelle d'espace et de profondeur (exploration tectonique pour la recherche du pétrole par exemple). Tout cela prouve l'aptitude de la méthode électrique à donner une précieuse connaissance de la nature de la Terre jusqu'à des profondeurs atteignant plusieurs centaines de mètres (Kunetz, 1966).

Aujourd'hui, grâce à plusieurs avancées, notamment la loi d'Archie de G. E. Archie, la résistivité électrique permet de définir les propriétés hydrodynamiques des aquifères sableux généralement rencontrés en zone sédimentaire (Archie, 1942). En zone de socle d'Afrique de l'Ouest, les premières véritables applications de la méthode ont été conduites par le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques en 1984 (CIEH, 1984) dont la méthodologie d'application de la méthode est suivie par la majorité des bureaux d'études jusqu'aujourd'hui.

2.2.2. Principe de la méthode électrique à courant continu

Principe de base

Fondamentalement, la résistivité du sous-sol n'est pas directement mesurée par la méthode électrique mais calculée ; cependant, conventionnellement, on dit qu'on mesure la résistivité. Dans un premier temps, on mesure la différence de potentiel ΔV (en Volt) du sous-sol entre deux points, en injectant dans ce dernier un courant continu d'intensité I (en Ampère) en se servant de : deux électrodes A et B (ou C1 et C2) pour faire circuler le courant via un générateur de courant et de deux autres électrodes M et N (ou P1 et P2) pour mesurer la

différence de potentiel via un potentiomètre/voltmètre (Figure 2.2). L'appareil qui permet de mesurer la différence de potentiel et d'obtenir automatiquement le calcul de la résistivité est le résistivimètre.

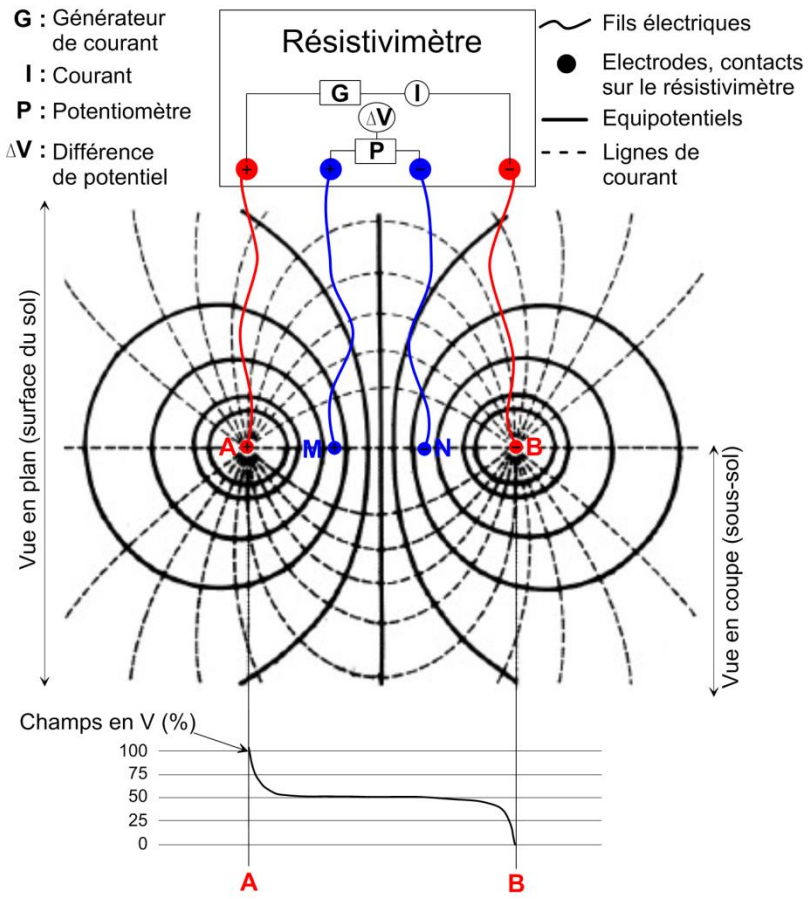


Figure 2.2 – Schématisation du principe de la mesure de résistivité par la méthode électrique (inspiré de Chapellier, 2000).

Dans un second temps, la résistivité est calculée (calcul automatique que fait le résistivimètre) en partant de la première équation de la résistivité (Equation 2.1) dans laquelle le rapport A/L (surface/longueur) correspond ici à un coefficient géométrique *K* calculé en prenant en compte la configuration des électrodes et le fait que la mesure soit faite dans un demi-espace (le courant circulant dans la terre mais pas dans l'atmosphère). L'équation de calcul de la résistivité du sous-sol devient alors :

$$\rho = \frac{K.\Delta V}{I} \tag{2.5}$$

Le facteur géométrique *K* dépend du dispositif de mesure (disposition des 4 électrodes alignées). Pour des mesures effectuées dans un demi-espace,

$$K = \frac{2.\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \tag{2.6}$$

avec : *AM* = distance entre les électrodes *A* et *M* (en m), pareil pour les distances *BM*, *AN* et *BN*.

Il faut noter qu'une valeur de résistivité obtenue sur le terrain, représente la résistivité intégrée de tout le volume du sous-sol traversé par les lignes de courant ; ce qui appelle la notion de résistivité apparente.

Notion de résistivité apparente

Lorsque le sous-sol est homogène, le courant circule « théoriquement » sans aucune déformation des lignes de courant (Figure 2.3a) et la résistivité obtenue est celle du sous-sol investigué (ex : une mesure sur affleurement ou dans un petit volume avec des écartements d'électrodes relativement petits). Par contre, dans un sous-sol hétérogène, les lignes de courant se déforment lorsqu'elles traversent des zones de résistivités différentes (Figure 2.3b). Dans ce cas, la résistivité obtenue est appelée *résistivité apparente* (ρ_a). La résistivité correcte ou « calculée » des différentes zones (ou couches) du sous-sol, est obtenue après inversion des données de sondage électrique lorsque la structure du sous-sol est considérée tabulaire (voir 2.2.3).

Profondeur d'investigation et dispositifs d'électrodes

La profondeur d'investigation est contrôlée au premier ordre par la longueur du dispositif. Plus elle est grande, plus la profondeur d'investigation est importante. Le deuxième paramètre de contrôle est la configuration ou le dispositif des électrodes. Chaque dispositif a une profondeur d'investigation théorique en fonction de la distance entre les électrodes (Figure 2.4). Le plus utilisé au Bénin et dans la sous-région est le dispositif Schlumberger.

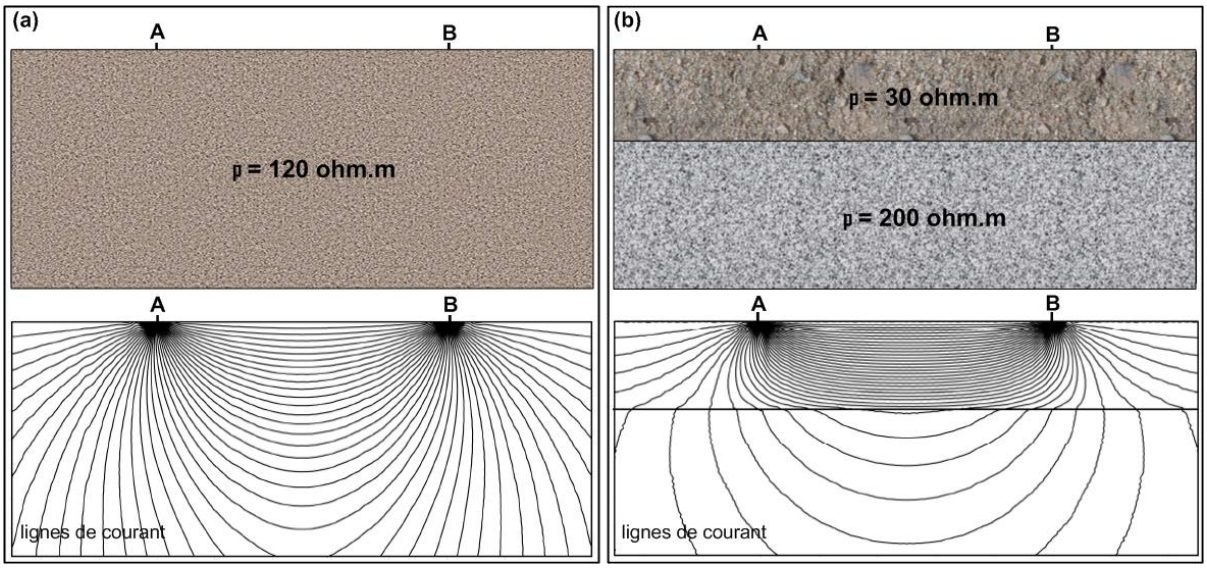


Figure 2.3 – Circulation du courant dans le sous-sol. a) dans un sous-sol homogène ; b) dans un sous-sol hétérogène (inspiré de Chapellier, 2000).

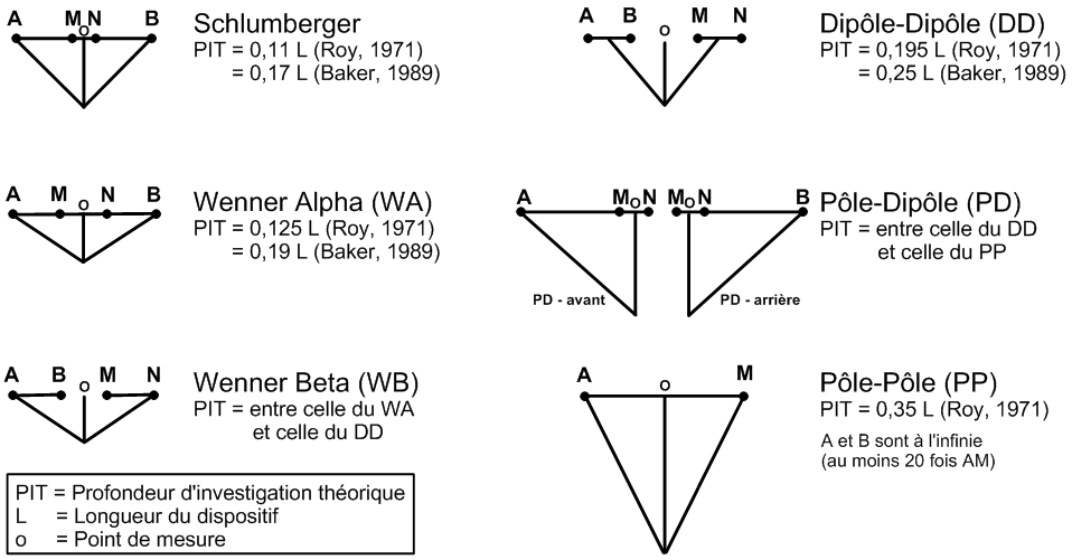


Figure 2.4 – Principaux dispositifs de mesure de la méthode électrique (inspiré de Chapellier, 2000).

Un troisième paramètre de contrôle qui est relativement important est la succession des couches en termes de résistivité : si la couche en surface est conductrice, la profondeur d'investigation sera réduite (Figure 2.5). En zone de socle lorsque la ZA est très argileuse, étant en surface et la ZFS étant plus résistante, elle réduit la profondeur d'investigation.

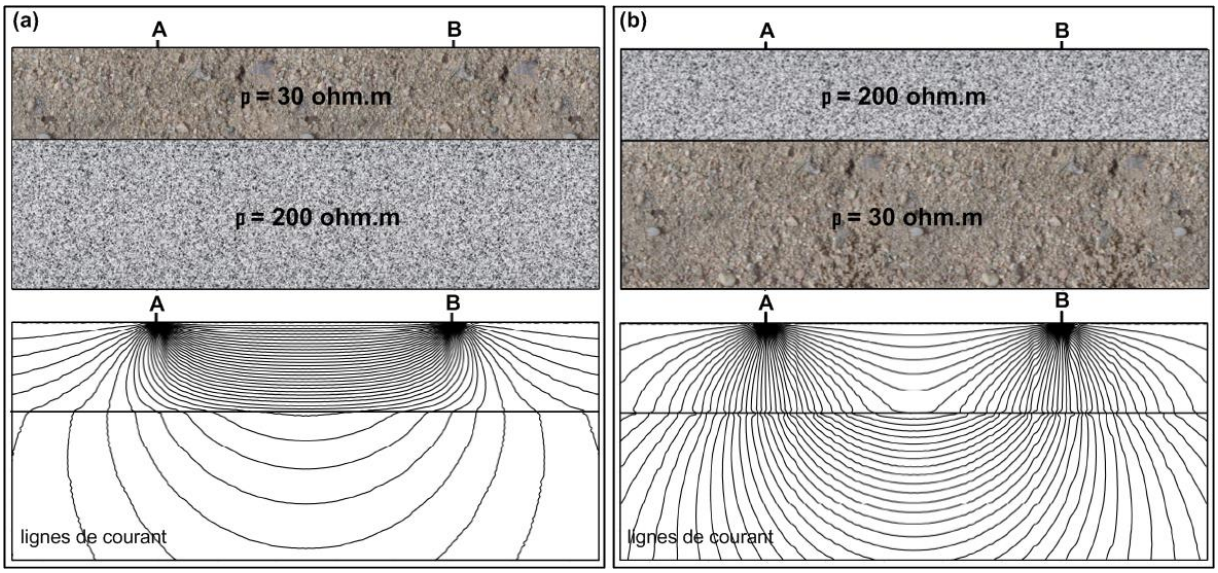


Figure 2.5 – Circulation du courant dans le sous-sol. a) couche en surface plus conductrice ; b) couche en surface plus résistante (inspiré de Chapellier, 2000).

2.2.3. Techniques traditionnelles 1D de mesure depuis la surface : profil et sondage

On appelle techniques traditionnelles 1D, les techniques classiquement mises en œuvre sur le terrain par les bureaux d'études pour l'implantation des forages d'eau en général et au Bénin, qui investiguent le sous-sol suivant une dimension (1D) : latéralement (le profil de résistivité électrique) et suivant la profondeur (le sondage de résistivité électrique).

Profil de résistivité électrique

Le profil de résistivité électrique, communément appelé profil/trainé électrique, ressort les variations latérales de la résistivité du sous-sol. L'objectif pour les bureaux d'études est d'identifier une zone où la résistivité apparente baisse (anomalie), qui indiquerait la présence d'une fracture tectonique subverticale considérée comme intéressante pour l'implantation du forage.

Il consiste à porter l'investigation sur une tranche de sous-sol d'épaisseur supposée constante, que l'on atteint en fixant un écartement conséquent entre les électrodes d'injection A et B, et en suivant une direction donnée avec un pas de mesure unique (Figure 2.6). La

direction du profil doit être perpendiculaire à la direction de la structure (fracture tectonique subverticale) que l'on souhaite identifier. Le point de mesure correspond au centre du dispositif (ex : centre de MN pour le dispositif Schlumberger). En réalisant plusieurs profils, une carte des résistivités apparentes peut être produite. Le profil ou la carte obtenue donnent *seulement* une idée qualitative du profil ou de la zone investiguée.

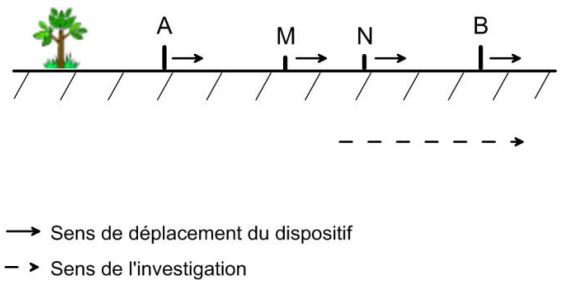


Figure 2.6 – Mise en œuvre d'un profil électrique Schlumberger (inspiré de Chapellier, 2000).

Les données de résistivités apparentes sont représentées sur un papier semi-logarithmique où la résistivité apparente, souvent représentée sur l'axe des ordonnées, est en log et la distance effectuée suivant le pas de mesure (du premier au dernier point de mesure) est notée en abscisse. Ci-dessous des exemples de profils électriques réalisés par différents bureaux d'études au Bénin sur différents sites en zone de socle (Figure 2.7).

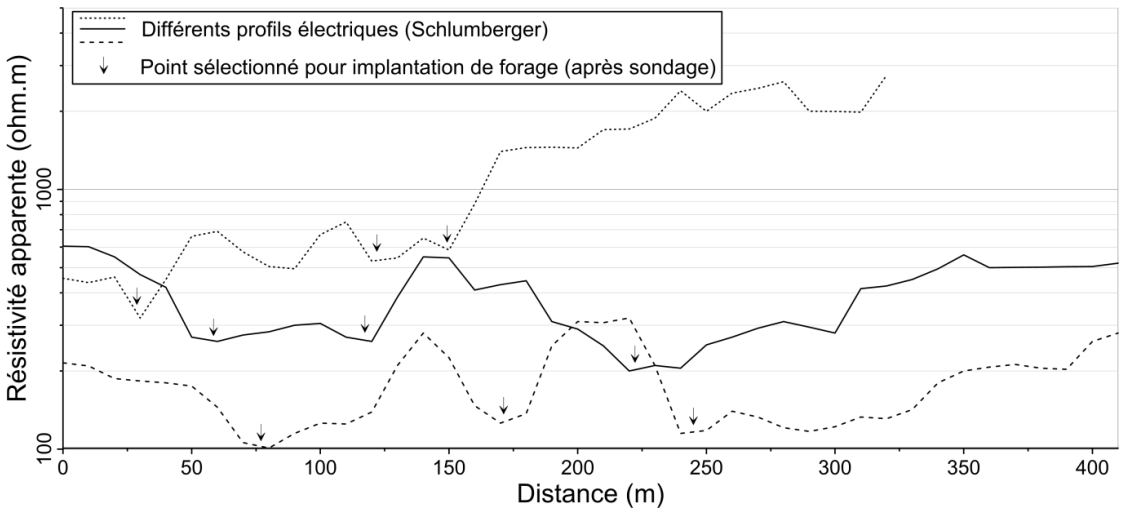


Figure 2.7 – Exemples de profils électriques réalisés par différents bureaux d'études au Bénin sur différents sites en zone de socle.

Pour obtenir plus d'informations exploitables sur la zone investiguée, il est souhaitable de disposer *(1)* d'un ensemble de mesures d'écartements différents (pour apprécier la variation de la résistivité apparente latéralement depuis les petites profondeurs vers les plus grandes) et *(2)* d'une bonne connaissance du contexte géologique (Meyer de Stadelhofen, 1991). Cette densification d'informations est très rarement entreprise par les bureaux d'études en général et au Bénin. En plus de cette densification, le sondage électrique est nécessaire pour obtenir les résistivités calculées (inversées) de chaque zone (ou couche) du sous-sol.

Sondage de résistivité électrique

Le sondage de résistivité électrique, communément appelé sondage électrique, est réalisé dans un second temps, après le profil électrique, pour renseigner en un point donné du profil (point d'anomalie en général), sur les variations de la résistivité électrique suivant la profondeur. L'objectif est de pouvoir déterminer l'épaisseur et la résistivité des couches du sous-sol pour l'implantation du forage. En effet, c'est la technique qui permet, en un point, de définir, après inversion des valeurs de résistivités apparentes obtenues, la résistivité correspondant à chaque couche du sous-sol pour une épaisseur donnée, en faisant l'hypothèse que le sous-sol est tabulaire. Le sondage apporte donc des informations quantitatives suivant la verticale en un point de mesure.

Le sondage électrique réalisé avec un dispositif Schlumberger consiste à effectuer une succession de mesures en éloignant progressivement les électrodes du point de mesure (centre du dispositif) (Figure 2.8). Cette façon de procéder fait passer la majeure partie du courant dans un volume du sous-sol de plus en plus grand et accroît ainsi progressivement la profondeur d'investigation.

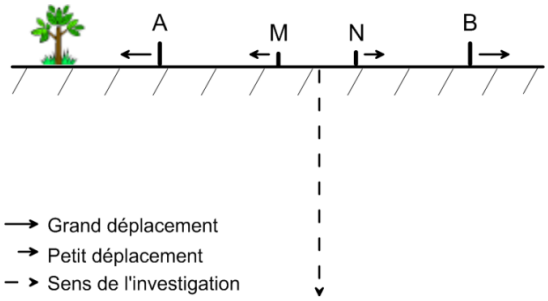


Figure 2.8 – Mise en œuvre d'un sondage électrique Schlumberger (inspiré de Chapellier, 2000).

La présentation des données de résistivités apparentes du sondage électrique se fait sur un graphe bi-logarithmique en plaçant les valeurs de résistivités apparentes en ordonnée et la longueur de ligne (AB/2) en abscisse. Le graphique obtenu est appelé courbe ou log de sondage. C'est l'interprétation de la courbe qui permet d'obtenir l'épaisseur et la résistivité de chacune des couches à l'aplomb du point de mesure.

L'interprétation d'un sondage réalisé sur deux ou plusieurs couches du sous-sol se faisait à l'aide d'un abaque (Kunetz, 1966; Meyer de Stadelhofen, 1991), qui est désormais intégré numériquement dans les logiciels d'interprétation par ordinateur. Lorsqu'il s'agit de deux couches par exemple, en résolvant l'équation générale du potentiel à la surface de deux couches parallèles, homogènes et isotropes, la résistivité apparente s'écrit (Bhattacharya *and* Patra, 1968) :

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n.\ L^3}{[L^2\ + (2n)^2]^{\frac{3}{2}}} \tag{2.7}$$

où

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \tag{2.8}$$

et

$$L = \frac{OA}{h_1} \tag{2.9}$$

avec : ρ_1 et ρ_2 = résistivités de la première et de la deuxième couche ; O = centre du dispositif d'électrodes (le quadripôle) et h_1 l'épaisseur de la première couche. Ainsi on a :

- si OA tend vers 0, L tend vers 0 et $\rho_a = \rho_1$;
- si OA tend vers l'infini, L tend vers 0 et $\rho_a = \rho_2$;
- si on impose ρ_1/ρ_2 = constante, le membre de droite de l'équation 2.7 ne dépendra que de L et donc de OA/h_1.

Entre la résistivité ρ et l'épaisseur h, des relations existent : la résistance transverse et la conductance longitudinale.

- La *conductance longitudinale* est définie par :

$$S = h/\rho \tag{2.10}$$

- La *résistance transverse* est définie par :

$$T = h.\rho \tag{2.11}$$

Les paramètres S et T sont à l'origine du phénomène d'équivalence, *i.e.* deux couches d'épaisseurs et de résistivités différentes s'équivalent selon qu'elles ont la même conductance longitudinale ou la même résistance transverse. Ces dernières contrôlent l'équivalence lorsque les couches qui s'équivalent se retrouvent entre deux couches respectivement plus résistantes ou plus conductrices. L'équivalence due à la conductance longitudinale est souvent rencontrée en zone de socle où la ZA souvent saturée se retrouve entre la ZFS (ou le SS si la ZA et la ZFS sont regroupées) et le sol (ou la cuirasse) souvent sec, qui sont plus résistants que la ZA. L'apport de connaissances extérieures est nécessaire en situation d'équivalence pour fixer soit l'épaisseur (log de forage) soit la résistivité (mesure sur affleurement).

Un autre phénomène appelé *suppression* affecte également les résultats de sondage, *i.e.* deux couches peuvent se regrouper en une seule. En zone de socle, ce cas est fréquemment rencontré : les résultats d'inversion de sondage montrent un regroupement de la ZA et de la ZFS en une couche unique.

L'hypothèse d'une géométrie 1D (tabulaire) du sous-sol étant nécessaire pour interpréter un sondage électrique, les cas de sous-sol 2D (variation latérale et verticale de la résistivité) ne peuvent logiquement pas être traités par le sondage électrique. Cette hypothèse non respectée, ajoutée aux problèmes intrinsèques (équivalence et suppression), rendent la technique de sondage électrique, selon la succession des couches, généralement moins efficace pour déterminer l'épaisseur et la résistivité réelles des couches/compartiments du sous-sol de la zone de socle. Un exemple de sondage réalisé en zone de socle du Bénin par un bureau d'études est présenté ci-dessous (Figure 2.9). Des variations brusques de résistivités dans la remontée de la courbe (points encerclés, Figure 2.11a) sont considérées bien souvent comme une marque de présence de fracture. Nous verrons dans la suite de l'étude (aux chapitres 5 et 6), si cette considération est possible et si les modèles géoélectriques issus d'interprétations de sondages électriques représentent suffisamment la structuration du sous-sol en zone de socle.

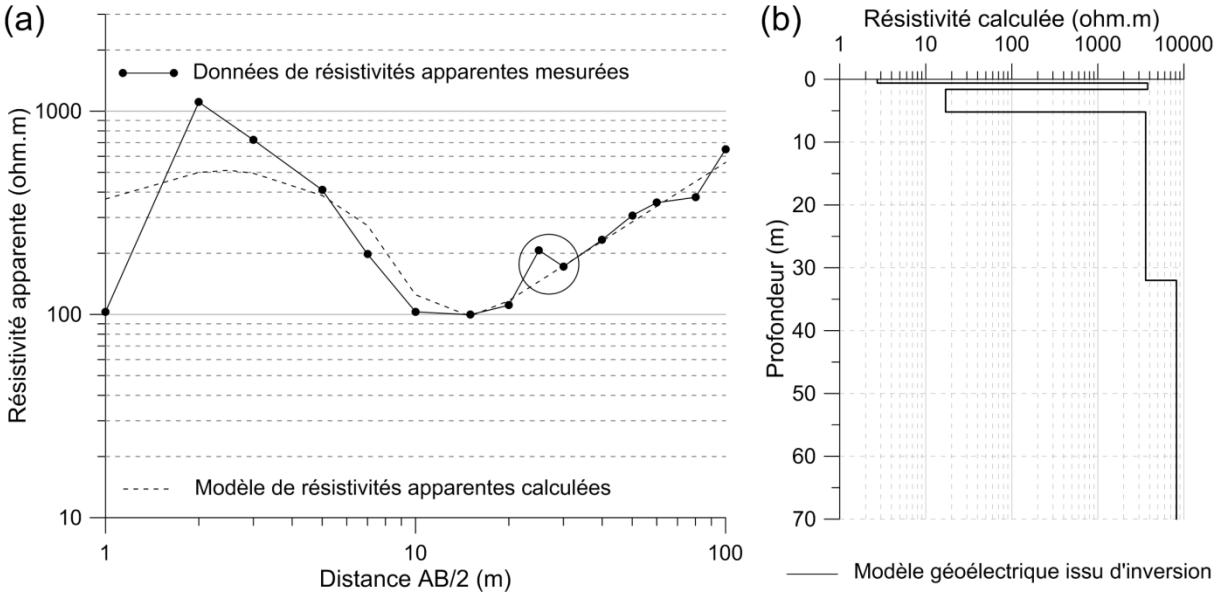


Figure 2.9 – Exemple de résultat de sondage électrique réalisé par un bureau d'études en zone de socle. a) résistivités apparentes mesurées et calculées; b) résistivités et épaisseurs des couches du sous-sol ayant généré les résistivités apparentes calculées : modèle géoélectrique.

2.2.4. Technique plus élaborée 2D de mesure depuis la surface : tomographie de résistivité électrique

Au début des années 1990, les systèmes multi-électrodes ont été développés et les algorithmes capables d'interpréter les données ont été mis au point (Loke *and* Barker, 1996). Cette technique a été utilisée récemment en zone de socle, au nord du Bénin, pour contribuer à l'interprétation de l'évapotranspiration actuelle (Descloitres *et al.*, 2011) et pour la caractérisation des zones d'infiltration (Wubda *et al.*, 2017).

Communément appelé ERT (Electrical Resistivity Tomography), abréviation que nous retiendrons dans ce manuscrit, la tomographie ou imagerie de résistivité électrique (ou TRE dans certaines thèses francophones) est une technique basée sur un système multi-électrodes qui permet de combiner à la fois les profils et sondages électriques. Cette technique permet une acquisition en deux dimensions (2D) de la résistivité apparente électrique du sous-sol (Dahlin, 2001) qui, interprétée, donne une section 2D de résistivité calculée du sous-sol (si l'hypothèse d'une structuration 2D est possible). Le principe consiste à placer, selon un profil, un grand nombre d'électrodes (*e.g.* 24, 48, 72, 96 voire plus) régulièrement espacées (de

quelques centimètres au décamètre en fonction des objectifs de résolution latérale et de pénétration souhaités) et connectées à un câble multi-contacts ou multi-électrodes. Comme pour toutes les mesures électriques, il est crucial d'obtenir un bon contact entre les électrodes et le sol (*i.e* résistance inférieure à 5 ou 10 kohm). Chaque électrode peut être utilisée comme électrode d'émission (A ou B) ou comme électrode de mesure (M ou N), offrant ainsi un grand nombre de possibilités de dispositifs et d'espacements de quadripôles. Le résistivimètre fait donc des mesures quadripôle par quadripôle selon le dispositif choisi (Figure 2.10). Certains appareils multivoies permettent, pour un même dipôle d'injection (AB), de mesurer les différences de potentiels sur plusieurs dipôles (MN) à la fois (à condition d'avoir une électrode en commun entre chaque dipôle MN). Ce type d'acquisition multivoie permet, pour certains dispositifs particuliers, de gagner du temps sur le terrain.

Pour l'acquisition des données, on programme à l'aide d'un ordinateur, la séquence de mesure qui, une fois chargée dans le résistivimètre, sélectionne automatiquement les électrodes utilisées pour l'injection du courant et la mesure du potentiel. Le résistivimètre, suivant la séquence chargée, active ou désactive les contacts du câble connecté aux électrodes. Il reconnait et active les contacts grâce à une adresse numérique unique dans le dispositif. Une fois l'acquisition lancée, le résistivimètre effectuera automatiquement les mesures et les enregistrera.

Pour obtenir la section 2D représentative du sous-sol, il faut une densité conséquente et une répartition ad hoc des points de mesures. Ces deux paramètres varient pour chaque dispositif utilisé. Les points de mesure correspondent à une pseudo-profondeur proportionnelle à la distance séparant les électrodes. Le panneau, la section, ou la tomographie de résistivités apparentes sont constitués de plusieurs niveaux d'acquisition de valeurs de résistivités apparentes. Cette section de résistivités apparentes doit être inversée pour pouvoir obtenir une image de la distribution de la résistivité du sous-sol. Pour cela, on procède à une inversion par méthode itérative, décrite schématiquement dans la Figure 2.11. Cette inversion est basée sur l'hypothèse que la structuration du sous-sol est 2D (c'est la différence avec l'inversion d'un sondage qui fait une hypothèse 1D).

Un modèle de départ homogène (C) est proposé avec une valeur de résistivité correspondant à la moyenne des résistivités apparentes et à partir d'informations a priori entrées par l'utilisateur le cas échéant. L'algorithme calcule la réponse de ce modèle (C) en effectuant un calcul direct qui est le calcul des résistivités apparentes calculées (étape 1). On

obtient alors le jeu de données des résistivités apparentes calculées (B). L'algorithme détermine ensuite le degré de différence entre les résistivités apparentes mesurées (A) et calculées (B) (étape 2). Puis, le modèle (C) est modifié dans le but de diminuer le degré de différence (erreur RMS) entre (A) et (B) (étape 3) et l'opération est répétée de manière itérative jusqu'à ce que l'erreur ne diminue plus de manière significative.

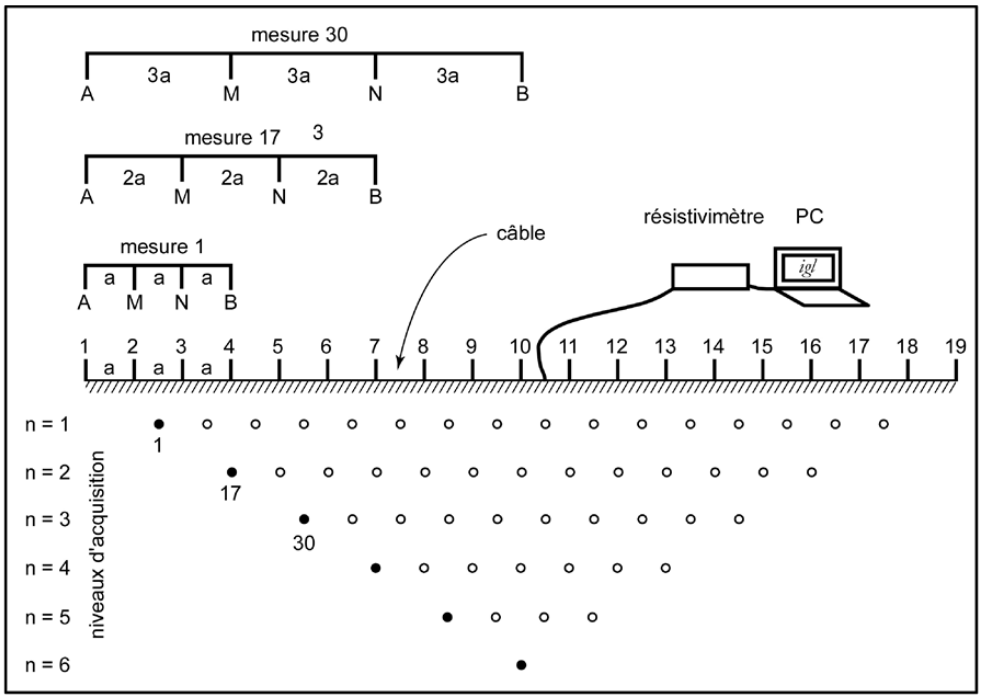


Figure 2.10 – Acquisition des résistivités apparentes en dispositif Wenner (Marescot, 2000).

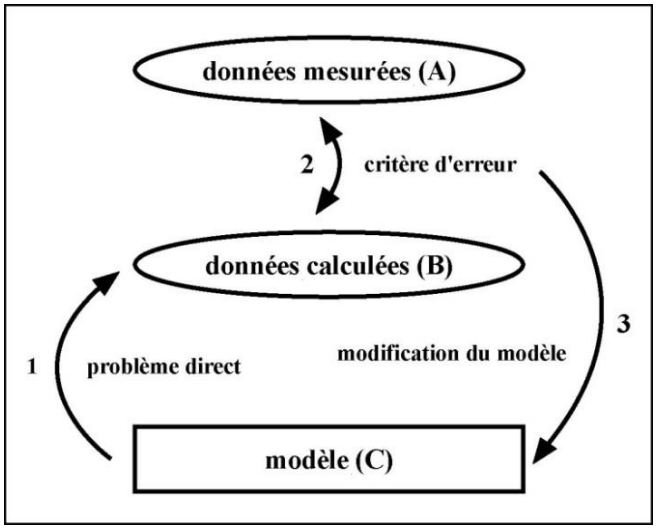


Figure 2.11 – Schéma de l'inversion par méthode itérative (Marescot, 2000).

Le résultat est un modèle 2D de résistivités calculées en fonction de la profondeur, présenté sous forme de section géoélectrique du sous-sol. Mais souvent, le résultat d'une inversion n'est pas unique, les données sources pouvant être entachées d'erreurs. Pour optimiser le résultat, on peut contraindre le processus d'inversion par le moyen de toutes les informations disponibles a priori sur les caractéristiques des structures étudiées.

Les premières solutions d'inversions numériques pour les sections de résistivités 2D ont été présentées par Dey *and* Morrison (1979) et Mufti (1976) en utilisant des techniques de différences finies. Le premier programme d'inversion commercialisé RES2DINV a été créé par Loke *and* Barker (1996), Un autre programme ou logiciel d'inversion plus récent, gratuit, appelé DC2DINV a été créé par Günther (2004). Il offre une manipulation aisée et c'est le logiciel utilisé dans cette étude.

Plusieurs paramètres d'inversion existent pour orienter l'inversion des données de résistivités apparentes mesurées selon le contexte dans lequel on acquiert lesdites données. Par exemple, les paramètres : *Blocky,* pour régler le contraste d'une cellule à l'autre, *Lambda,* pour le lissage de la section (facteur de régularisation), *Z-weight,* pour privilégier la détection de structuration verticale ou horizontale (facteur d'anisotropie), etc. Le concepteur du logiciel DC2D propose un paramétrage par défaut qu'il a retenu après l'avoir appliqué dans plusieurs contextes. Il valide ce paramétrage comme étant le plus adapté pour caractériser un sous-sol dont les dimensions varient aussi bien latéralement que suivant la profondeur (Günther, 2004). Ce paramétrage par défaut a été appliqué pour la présente étude après comparaison des résultats d'inversion avec les informations issues de forages et les valeurs de résistivité issues de diagraphies qui sont les plus proches possibles des résistivités réelles du sous-sol (pour le géophysicien, les valeurs acquises en diagraphie sont des valeurs de référence).

2.2.5. Technique de mesure en forage : diagraphie de résistivité électrique

En 1927, les frères Schlumberger firent la première mesure électrique en forage dans le champ de Pechelbron, en France. Depuis, les diagraphies géophysiques sont devenues une opération classique en exploration pétrolière (Telford *et al.*, 1990), aujourd'hui appliquée à l'hydrogéologie. La diagraphie est un précieux instrument car elle permet de connaître « directement » les valeurs des paramètres physiques « vraies » de la roche en s'affranchissant de possibles incertitudes induites par les mesures depuis la surface.

Le principe de la diagraphie électrique reste le même que celui de la mesure de résistivité en surface sauf que (dans le cas de la diagraphie) la mesure se fait dans un forage, et donc le facteur géométrique K utilisé en diagraphie est celui d'un espace. L'équation 2.6 devient :

$$K = \frac{4.\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \tag{2.12}$$

Il est recommandé pour la diagraphie électrique *(1)* que l'espacement entre les électrodes soit relativement petit afin que les mesures soient représentatives le plus possible de volume de roche homogène et *(2)* que le dispositif de mesure soit le pôle-pôle. Pour cela, les sondes construites pour la diagraphie ont des électrodes espacées classiquement de 16", 32" et 64" (40, 80 et 160 cm) avec le dispositif pôle-pôle (voir Figure 2.4). Ces configurations d'électrodes sont appelées des « normales » (Figure 2.12). Pour la mesure, on descend deux électrodes (situées dans la sonde) dans le forage, A pour l'injection du courant et M pour la mesure du potentiel, alors que les deux autres électrodes, B et N, sont plantées assez loin en surface (elles sont dites « à l'infini »). Pour être considérées à l'infini, B et N doivent être situées à une distance du forage supérieure à 20 fois l'espacement AM du dispositif.

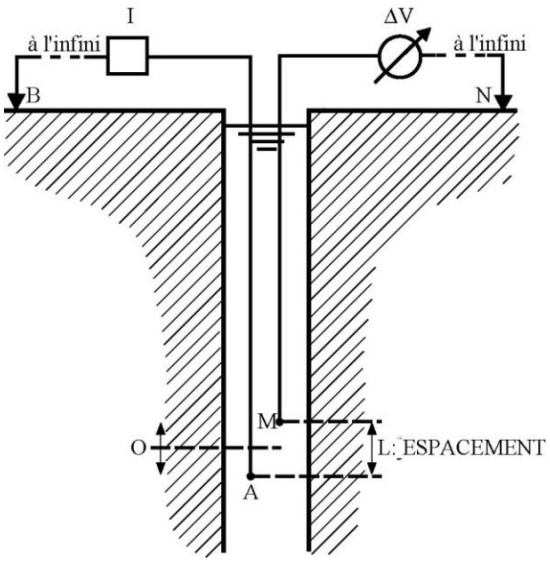


Figure 2.12 – Dispositif de mesure des normales (pôle pôle) (d'après Chapellier, 1987).

Le point de mesure (O) est le centre de AM et la profondeur d'investigation latérale est de l'ordre de 2.AM. Les 3 distances inter-électrodes (40, 80 et 160 cm) donnent

donc trois profondeurs d'investigation latérale croissantes. Il faut noter que lorsque les résistivités sont très contrastées dans un milieu, le courant circule préférentiellement dans le milieu conducteur. Ce phénomène est appelé *effet du trou* quand il se produit lors des mesures de diagraphie, l'eau du forage étant souvent plus conductrice que les roches. Des corrections sont proposées pour prendre en compte ce phénomène (Chapellier, 1987, voir 3.3.2.).

Dans cette étude, des diagraphies ont été réalisées pour obtenir des résistivités "vraies" du sous-sol afin de définir les gammes de résistivité des compartiments du sous-sol, pour vérifier le pouvoir discriminant de la résistivité, et pour interpréter convenablement les valeurs de résistivités inversées par les algorithmes du logiciel d'inversion des données acquises depuis la surface. Cela a été également fait pour le paramètre de chargeabilité électrique que nous présentons ci-dessous.

2.3. Chargeabilité électrique

La chargeabilité électrique est un paramètre qui peut être mesuré par l'équipement de la méthode électrique en mettant en évidence un phénomène appelé *polarisation provoquée*. Nous présentons ce phénomène d'abord afin de définir convenablement la chargeabilité.

2.3.1. Polarisation Provoquée (PP)

Le phénomène de polarisation provoquée (PP) a été constaté et décrit par Conrad Schlumberger vers 1913 (Seigel, 1959; Seigel *et al.*, 2007). Il a remarqué que la différence de potentiel, mesurée entre deux électrodes, ne revenait pas toujours instantanément à zéro lors de la coupure d'un courant électrique initialement appliqué. Il décrit ce phénomène comme la faculté que possèdent certaines roches à se polariser (se charger) sous l'action de la circulation de courant électrique et à se « dépolariser » (se décharger) lorsqu'on coupe brusquement le courant. Physiquement, la polarisation électrique est un phénomène traduisant *les variations de la valeur de la résistivité électrique en fonction de la fréquence utilisée pour la mesurer*. Les paramètres déduits de la mesure faite sur le terrain sont *la chargeabilité totale M* et l'expression de cette dépendance fréquentielle à l'aide d'équations empiriques diverses selon les auteurs. L'équation la plus utilisée est celle de « Cole et Cole » (Cole *and* Cole, 1941) qui contient les coefficients c, m et τ, dits « paramètres Cole-Cole ».

Le phénomène de PP peut être mis en évidence de deux façons :

- en domaine fréquentiel : technique de la « PP spectrale » qui nécessite un appareillage spécial permettant d'injecter des courants de fréquences variables.
- en domaine temporel : technique de la « PP en domaine temporel ». Généralement, les mesures sur le terrain sont acquises dans le domaine temporel (voir Florsch *et al.*, 2012; Gazoty *et al.*, 2012) car l'acquisition est plus rapide à mettre en œuvre, évitant essentiellement les problèmes de couplage. C'est cette technique qui a été utilisée pour la présente étude car elle est compatible avec les résistivimètres classiques moyennant une option technique : pouvoir interrompre automatiquement l'injection de courant et mesurer la décroissance du potentiel électrique, si le terrain est « chargeable ».

La mise en évidence de la PP en domaine temporel utilise le même dispositif à quatre électrodes, comme pour la mesure de la résistivité électrique. Après la coupure du courant, si le milieu est polarisable (chargeable), on observe aux électrodes de potentiel que la tension, au lieu de s'annuler instantanément, décroit rapidement jusqu'à atteindre une valeur Vs puis décroit quasi exponentiellement avec le temps (Figure 2.13). Ce temps de décroissance peut être en général de l'ordre de quelques millisecondes à quelques secondes. Le temps de croissance ou de décroissance peut être comparé au temps de charge et de décharge d'un condensateur via une résistance donnée. La courbe de décroissance n'est pas exponentielle comme dans un circuit RC, et ne commence pas à la valeur maximale du potentiel.

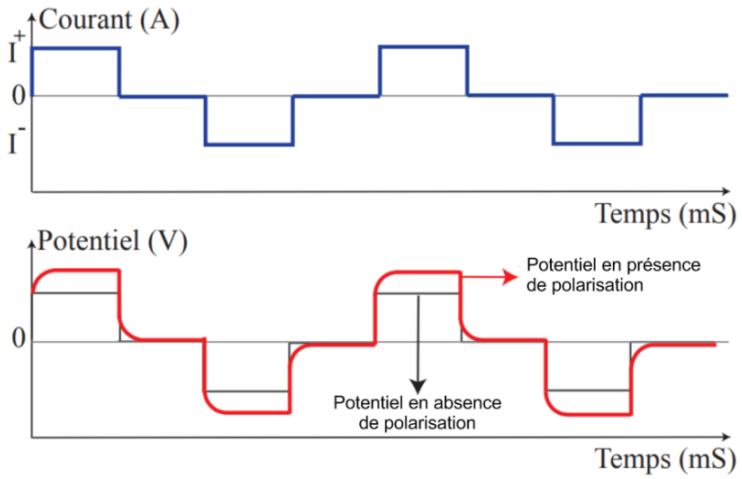


Figure 2.13 – Polarisation Provoquée temporelle : séquence d'injection de courant (en haut) et potentiel enregistré (en bas), dans un milieu polarisable (en rouge), et dans un milieu non polarisable (en noir) (Abdul Samad, 2017).

L'origine du phénomène peut être décrite comme une accumulation d'énergie principalement liée à la chimie de la solution d'imbibition. Cette accumulation d'énergie peut provenir : *(1)* de variations de mobilité des ions dans les fluides à travers la roche, *(2)* de variations entre la conductibilité ionique et la conductibilité électronique lorsqu'il y a des minéraux métalliques en présence. Le premier type de variations est appelé *polarisation de membrane* ou *polarisation électrolytique* et constitue la polarisation fondamentale ou *polarisation normale*. Elle apparait dans les roches qui ne contiennent pas de minéraux métalliques. Le second type de variations, connu sous le nom de *polarisation d'électrodes* ou *surtension*, est en général plus important que la polarisation normale si certains facteurs sont réunis, particulièrement la présence de particules métalliques disséminées dans la roche.

Polarisation de membrane

Dans la plupart des minéraux, il y a une charge négative à l'interface située entre la roche et le liquide interstitiel. Il en résulte que les ions positifs sont attirés par l'interface qui repousse les ions négatifs ; cette concentration des ions positifs peut s'étendre, dans le liquide, jusqu'à une profondeur de 10^{-6} cm environ (Figure 2.14a). Si la taille du pore est du même ordre, les ions négatifs s'accumuleront à l'une des extrémités de la zone, et quitteront l'autre par l'application d'une tension continue. C'est ce qu'on appelle la polarisation de membrane. Après interruption du courant, les ions retournent à leur position initiale dans un temps déterminé (Figure 2.14b) : c'est ce repositionnement des ions qui génère le potentiel mesuré (la décharge) et qui s'illustre par la décroissance de la tension électrique.

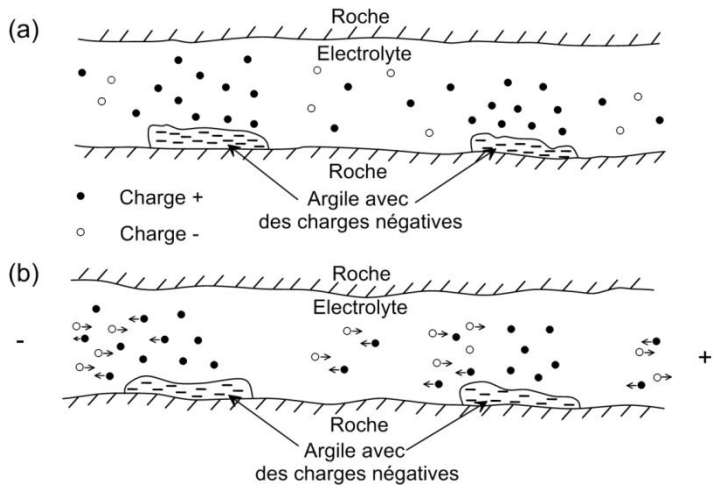


Figure 2.14 – a) distribution normale des ions dans un grès poreux ; b) polarisation de membrane due à l'application d'une tension continue (inspiré de Telford *et al.*, 1990).

Polarisation d'électrode

De principe semblable à celui de la polarisation de membrane, ce type de polarisation existe lorsque des minéraux métalliques sont présents dans la roche et que le courant a une origine en partie, électronique et en partie électrolytique. Une réaction chimique a lieu à l'interface entre le minéral et la solution. Considérons les deux passages poreux d'une roche représentée par la figure 2.15. La présence de minéraux métalliques, portant des charges superficielles de signes opposées aux deux extrémités, provoque une accumulation d'ions dans l'électrolyte, au voisinage de ces extrémités. Le résultat est celui d'une électrolyse où lorsque le courant passe, il y a échange d'électrons entre le métal et les ions de la solution à l'interface. Comme pour la polarisation de membrane, lorsque le courant est coupé, la tension résiduelle décroît au fur et à mesure que les ions retournent à leur état d'équilibre initial. L'amplitude de cette polarisation d'électrodes varie avec la concentration en minerai mais, comme c'est un phénomène de surface, elle sera plus grande lorsque le minerai est disséminé que lorsqu'il est compact.

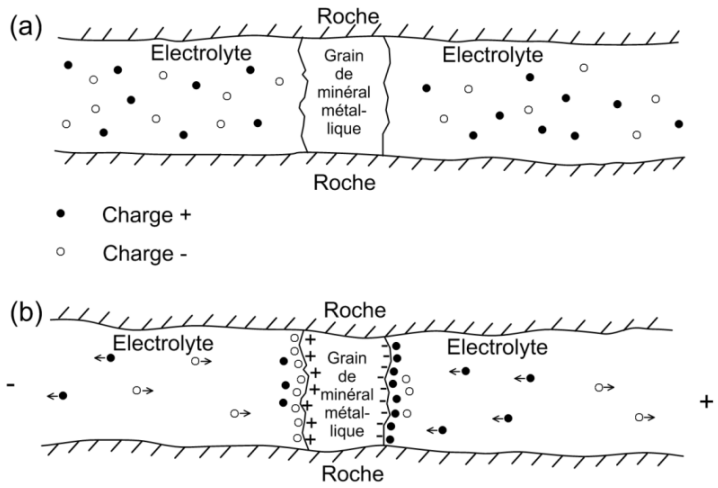


Figure 2.15 – a) distribution normale des ions autour d'un minéral métallique; b) polarisation d'électrodes due à l'application d'une tension continue (inspiré de Telford *et al.*, 1990).

2.3.2. Définition de la chargeabilité

La chargeabilité déduite de la polarisation provoquée, quantifie une somme de polarisation de membrane et de polarisation d'électrode. Seigel (1959) introduit la notion de chargeabilité *m* pour décrire la polarisation du milieu en utilisant le potentiel secondaire ou

résiduel Vs (milliVolt - mV) mesuré après la coupure du courant injecté et la tension première Vp (Volt - V) mesurée avant la coupure. La chargeabilité s'exprime en mV/V et est définie par l'équation ci-dessous :

$$m = \frac{V_s}{V_p} \tag{2.13}$$

En théorie, Vs devrait être mesurée à temps-zéro de coupure de courant, mais c'est difficile à réaliser à cause de l'appareil de mesure qui est lié au signal transitoire généré dans l'appareil de mesure au moment de la coupure de courant. Dans la pratique, les mesures de potentiel secondaire commencent après un temps donnée, appelé M*dly* (*The Delay time* en anglais). Par exemple, avec l'équipement du Syscal Pro que nous avons utilisé, les mesures commencent 20 ms après la coupure de courant. Cette difficulté a conduit avec la pratique, à considérer une autre grandeur. Elle correspond à l'intégrale du signal sous la courbe de décroissance traduisant ainsi l'intensité du phénomène de polarisation, c'est la *chargeabilité totale*. C'est cette chargeabilité qui a été utilisé pour la présente étude.

2.4. Mesure de la chargeabilité totale et des paramètres Cole-Cole dérivés de la courbe de décharge

2.4.1. Chargeabilité totale

Pour obtenir la chargeabilité totale, les appareils (résistivimètres) actuels (comme le Syscal Pro) procèdent généralement suivant deux étapes. Premièrement, les appareils mesurent des *chargeabilités partielles* M_i correspondant, chacune à l'intégrale par rapport au temps de la tension résiduelle *V(t)* mesurée à un temps *t* choisi après l'interruption du courant, par rapport à la tension *Vp (ou* V_{MN}*)* qui s'est établie lors du passage du courant (avant la coupure de courant). Elle est illustrée par la figure 2.16 et définie par :

$$M_i = \int_{TM_i} V dt / TM_i \,.\, V_{MN} \tag{2.14}$$

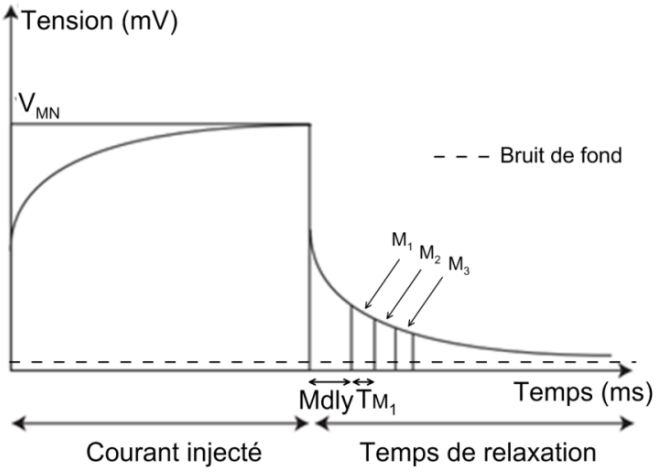


Figure 2.16 – Mesures de plusieurs chargeabilités partielles pour différents intervalles de temps donnés (d'après le manuel d'utilisation du Syscal Pro).

V(t) doit être mesurée avant que la tension résiduelle ait atteint le niveau de bruit de fond. L'intervalle de temps *t* considéré peut varier de 0,1 à 10 secondes. Si cet intervalle de mesure est très petit et si la courbe de décroissance est représentée par plusieurs points (« fenêtres » de mesure), les valeurs obtenues correspondent effectivement à des mesures de potentiels existant aux différents instants (t_1, t_2, …, t_n, soient $V(t_1)$, $V(t_2)$, ..., $V(t_n)$. Si le nombre de fenêtres de mesure est important (20 par exemple, comme avec le Syscal Pro), on obtient l'allure de la décroissance (important pour la détermination des paramètres Cole-Cole).

Deuxièmement, la chargeabilité totale (M) est calculée grâce à l'équation suivante :

$$M = \sum_{i=1}^{n} (M_i . TM_i) / \sum_{i=1}^{n} TM_i \qquad (2.15)$$

avec : M = chargeabilité totale (mV/V) ; n = nombre de fenêtres de temps de mesure PP ; TMi = longueur de temps la fenêtre de chargeabilité partielle "i".

En présence de minéraux argileux, la décharge (décroissance) induite par la polarisation de membrane est *potentiellement* plus importante. Cependant, l'amplitude de la chargeabilité totale *n'augmenterait pas forcément régulièrement* avec la concentration en

minéraux argileux, mais atteindrait un maximum puis décroîtrait. Si la quantité de minéraux argileux augmente, les surfaces de contact entre ceux-ci augmentent, et cela diminue les surfaces libres en contact avec l'électrolyte. La concentration optimale varie avec différents types d'argiles ; elle est, par exemple, faible dans la montmorillonite et plus forte dans la kaolinite. Les schistes ayant un fort pourcentage de minéraux argileux, ont une polarisation relativement faible (Pelton *et al.*, 1978).

En résumé, la chargeabilité totale induite par la polarisation de membrane serait maximale dans une roche où les minéraux argileux sont disséminés, avec une concentration plutôt faible (≤ 10 %) et un électrolyte de faible salinité (Pelton *et al.*, 1978). Dans notre zone d'étude, on espère que la chargeabilité totale peut traduire des variations de propriétés du sous-sol liées à la teneur en argile et à son degré de dissémination.

2.4.2. Paramètres Cole-Cole

Si la chargeabilité totale M correspond à l'intégrale du signal mesuré, ce n'est pas le seul paramètre que l'on peut déduire de la courbe de décharge : Pelton *et al.* (1978) montrent que la forme de la courbe de décroissance peut être analysée en utilisant une équation adaptée, proposée par Cole *and* Cole (1941) et qui s'exprime par l'équation suivante qui représente le modèle de relaxation de la permittivité complexe en domaine fréquentiel :

$$Z(\omega) = R_0\left[1 - m\left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c}\right)\right] \tag{2.16}$$

avec : $Z(\omega)$ = impédance (ohm), R_0 = résistance (ohm), c = dépendance fréquentielle (sans unité), m = chargeabilité Cole-Cole (sans unité), τ = constante de temps (s).

c, *m* et τ représentent les paramètres Cole-Cole.

- La chargeabilité Cole-Cole *m* calculée, correspondrait en théorie à la tension résiduelle qui serait mesurée immédiatement après la coupure d'un courant injecté depuis un temps infiniment long. *m* varie entre 0 et 1. *M* qui représente la chargeabilité totale (intégrale sous la courbe de décroissance) est donc différent de la chargeabilité Cole-Cole *m*. Elle est sans unité.

- La dépendance fréquentielle c contrôle la forme (la courbure) de la décroissance (en représentation log-log). Elle est physiquement liée à la distribution de la taille des particules. D'une façon pratique, pour une distribution de taille très large, c = 0,1 et si la distribution est très étroite, c = 0,6. La plupart des auteurs proposent des valeurs de c comprises entre 0,1 et 0,3. c est sans unité.
- La constante de temps τ détermine le taux de décroissance de la tension résiduelle. τ s'accroit avec la taille des grains responsables de la polarisation, cette croissance serait proportionnelle au carré de la taille des grains. En pratique, τ peut varier de quelques millisecondes à plusieurs centaines de secondes. τ s'exprime donc en unité de temps.

Les paramètres Cole-Cole pourraient donc nous apporter des informations sur la taille des grains et leur distribution. En les déduisant de l'équation 2.16 on a :

$$c = \frac{\ln \frac{R_o}{m}}{\ln \frac{c}{X}} \tag{2.17}$$

$$m = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_0}} \tag{2.18}$$

$$\tau = X \left(\frac{R_0}{m}\right)^{\frac{1}{c}} \tag{2.19}$$

Les techniques de mesures de la chargeabilité en surface comme en forage sont pareilles que celles de la résistivité électrique. Mais aucune mesure de chargeabilité n'a été faite pour l'implantation de forage au Bénin à notre connaissance. Nous n'avons donc pas d'exemple de résultats de bureaux d'études à présenter ici.

Conclusion partielle

En plus des paramètres résistivité électrique et chargeabilité électrique, les techniques de mesure en surface traditionnelles (à une dimension - 1D) et celle plus élaborée (à deux dimensions – 2D) ainsi que celle de mesure en forage (diagraphie), ont été présentées dans ce chapitre. Pour l'implantation de forage, la méthode électrique est largement la plus pratiquée à

travers l'application des techniques traditionnelles de mesures depuis la surface. La mesure des paramètres est cependant soumise aussi à des incertitudes liées aux dispositifs d'acquisition, au processus d'interprétation et à des limites intrinsèques que sont l'équivalence et la suppression. En conclusion, le géophysicien devra intégrer toutes ces sources d'incertitudes et croiser ses résultats avec d'autres informations issues de la géologie, et de la topographie pour une interprétation plus étayée. Mais avant, dans le chapitre qui va suivre, il sera question d'évaluer la sensibilité de la résistivité et de la chargeabilité électrique à la cible hydrogéologique, et ceci en utilisant la technique de la diagraphie pour s'affranchir des incertitudes liées aux mesures depuis la surface afin de baser notre vérification sur des valeurs « vraies ».

Chapitre 3

Evaluation de la sensibilité de la résistivité et de la chargeabilité à la cible hydrogéologique

Introduction

Si la résistivité a longtemps été utilisée pour l'implantation des forages dans le monde, la chargeabilité elle n'a été utilisée que très rarement. Pour l'hydrogéologie, quelques applications de la mesure de chargeabilité via la Polarisation Provoquée (PP) ont été réalisées en laboratoire depuis les années 2000 seulement (*e.g.* Binley *and* Kemma, 2005; Joseph *et al.*, 2015; Koch *et al.*, 2011; Revil *et al.*, 2015; Scott *and* Barker, 2003; Slater *and* Lesmes, 2002; Titov *et al.*, 2010). L'intérêt de la chargeabilité est d'apporter des informations supplémentaires aux données de résistivité électrique, notamment en matière d'argilosité et de degrés de fracturation des roches (Abdul Samad, 2017). Evaluer l'intérêt de la chargeabilité qui serait donc *liée à la présence d'argile*, dans le but d'enrichir la connaissance des compartiments hydrogéologiques en zone de socle est alors réel lorsqu'on considère que la mesure peut se faire parallèlement avec le même appareillage que celui de la mesure de la résistivité électrique (Rubin *and* Hubbard, 2006).

L'objet de ce chapitre est d'évaluer la sensibilité des paramètres « résistivité et chargeabilité électrique » à la cible hydrogéologique afin de l'identifier (caractériser géométriquement) dans un contexte de socle en milieu tropical (*i.e.* à altération épaisse comme celle du Bénin). Pour cette vérification, la condition sine qua non est de connaitre les valeurs de résistivité et de chargeabilité « vraies » des différents compartiments hydrogéologiques afin de vérifier si ces valeurs sont discriminantes d'un compartiment à l'autre en les comparant à des informations « références » du sous-sol, telles que la lithologie et d'autres informations obtenues par le foreur lors de la réalisation du forage. Le moyen qui permet d'obtenir les résistivités et chargeabilités « vraies » du sous-sol, les plus proches possible de la réalité est la diagraphie, en faisant l'hypothèse que la région proche des électrodes est homogène. A partir de ces comparaisons, les gammes de valeurs des deux paramètres sont définies pour chaque compartiment et comparées entre paramètres.

3.1. Méthodologie mise en œuvre

Pour évaluer la sensibilité des paramètres, la méthodologie suivante a été adoptée:

- sélection de sites d'étude représentatifs de la majorité des formations géologiques de la zone de socle du Bénin ;
- obtention des valeurs de résistivité et de chargeabilité « vraies » du sous-sol des différentes formations géologiques en réalisant des diagraphies dans des forages sur chacun des sites sélectionnés ;
- collecte des informations issues du forage (profondeur forée par outil de foration et lithologie) et du foreur (profondeur des venues d'eau et fractures sèches) ;
- comparaison du comportement des logs de résistivité et de chargeabilité (valeurs de résistivité suivant la profondeur) aux informations issues du forage et du foreur ;
- indentification des parties des logs de résistivité et de chargeabilité appartenant à chaque compartiment hydrogéologique ;
- déduction des gammes de valeurs de résistivité et de chargeabilité pour chaque compartiment sur chaque site et évaluation de leur potentiel de discrimination ;
- définition éventuelle des gammes de résistivité et de chargeabilité discriminantes pour chaque compartiment en considérant l'ensemble des roches de socle représentées par les sites investigués.

3.2. Sites d'étude sélectionnés

3.2.1. Choix et présentation des sites

Les travaux ont été réalisés sur les 6 sites déjà présentés dans le chapitre 1 pour la définition de la cible hydrogéologique à l'échelle du site (Figure 3.1). Pour rappel, les sites ont été sélectionnés de l'Ouest à l'Est afin d'investiguer la majorité des formations puisque ces dernières sont orientées en moyenne 20°N.

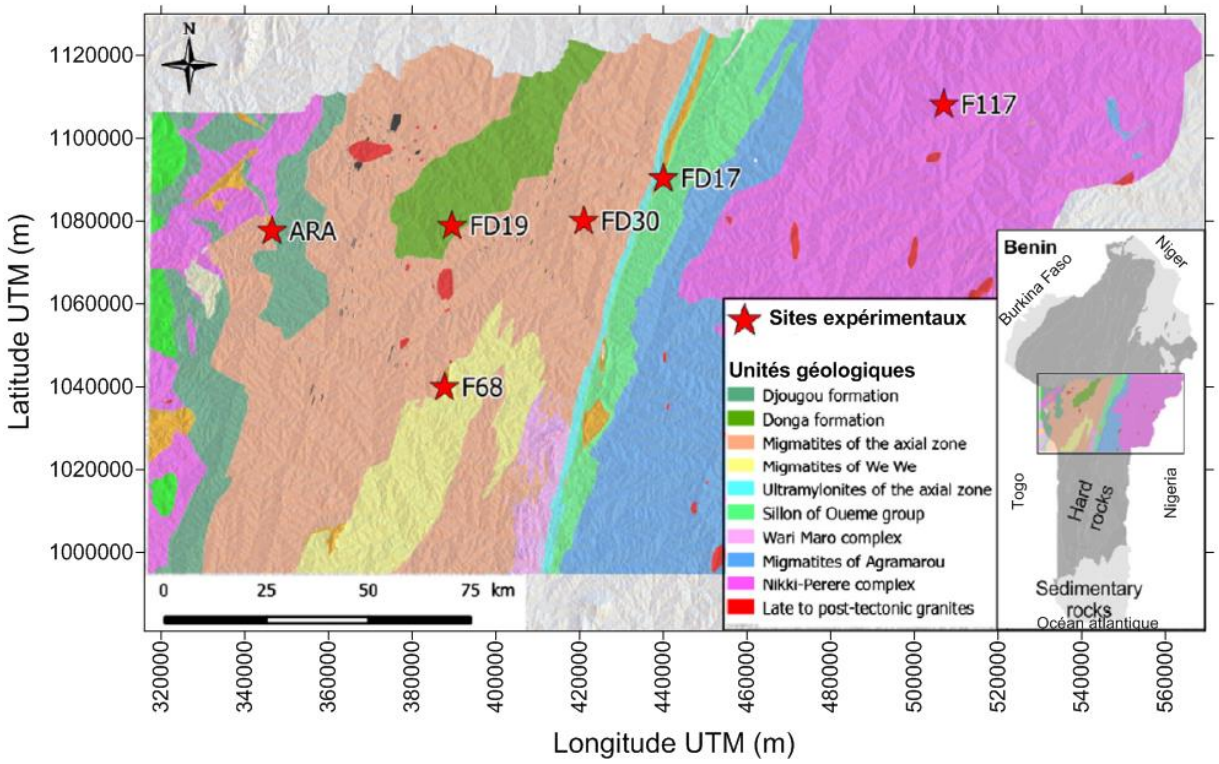


Figure 3.1 – Situation de la zone d'étude et carte géologique simplifiée (Vouillamoz et al., 2014).

Pour que la sensibilité des paramètres géophysiques soit évaluée pour une part significative de la zone de socle du Bénin, il est nécessaire que les sites expérimentaux soient représentatifs de la zone de socle du Bénin à travers les formations géologiques principales. Le tableau 3.1 présente les différentes unités géologiques et les roches rencontrées sur chaque site.

Tableau 3.1 – Formation géologiques et roches rencontrées sur chaque site (Vouillamoz *et al.*, 2014).

Site expérimental	Unités géologiques (source : carte géologique)	Roches rencontrées (source : forage)
ARA	Formation de Djougou	Micaschistes
FD19	Formation de la Donga	Gneiss
F68	Migmatites de Wèwè	Gneiss migmatitique
FD30	Migmatites de la zone axiale	Gneiss migmatitique
FD17	Sillon du groupe de l'Ouémé	Gneiss
F117	Complexe de Nikki Pèrèrè	Granite

3.2.2. Equipement des sites

Comme présenté brièvement au chapitre 1, sur chaque site il existe un Forage en Exploitation (FE). Trois autres forages alignés, deux profonds captant la ZFS, et un superficiel captant la ZA et situé entre les deux profonds, ont été réalisés par le projet GRIBA à des fins de recherche (essai de pompage, traçage, suivi du niveau, de la température et de la conductivité de la nappe, et diagraphies géophysiques). Ils sont séparés l'un de l'autre de cinq à une dizaine de mètres environ selon les sites. Comme l'illustre la figure 3.2, un des deux forages profonds (noté « P1 » pour « Piézomètre 1 ») est situé sur la perpendiculaire à la ligne des 3 forages réalisés passant par le forage en exploitation. Le deuxième forage profond est P2 et le forage superficiel est P3. Cette disposition des forages et leur profondeur, sont guidées par les impératifs des essais de pompage (surtout de longue durée) pour déterminer une éventuelle anisotropie de la porosité de drainage, et pour vérifier l'existence d'une connexion entre la ZA et la ZFS et aussi entre les deux ZFS captées par les deux forages/piézomètres profonds.

Figure 3.2 – Présentation de la disposition des piézomètres et du forage en exploitation sur chaque site : exemple du site FD17.

3.3. Acquisition et traitement des données de diagraphie

3.3.1. Protocole commun à l'acquisition des données des deux paramètres

Les diagraphies ont été réalisées dans chacun des trois piézomètres des 6 sites expérimentaux. Pour réaliser ces mesures de diagraphie, un câble multi-électrode ou flûte de 20 électrodes a été construit avec des espacements inter-électrodes de 80 cm (32"). Le dispositif de mesure est le pôle-pôle, défini en 2.2.2.

Le choix de l'espacement inter-électrodes de 80 cm s'est imposé car :

- un espacement inter-électrodes de 40 cm (16") aurait diminué la profondeur latérale d'investigation et donnerait des valeurs plus affectées par le fluide de forage ;
- un espacement inter-électrodes de 160 cm (64") donnerait des valeurs représentatives de terrain moins homogènes.

L'espacement de 80 cm permet de trouver un compromis entre la profondeur latérale d'investigation et la couverture verticale de la flûte. Possédant un câble électrique de 20 fils conducteurs, nous avons pu fabriquer une flûte de 20 sorties (électrodes) ayant 15,2 m de long pour 80 cm d'espacement au lieu de 7,6 m et 30,4 m de long respectivement pour 40 et 160 cm d'espacement inter-électrodes.

Le choix du dispositif Pôle-Pôle car :

- il bénéficie de la plus grande couverture verticale et de la plus grande profondeur latérale d'investigation ;
- c'est le même dispositif que celui des sondes de mesure dites « normales ».

L'acquisition a été faite comme on peut le voir sur la figure 3.3. Le câble multi-électrode construit a été branché au résistivimètre (Syscal Pro de IRIS INSTRUMENTS) via un boîtier de commutation. La sortie de chaque fil conducteur de la flûte (du premier au dernier) est connectée aux ports numérotés sur le boitier de commutation. Les mesures ont été faites avec une séquence de mesures programmées comme en ERT, mais uniquement avec le premier niveau de pseudo-profondeur (2 x AM = 160 cm, Figure 3.4), afin de concentrer les lignes de courants dans de petits volumes de terrains supposés homogènes.

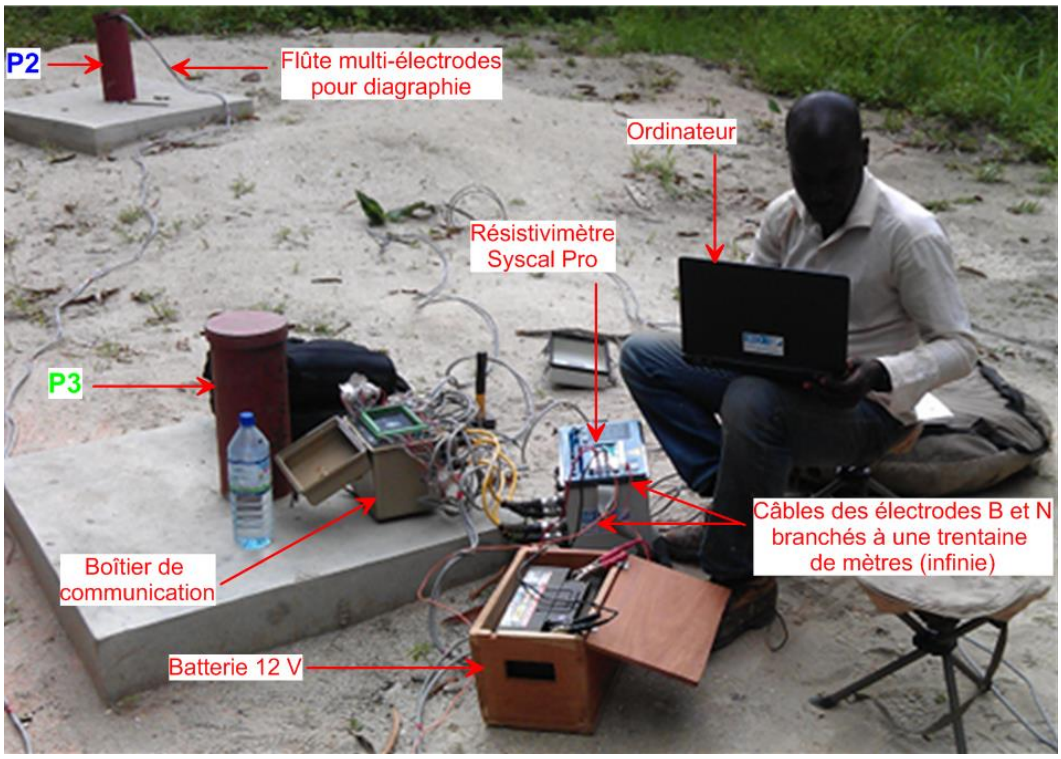


Figure 3.3 – Mise en œuvre de la diagraphie de résistivité électrique : exemple du Site F68, piézomètre P2.

Un voltage de 25 à 100 V selon les sites a été imposé pour l'injection du courant afin d'éviter d'enregistrer des différences de potentiel trop élevées pour le résistivimètre. La présence de l'eau dans le forage étant la condition sine qua non pour le contact électrode - roche, nous avons été contraints de limiter nos mesures au niveau statique qui est relativement proche de la surface. Les forages profonds sont « crépinés » sur toute l'épaisseur forée au marteau fond de trou *i.e.* la ZFS et le SS (dans certains cas), et le forage superficiel est crépiné seulement dans la ZA. Les mesures ont donc été faites dans les parties crépinées uniquement car les parties en PVC plein empêchent la circulation des lignes de courant dans le sous-sol. Considérant la longueur de la flûte et l'épaisseur des parties crépinées, plusieurs acquisitions successives ont été faites, de la base au sommet des crépines, en remontant à chaque fois le câble de 14,4 m afin d'avoir une mesure répétée sur deux acquisitions successives pour s'assurer du recouvrement de ces dernières. La figure 3.4 présente le protocole d'acquisition des données avec la séquence de mesure pour le forage P1 du site F68 dont la base des crépines est à 64,6 m et le toit est à 29 m, sachant que le niveau statique est plus haut que le toit des crépines.

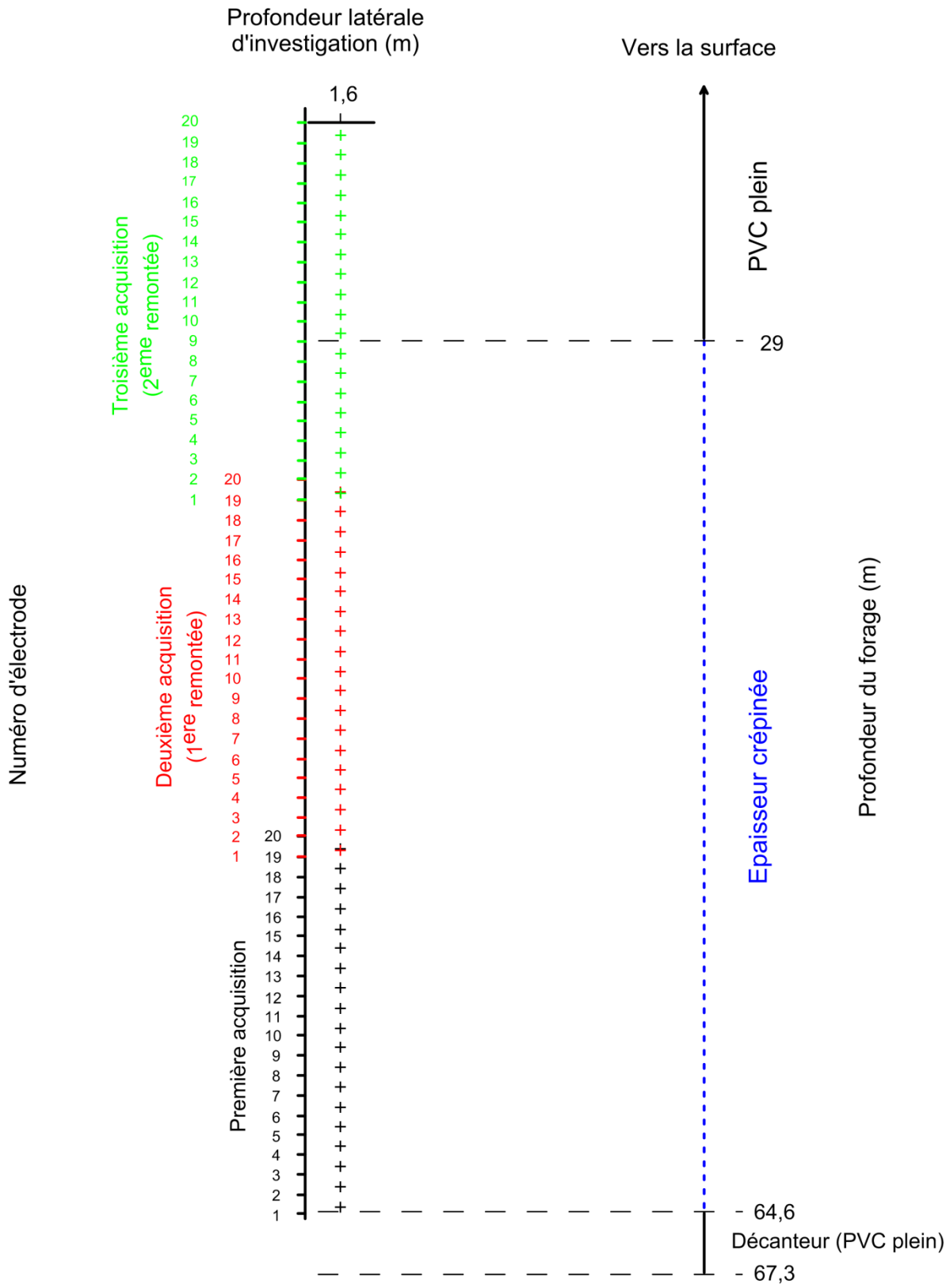


Figure 3.4 – Schéma descriptif du protocole d'acquisition avec le dispositif pôle-pôle pour le piézomètre P1 du site F68.

3.3.2. Précautions pour l'acquisition des données de chargeabilité

Les mesures de chargeabilité sont faites dans cette étude en raison de leur possible relation avec les minéraux argileux et la taille des grains. Seule la polarisation de membrane est liée à la présence de minéraux argileux ; or, les électrodes métalliques classiques (en acier inoxydable) implantées dans le sol en surface pour la diagraphie (B et N) peuvent, au passage du courant, se polariser et donc créer une polarisation d'électrode, tout comme les sorties métalliques (électrodes) de la flûte de diagraphie dans le forage. Des précautions ont donc été prises dans l'acquisition des données pour éviter la polarisation due aux électrodes. Nous avons utilisé des électrodes impolarisables (Figure 3.5) pour réaliser des mesures afin de comparer ces mesures à celles faites avec les électrodes classiques. Ne pouvant mettre les électrodes impolarisables à l'intérieur du forage pour la vérification de l' « impolarisabilité » des sorties des flûtes, nous avons fait l'expérience en surface. Cette comparaison a permis de vérifier s'il existe une différence entre les mesures avec les électrodes impolarisables et celles avec les électrodes classiques afin de valider l'utilisation des électrodes classiques. L'« impolarisabilité » des électrodes classiques, nous a rassuré quant à l' « impolarisabilité » des sorties de la flûte de diagraphie, étant donné que les métaux utilisés sont pareils.

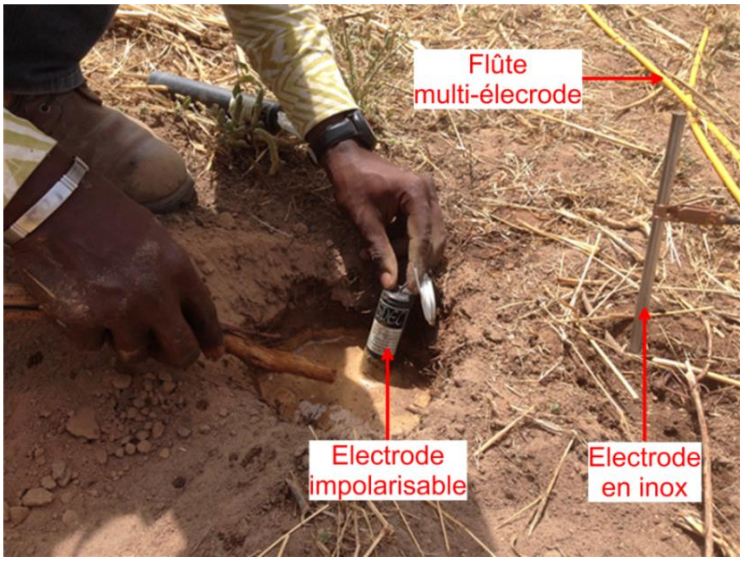


Figure 3.5 – Mesure de chargeabilité avec une électrode impolarisable (Site FD19).

Après le déchargement des données de résistivité et de chargeabilité du résistivimètre vers l'ordinateur, elles ont été analysées avec le logiciel ProsysII pour s'assurer de l'absence de valeur de saturation de l'appareil.

3.3.3. Traitement des données de résistivité

Correction du coefficient géométrique K

Le résistivimètre est programmé pour calculer des valeurs de K en considérant un demi-espace (mesure en surface). Alors, les valeurs de résistivités mesurées sont doublées pour prendre en compte la valeur de K correspondant à un espace complet. Après la correction de K, une deuxième correction est apportée.

Correction de l'effet du trou

En zone de socle, les contrastes sont souvent très élevés entre la résistivité de l'eau remplissant le trou du forage et celle des roches. Pour l'ensemble des six sites, l'eau a une résistivité moyenne de 70 ohm.m environ et, de la ZFS au SS les résistivités varient entre 300 et 10.000 ohm.m. Les lignes de courant se concentrent donc dans l'eau présente dans le forage et ne pénètrent qu'en partie dans le milieu résistant (la roche). Le phénomène qui se produit en ce moment est appelé « mise à la masse » aussi appelé, dans le cas d'un forage, « effet du trou ». Cet effet se doit d'être pris en compte dans les corrections apportées aux données. Il s'agit ici de corriger les valeurs de résistivités apparentes mesurées et corrigées de K, pour les transformer en résistivités de la formation. Ces corrections permettent de se rapprocher de la situation où les électrodes seraient directement plantées dans les parois du forage (dans la roche). Elles sont très importantes dans le traitement des données de diagraphie, mais fréquemment négligées dans les études classiques. Ces corrections sont faites, pour le dispositif pôle-pôle, à l'aide de l'abaque Schlumberger de 1947 reproduit par Beck *and* Girardet (2002) (Annexe 1).

Afin d'automatiser les corrections, nous avons utilisé les équations établies par Beck *and* Girardet (2002) qui, en fonction du rapport de l'espacement inter-électrode (AM) sur le diamètre du forage (d) et du rapport de la résistivité apparente mesurée corrigée de K (Ra) sur la résistivité de l'eau du forage (Rw), calculent la résistivité corrigée qui est celle de la roche en présence (Rt). Pour AM = 80 cm (espacement inter-électrode) voici les équations de correction :

$$Si\ \frac{R_a}{R_w} \leq 80 \qquad (3.1)$$

$$\log(\frac{R_t}{R_w}) = 3{,}9499.10^{-2}.\log(\frac{R_a}{R_w})^3 - 8{,}5675\,.10^{-2}.\log(\frac{R_a}{R_w})^2 + 9{,}4443.10^{-1}.\log(\frac{R_a}{R_w})$$

$$Si\ \frac{R_a}{R_w} > 115 \qquad (3.2)$$

$$\frac{R_t}{R_w} = -6{,}8790.10^{-8}.(\frac{R_a}{R_w})^3 + 8{,}8294\,.10^{-4}.(\frac{R_a}{R_w})^2 + 5{,}9961.10^{-1}.(\frac{R_a}{R_w})$$

$$Si\ 80 < \frac{R_a}{R_w} < 115 \qquad (3.3)$$

$$\frac{R_t}{R_w} = \text{moyenne arithmétique des équations 3.1 et 3.2}$$

Toutes ces équations sont regroupées dans un tableur Excel, où les valeurs de résistivités apparentes et les valeurs de la résistivité du fluide sont rentrées pour obtenir les valeurs Rt corrigées. Dès que ces corrections (K et effet du trou) sont apportées aux données, ces dernières sont considérées comme étant des valeurs de résistivités « vraies » car ayant été acquises dans des terrains certainement homogènes. Le tableau 3.2 présente, en exemple, les valeurs de résistivités mesurées et les corrections apportées pour le piézomètre P1 du site F68.

Tableau 3.2 – Données de diagraphie de résistivités mesurées et corrigées de F68-P1.

Profondeur (m)	Résistivité mesurée (ohm.m)	Résistivité corrigée de K (ohm.m)	Résistivité corrigée de l'effet du trou (ohm.m)
29,00	411,68	823,36	638,87
29,8	176,11	352,22	300,73
30,6	244,54	489,08	401,86
31,4	309,8	619,6	495,62
32,2	317,73	635,46	506,89
33	176,15	352,3	300,79
33,8	115,05	230,1	206,40
34,6	130,58	261,16	230,90
35,4	311,26	622,52	497,70
36,2	437,7	875,4	675,04
37	325,01	650,02	517,21
37,8	586,99	1173,98	880,74
38,6	939,75	1879,5	1362,71
39,4	1040,1	2080,2	1500,12
40,2	1376,3	2752,6	1964,20

41	1404	2808	2002,75
41,8	1450,6	2901,2	2067,72
42,6	998,28	1996,56	1442,81
43,4	299,87	599,74	481,48
44,2	680,79	1361,58	1009,07
45	1512	3024	2153,57
45,8	1282,4	2564,8	1833,91
46,6	1292,8	2585,6	1848,31
47,4	1809,8	3619,6	2574,01
48,2	2098,2	4196,4	2988,05
49	1072,3	2144,6	1544,31
49,8	2261,2	4522,4	3225,20
50,6	2535,8	5071,6	3629,97
51,4	2503,3	5006,6	3581,72
52,2	2690,9	5381,8	3861,56
53	2549,8	5099,6	3650,79
53,8	2506,9	5013,8	3587,06
54,6	2547,7	5095,4	3647,66
55,4	1439,3	2878,6	2051,95
56,2	2412,8	4825,6	3447,84
57	2573,6	5147,2	3686,21
57,8	2432,2	4864,4	3476,48
58,6	2574,8	5149,6	3688,00
59,4	2356,2	4712,4	3364,48
60,2	2415,6	4831,2	3451,97
61	2363,1	4726,2	3374,63
61,8	1460,6	2921,2	2081,69
62,6	2303,9	4607,8	3287,70
63,4	2602,6	5205,2	3729,45
64,2	3171,3	6342,6	4455,23
65	3975,2	7950,4	5574,51
65,8	4041,6	8083,2	5681,21

3.3.4. Traitement des données de chargeabilité

Validation des données : vérification de l' « impolarisabilité » des électrodes

Pour valider les mesures, un exemple de comparaison, considéré comme représentatif de l'ensemble des courbes de polarisation obtenues, est présenté ici (Figure 3.6). Les courbes de chargeabilité totale sont identiques (même amplitudes, même temps de décroissance et même forme) ; les valeurs de la chargeabilité totale M sont les mêmes (11.67 et 11.65 mV/V) ainsi que les valeurs de potentiel V_c (162 et 163 mV). On conclut que les électrodes

en inox de haute qualité ne sont pas polarisables dans les terrains de nos sites. On ne saurait généraliser ce résultat à toutes les autres électrodes en inox, ni aux autres types de terrains.

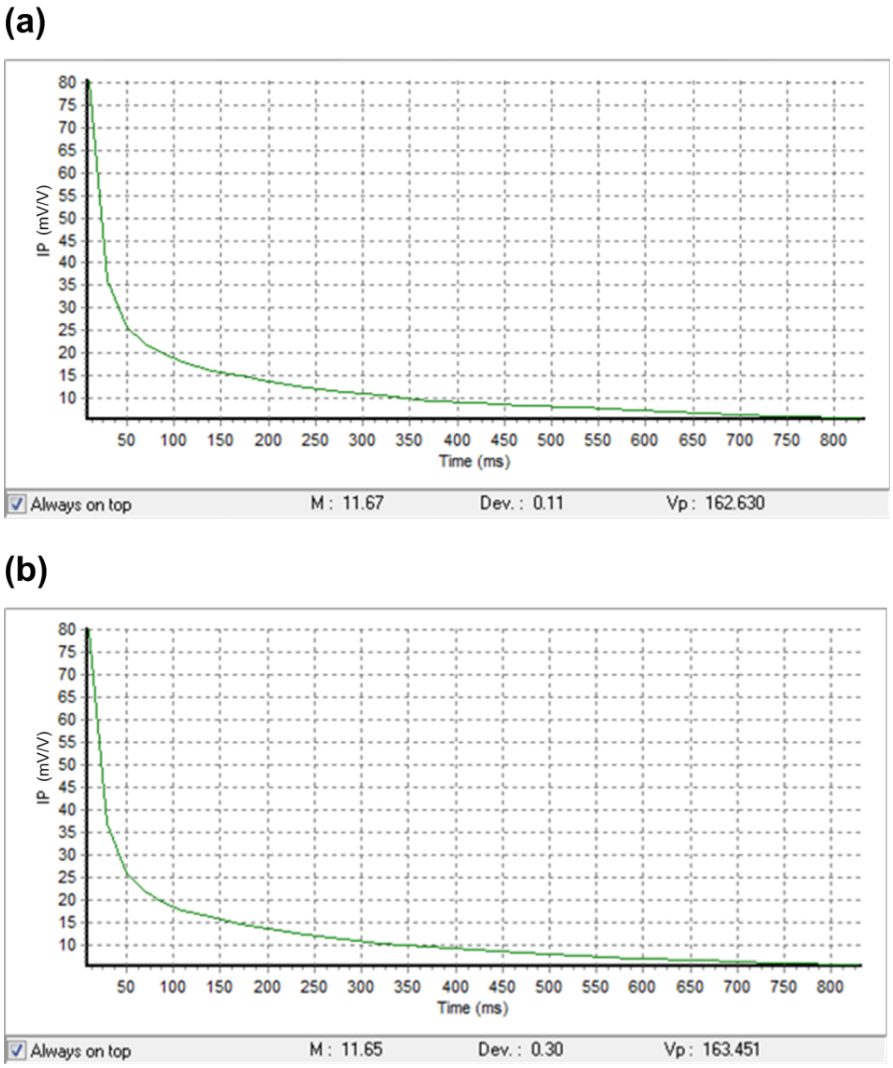


Figure 3.6 – Courbes de décroissance de la polarisation mesurée. a) mesure effectuée avec des électrodes classiques (inox de haute qualité) ; b) mesure effectuée avec des électrodes impolarisables.

Calcul des valeurs de chargeabilité et des paramètres Cole-Cole

Pour calculer les valeurs de chargeabilité totale, le Syscal Pro utilise 20 fenêtres de mesure de M_i (t_1 à t_{20}). On peut remarquer sur les courbes de la figure 3.7 que dans les 50 premières millisecondes (correspondant au Mdly de 20 ms, et aux 2 premières fenêtres de 10 et 20 ms), la courbe qui devrait décroitre, croit anormalement (parfois avec des valeurs négatives, Figure 3.7a). Cette situation anormale fausse le calcul de la chargeabilité totale.

Nous avons alors recalculé les valeurs de chargeabilité totale en utilisant l'équation 2.15 sans prendre en compte les deux premières fenêtres de mesure de M_i. La chargeabilité totale a donc été recalculée avec les 18 fenêtres de temps restantes.

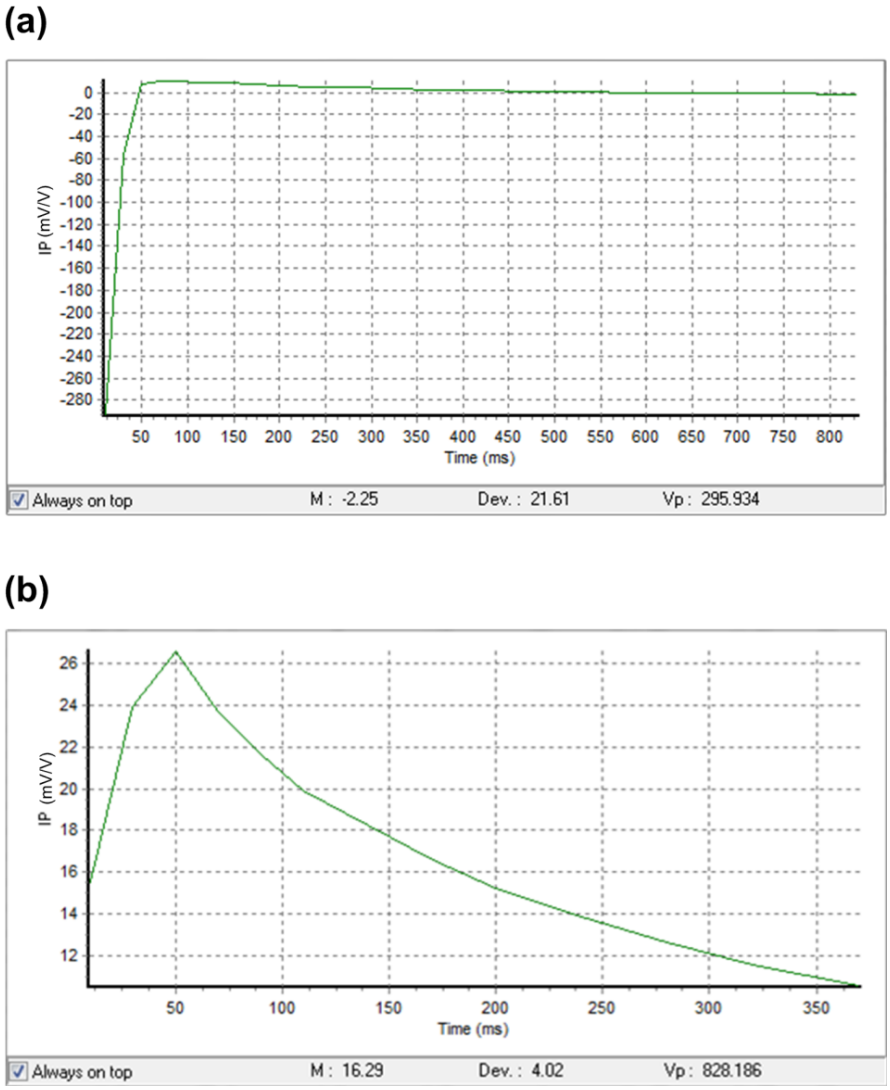


Figure 3.7 – Exemple de courbe de décroissance affectée par une croissance dans les 50 premières ms. a) dans les valeurs négatives ; b) dans les valeurs positives.

L'origine de la croissance observée en début de courbe n'a pas été recherchée dans cette étude, car ce phénomène est peu fréquent d'une part, et d'autre part, les hypothèses que l'on peut émettre pour l'expliquer réclameraient un autre type de matériel pour les vérifier (position des câbles, mesures plus rapides après la coupure par exemple). On note que ces valeurs négatives se manifestent également lorsqu'on utilise des électrodes impolarisables, et donc ne peuvent pas être imputées à un phénomène de polarisation d'électrode.

Pour obtenir les paramètres Cole-Cole, nous avons développé avec A. Campoy un code « R » (Alle *et al.*, 2014) afin de modéliser la relaxation de la permittivité complexe (Equation 2.16) pour en tirer *c*, *m* et τ (voir script en Annexe 2).

3.4. Lithologie des forages et les informations du foreur

3.4.1. Lithologie des forages

La lithologie ou log de forage permet de décrire la nature des roches (type et niveau d'altération) du sous-sol suivant la profondeur à partir de l'observation des *cuttings* qui sortent du forage au fur et à mesure que la foration avance. Elle a été réalisée en recueillant des cuttings d'abord au sol sur le site de forage pour en faire une planche de cuttings (Figure 3.8a), puis dans des sacs de congélation (Figure 3.8b) pour une observation plus détaillée au laboratoire.

Figure 3.8 – Présentation des cuttings du forage P1 du site FD30. a) planche de cuttings, b) cuttings échantillonnés dans des sacs de congélation (*e.g.* 10 premiers et 10 derniers mètres).

La lithologie a été faite pour les trois forages de chaque site. La figure 3.9 présente en exemple, la lithologie et les caractéristiques du forage F68-P1 (voir Annexe 7 pour tous les forages).

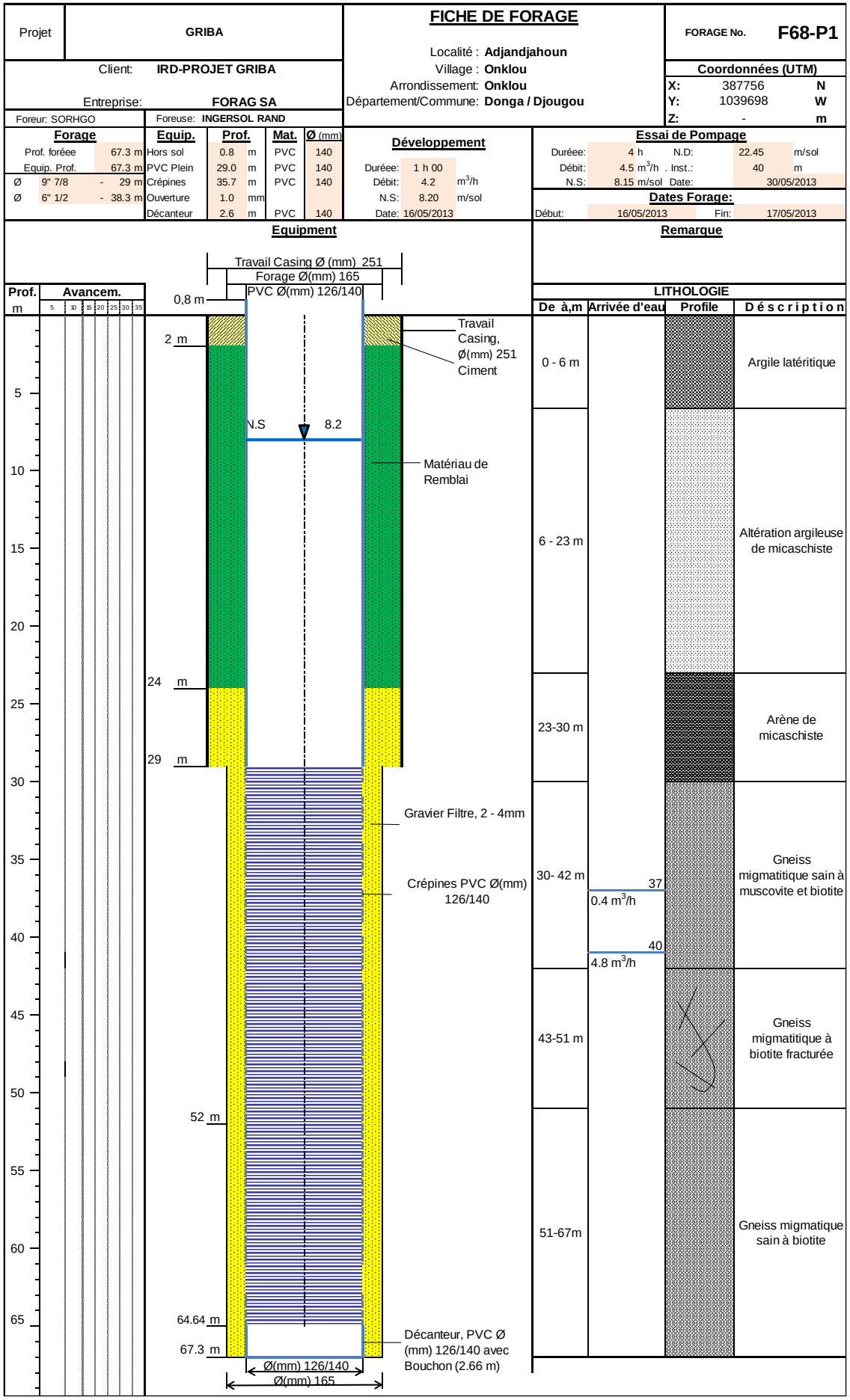


Figure 3.9 – Caractéristiques et lithologie du forage P1du site F68.

3.4.2. Informations du foreur

Profondeur forée par outils

Deux outils sont utilisés pour la foration en zone de socle par le foreur via la foreuse : le « rotary » pour forer la partie altérée et meuble (la ZA) et le « marteau-fond-de-trou » pour la ZFS et le SS. Lorsque l'interface ZA/ZFS est atteinte, le rotary n'avance plus et le foreur passe au marteau-fond-de-trou. Les profondeurs forées par chacun de ces outils sont relevées auprès du foreur afin de connaître la profondeur réelle de l'interface ZA/ZFS.

Profondeur de venue d'eau

En considérant que l'injection du fluide de foration est constante, la venue d'eau représente la variation positive du débit d'eau qui sort du forage pendant la foration. Les venues d'eau arrivent très souvent (d'après les foreurs) à la base de la ZA et lorsqu'on entame la ZFS. Ces profondeurs de venues d'eau ont donc été notées comme des indicateurs de profondeurs de fissures/fractures importantes. Rarement, des venues d'eau ont été relevées dans le SS.

Fractures sèches

Les fractures sèches correspondent aux zones du sous-sol pour lesquelles le foreur constate une avancée brusque (sans augmentation de la puissance de la foreuse) dans la descente du marteau sans qu'il y ait une variation positive du débit (venue d'eau). Les profondeurs auxquelles les fractures sèches sont relevées représentent des profondeurs de fissures/fractures qui ne contiennent a priori pas d'eau ou qui ne sont pas connectées.

3.5. Evaluation de la sensibilité des paramètres électriques

3.5.1. Logs des paramètres électriques Vs lithologie et informations du foreur

La figure 3.10 montre les résultats de diagraphie (résistivité, chargeabilité et paramètres Cole-Cole), de lithologie et d'information du foreur obtenus pour les 3 piézomètres sur le site F68.

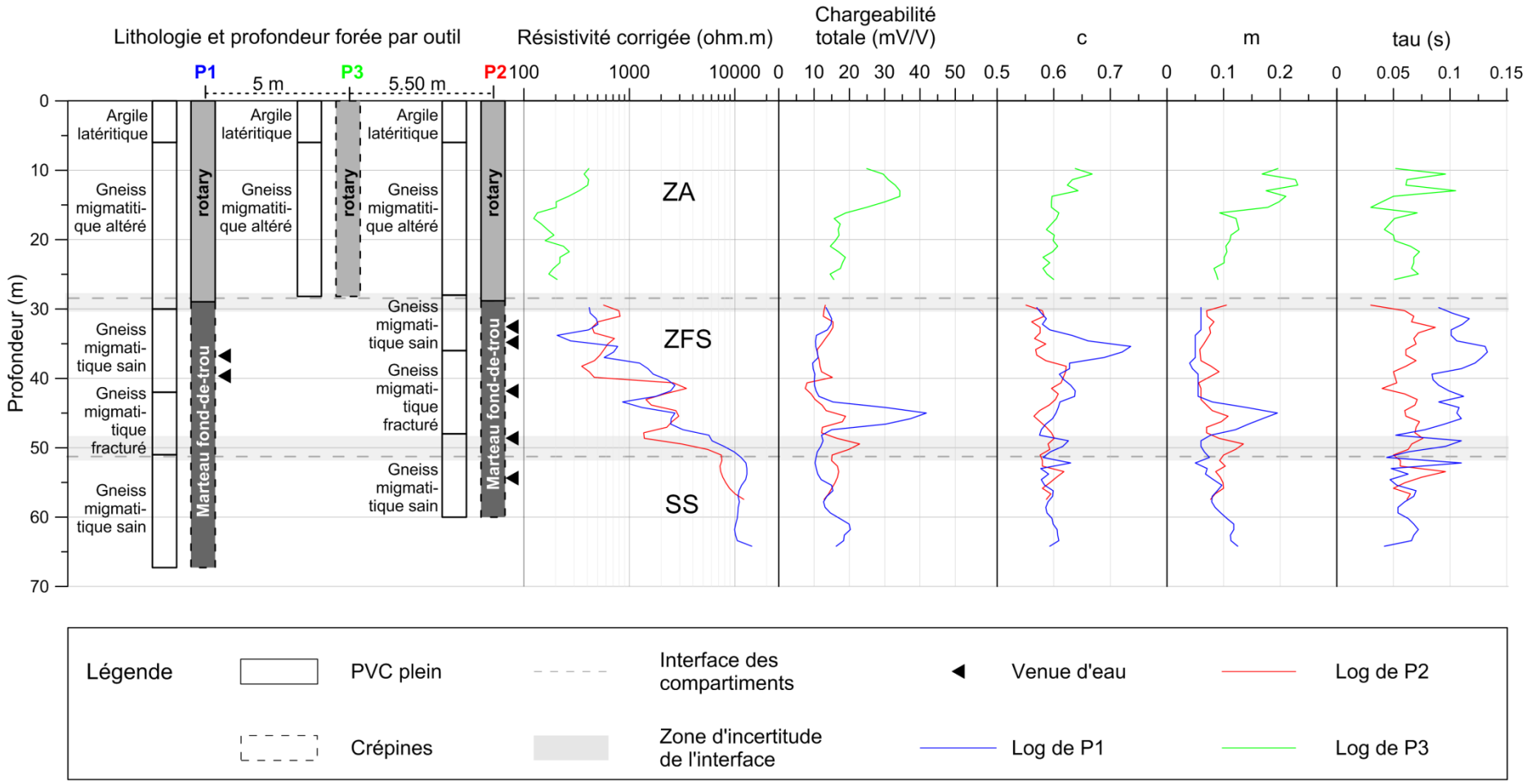


Figure 3.10 – Logs de diagraphie de résistivité, chargeabilité et paramètres Cole-Cole (m, c et τ) face aux lithologies et aux profondeurs forées du site F68.

La résistivité corrigée varie entre 100 et 400 ohm.m de 0 à 28 m. A cette même profondeur, le foreur est passé du rotary au marteau (passage de la ZA à la ZFS). La lithologie montre que dans les 5 premiers mètres environ il y a des argiles et jusqu'à 30 m environ, des gneiss migmatitiques altérés. De 30 à 50 m environ, on rencontre des gneiss fissurés fracturés, où on observe une augmentation progressive de la résistivité de 500 à 3.000 ohm.m. En dessous de 50 m, on note une stabilisation de la résistivité autour de 10.000 ohm.m. Cette stabilisation coïncide avec la lithologie qui montre qu'on est, à cette profondeur, dans le SS.

Ces observations révèlent la sensibilité de la résistivité aux compartiments hydrogéologiques et donc à la cible hydrogéologique. Le comportement (la variation) de la résistivité permet de distinguer, avec la lithologie, les interfaces ZA/ZFS et ZFS/SS respectivement à 30 m et 50 m environ. Les mêmes observations ont été faites sur l'ensemble des sites pour déterminer l'épaisseur des compartiments et ensuite définir les gammes de valeurs de résistivités par compartiment. Il faut noter que des chutes brusques de résistivités de l'ordre d'une décade (de 10.000 à 1.000 ohm.m), ont été enregistrées dans les premiers mètres du SS sur certains sites comme FD30, qui pourraient être représentatives de fractures profondes. Sur certains forages, ces profondeurs correspondent à des venues d'eau significatives relevées par le foreur.

La chargeabilité (chargeabilité totale *M*) corrigée varie entre 10 et 40 mV/V dans tous les 3 forages. Cette gamme est la même sur tous les autres sites (voir Annexe 4 pour tous les logs de chargeabilité totale face aux logs de résistivité et aux lithologies). Pour le site F68 le paramètre de chargeabilité Cole-Cole *m* varie de 0,05 à 0,24 ; *c* reste proche de 0,6 ; τ oscille entre 50 et 130 ms. On remarque globalement que dans la ZA, lorsque la résistivité augmente ou diminue, la chargeabilité et les valeurs des paramètres Cole-Cole également suivent le même comportement. Dans la ZFS et le SS, la chargeabilité reste quasiment constante sauf, pour le site F68 présenté ici, où la chargeabilité et les paramètres Cole-Cole *c* et *m* montrent une augmentation (pics) à certains endroits de la ZFS qui ne correspondent pas toujours à des venues d'eau ni à des fractures sèches. Il faut noter que cette remarque est faite seulement sur le site F68 et donc c'est un cas plutôt particulier.

Lorsqu'on compare les logs des deux paramètres entre eux, on retient que :

- la résistivité et la chargeabilité ont presque le même comportement dans la ZA. C'est dans la ZA que la chargeabilité présente des variations d'un site à l'autre, ce qui tend à

montrer que c'est bien un phénomène qui se met en place lorsque l'altération a modifié la nature et la structure de la roche en produisant de l'argile ;

- il n'y a pas de différence entre les valeurs de chargeabilité dans la ZFS et celles du SS, elles sont quasiment constantes: la chargeabilité est donc moins sensible à la ZFS et au SS que la résistivité qui, elle, est sensible à tous les compartiments.

3.5.2. Gammes des paramètres électriques par compartiment et par site

En regroupant les valeurs de résistivité appartenant aux différentes délimitations des compartiments hydrogéologiques (ZA, ZFS et SS), 604 données ont été obtenues pour construire les gammes de résistivité et de chargeabilité par compartiment et par site.

Pour la résistivité, dans un premier temps on voit que, pour chaque site, il y a une discrimination nette entre les gammes représentées à 80 % avec un « *whisker* » de 10/90 percentile (Figure 3.11) (sauf FD19 où il y a un léger chevauchement entre la ZA et la ZFS).

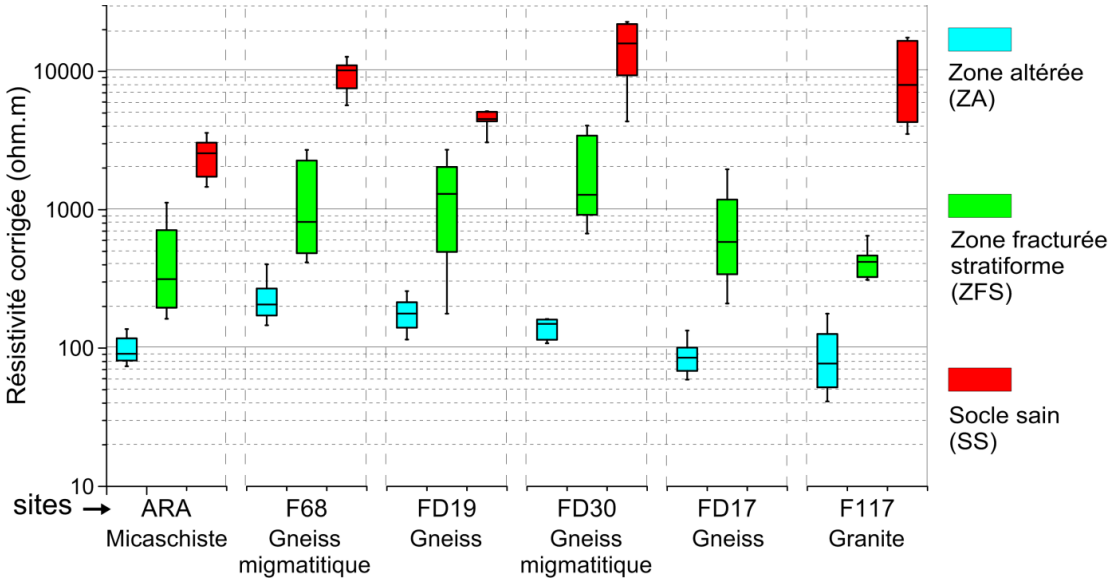


Figure 3.11 – Gammes de résistivités (avec un « whisker » de 10/90 percentile) par compartiment et par site (SS non atteint à FD17).

Dans un second temps, on remarque que les gammes de valeurs de résistivités d'un même compartiment pour les 6 sites se recouvrent. Cela indique que les compartiments hydrogéologiques présentent des valeurs comparables malgré leur différence géologique

(gneiss, granite, migmatite et micaschiste). Lorsqu'on regroupe les gammes de résistivités des 6 sites avec la même représentation à 80 % (Figure 3.12), on remarque que pour l'ensemble des sites et donc des formations géologiques, chaque gamme de résistivité par compartiment se distingue bien des autres.

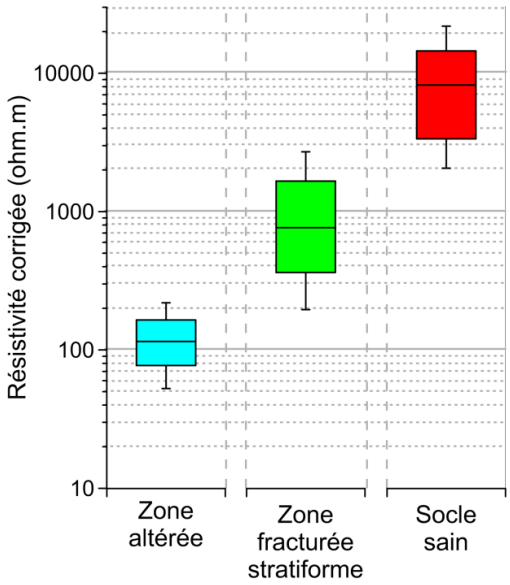


Figure 3.12 – Gammes de résistivités (avec un « whisker » de 10/90 percentile) par compartiment pour l'ensemble des sites.

Les gammes de chargeabilité ont été construites en utilisant les limites de compartiments définies par les informations du foreur et la résistivité. Ces gammes se recouvrent entre elles pour un même site, et donc comme observé sur les logs, la chargeabilité n'est pas sensible aux différents compartiments hydrogéologiques (Figure 3.13). On remarque aussi, que la chargeabilité n'a pas un comportement général d'un site à l'autre :

- sur tous les sites en dehors des sites Ara et F68, la chargeabilité décroît de la ZA à la ZFS puis au SS ;
- sur le site d'Ara uniquement, la chargeabilité croît de la ZA à la ZFS puis au SS ;
- sur le site F68 uniquement, la chargeabilité du SS a une gamme qui se situe entre celle de la ZA (au-dessus) et celle de la ZFS (en dessous).

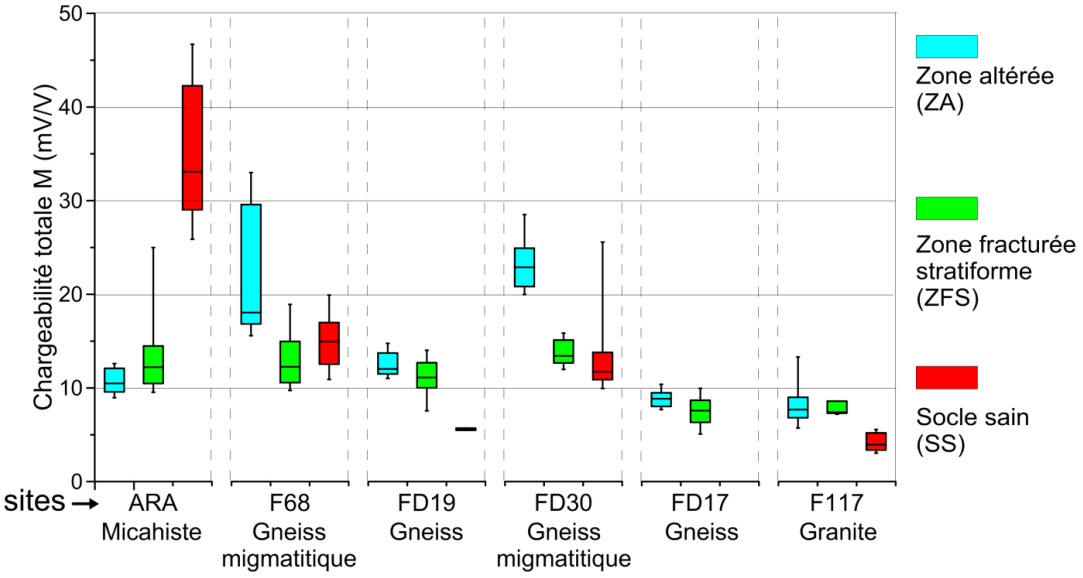


Figure 3.13 – Gammes de chargeabilité (avec un « whisker » de 10/90 percentile) par compartiment et par site.

Ces résultats (de résistivité et de chargeabilité) démontrent que la résistivité est plus sensible aux compartiments hydrogéologiques, dont la ZA et la ZFS qui constituent la cible hydrogéologique à privilégier pour un forage productif. Elle permet d'avoir, pour l'ensemble des formations géologiques, des valeurs de résistivité médiane représentatives de chaque compartiment hydrogéologique : ZA - 150 ohm.m, ZFS - 800 ohm.m et SS – 8.000 ohm.m (valeurs de résistivités arrondies des médianes de chaque gamme). Pour la chargeabilité on retient qu'elle n'est sensible qu'à la ZA, donc à seulement une partie de la cible hydrogéologique. Pour comparaison, on recherche dans le prochain paragraphe le lien entre la résistivité ZA et la chargeabilité ZA.

3.6. Relation entre la résistivité et la chargeabilité de la ZA

La relation entre la médiane de la chargeabilité et celle de la résistivité dans la ZA est présentée ici pour l'ensemble des sites. Sachant que le principal compartiment de stockage de l'eau souterraine est la ZA, et que c'est seulement pour la ZA qu'on observe une cohérence dans la variation de la chargeabilité, nous mettons en relation les valeurs médianes de résistivité et de chargeabilité totale de la ZA (Figure 3.14). Les valeurs médianes ont été

calculées en prenant en compte toutes les valeurs de résistivités et de chargeabilités de la ZA pour chaque site.

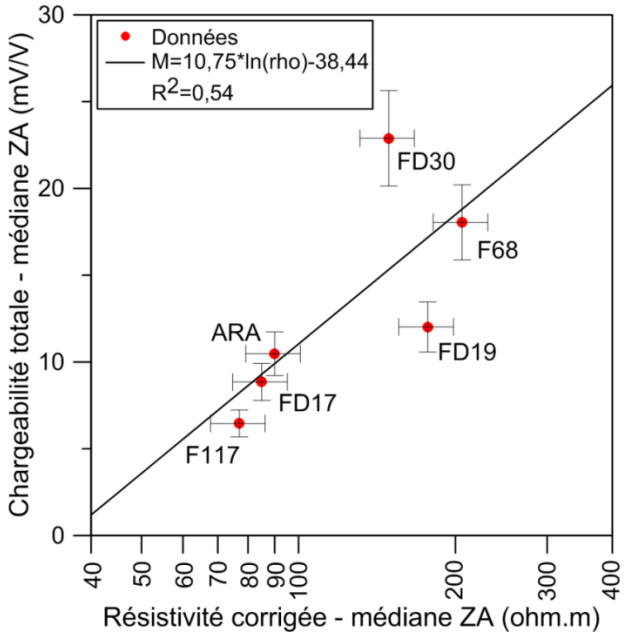


Figure 3.14 – Relation entre la résistivité médiane de la ZA et la chargeabilité totale médiane de la ZA sur tous les sites.

La relation obtenue entre la résistivité et la chargeabilité dans la ZA est une corrélation positive (R^2 = 0,54), ce qui montre que la chargeabilité augmente avec la résistivité. La chargeabilité contribuerait donc comme la résistivité, à identifier la ZA. La chargeabilité n'apporterait pas un critère plus discriminant que la résistivité (si ce n'est qu'une confirmation) pour l'identification de la ZA. En revanche, il reste à explorer l'intérêt de ce paramètre pour obtenir un supplément d'information sur la nature de la ZA. Sachant que, selon Pelton *et al.*, (1978) la chargeabilité totale n'augmente pas régulièrement avec la concentration en minéraux argileux, mais atteint un maximum puis décroit, on pourrait penser que le maximum de chargeabilité totale est atteint sur les sites investigués et qu'on est dans la décroissance (baisse de chargeabilité totale pour augmentation de la teneur en argile). Pour confirmer ces hypothèses, des mesures devraient être effectuées sur des terrains sableux avec des pourcentages en argile de plus en plus importants. En perspective, une expérimentation pareille est envisageable.

Conclusion partielle

Pour évaluer la sensibilité des paramètres électriques (résistivité et chargeabilité) à la cible hydrogéologique afin d'identifier cette dernière, nous avons comparé des valeurs de résistivités et de chargeabilités « vraies » de différentes roches de socle, aux informations propres du forage et du foreur. Les résultats ont montré que la résistivité présente des valeurs globales différentes, pour chaque compartiment : faibles et plus ou moins constantes dans la ZA, progressives dans la ZFS et constantes autour de fortes valeurs dans le SS. Les gammes de valeurs de résistivités obtenues par compartiment pour chaque site et pour l'ensemble des sites montrent que la résistivité a une sensibilité suffisante pour discriminer les compartiments hydrogéologiques, et est par conséquent efficace pour l'identification de la cible hydrogéologique. La chargeabilité n'est efficace que pour l'identification de la ZA. Les paramètres Cole-Cole eux, sont quasiment constants dans la ZFS et le SS à part quelques pics dans la ZFS qu'on n'arrive pas à lier ni à la lithologie du forage, ni aux informations du foreur. Dans la ZA, la résistivité variant entre 60 et 400 ohm.m, augmente avec la chargeabilité qui varie entre 5 et 25 mV/V. Ceci dit, l'hypothèse N°2 de cette étude qui dit que les paramètres géophysiques, résistivité et chargeabilité électrique, mesurés par la méthode électrique sont certainement utiles pour l'identification de la cible hydrogéologique, est vérifiée. Pour une caractérisation de la cible hydrogéologique via les paramètres géophysiques (résistivité et chargeabilité), dans le chapitre suivant, on tente de trouver des relations qui existeraient entre les paramètres géophysiques, les paramètres hydrodynamiques (porosité de drainage et conductivité hydraulique) et la présence d'argile (teneur et type).

Chapitre 4

Relations entre paramètres géophysiques électriques, paramètres hydrodynamiques et les argiles

Introduction

La connaissance prédictive des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère qui sera capté par le forage est une des questions posées par l'hydrogéologue au géophysicien pour l'implantation d'un forage. Les projets d'implantation de forages qui exigent l'obtention d'un "gros débit" (débit instantané mesuré après forage supérieur à 3,6 m^3/h) en sont l'illustration.

Le chapitre 3 nous a permis d'avoir les valeurs « vraies » des paramètres électriques (résistivité et chargeabilité totale) du sous-sol permettant de différencier les compartiments hydrogéologiques et donc d'identifier la cible hydrogéologique. Dans ce chapitre, on vérifie s'il existe, au-delà de la différenciation des compartiments, sur la base des valeurs vraies de résistivité et de chargeabilité totale, des relations entre ces derniers et les paramètres caractérisant au premier rang l'aquifère dans lequel sera implanté le forage (porosité de drainage, conductivité hydraulique et présence d'argile). Cela permettra de connaître la capacité des paramètres géophysiques électriques à estimer la qualité hydrogéologique de la cible.

Le chapitre 1 a montré que la cible hydrogéologique à privilégier est constituée de la ZA et des premiers mètres de la ZFS. Sachant qu'une faible teneur en argile, et donc un pourcentage de sable plus important dans la ZA lui confère une meilleure "qualité" pour l'implantation d'un forage (Olayinka, 1992), on considère dans cette étude la présence d'argile comme pouvant nous renseigner sur la qualité hydrogéologique de la cible, de par son influence sur les propriétés hydrodynamiques de cette dernière (*e.g.* Shevnin *et al.*, 2006). La présence d'argile est représentée ici par la teneur mais aussi le type d'argile (paramètres souvent utilisés en géotechnique).

4.1. Méthodologie mise en œuvre

La chargeabilité n'étant sensible qu'à la ZA, on vérifie s'il existe un lien entre les deux paramètres électriques (pour la ZA, et uniquement la résistivité pour la ZFS) et, d'une part les paramètres hydrodynamiques *de référence* (porosité de drainage et conductivité hydraulique), et d'autre part la teneur en argile ainsi que le type d'argile. Pour rechercher ces liens, on utilise plusieurs résultats de différentes méthodes :

- le pompage d'essai longue durée (ou essai de nappe) est réalisé sur les forages « diagraphiés » (les 6 LETS) pour obtenir la porosité de drainage et la conductivité hydraulique de l'aquifère (transmissivité obtenue / épaisseur saturée) ;
- la diffractométrie de rayons X est appliquée sur les cuttings de forage pour obtenir la teneur en argile et l'identité des argiles pour 5 échantillons considérés comme représentatifs ;
- le test de bleu de méthylène est réalisé sur un nombre de cuttings plus important (une cinquantaine) pour également tenter de quantifier la teneur en argile par une technique peu coûteuse mais qui n'identifie pas les argiles en présence.

Les données, traitements et résultats des pompages d'essai de longue durée sont présentés dans le manuscrit de thèse de Fabrice LAWSON avec qui nous avons travaillé ensemble sur les mêmes sites. Ces résultats de pompage d'essai ont été publiés (voir Vouillamoz *et al.*, 2015b; Vouillamoz *et al.*, 2014). Seules les valeurs des paramètres obtenus (porosité de drainage et conductivité hydraulique) sont présentées et utilisées « directement » dans ce chapitre. La diffractométrie de rayons X et le test de bleu étant les nouvelles méthodes utilisées pour cette étude, celles-ci sont présentées ci-dessous.

4.2. Diffractométrie de rayons X

Les argiles sont des roches composées principalement de silicates qui sont des particules fines qui ont des agencements de l'ordre du nanomètre, voire d'un ordre inférieur. Pour voir un objet de taille "d", il faut un rayonnement dont la longueur d'onde associée λ est telle que $\lambda < d$. Par exemple la longueur d'onde du rayonnement visible (la lumière naturelle) est de l'ordre de 0,5 µm, ce qui constitue une limite de la lumière du visible, à pouvoir identifier la structure des argiles en présence dans un échantillon, puisque cette dernière a une taille de l'ordre de 0,1 nm. Les rayons X, par contre, ont un rayonnement dont la longueur

d'onde est sensiblement égale à 0,1 nm, ils sont donc capables d'identifier la structure d'une argile. La technique utilisée pour cette identification est la diffraction de rayon X. Elle existe depuis environ une trentaine d'année avec des avancées considérables ces dix dernières années. Dans cette étude, on utilise la diffraction de rayon X pour observer à l'échelle du dixième de nanomètre (l'ångström, 1Å = 10^{-10} m) les différents échantillons de cuttings, afin de pouvoir différencier les argiles en présence, pour ensuite calculer leur proportion dans l'échantillon. Le diffractomètre à rayons X nous permet ainsi d'obtenir, en plus de la teneur en argile, les identités des différentes argiles en présence dans l'échantillon.

4.2.1. Analyse au diffractomètre à rayons X

Un rayon X est l'un des rayonnements émis lorsqu'un matériau est soumis à un bombardement électronique d'énergie suffisante (Figure 4.1).

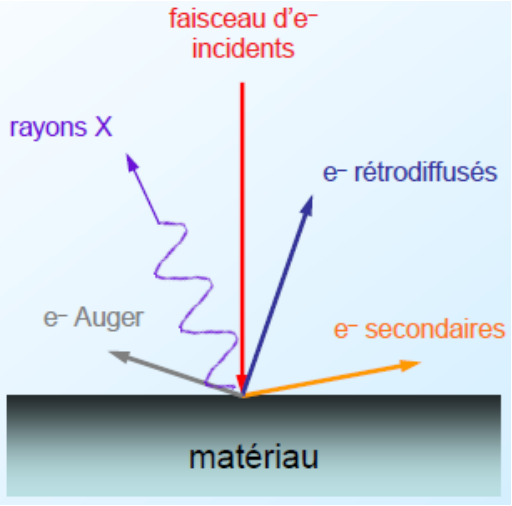


Figure 4.1 – Emission d'un rayon X.

Le diffractomètre à rayons X est un appareil permettant de mesurer la diffraction d'un rayonnement X sur une cible. Ici, la cible est l'échantillon de cutting. Pour analyser l'échantillon, il faut le préparer en le broyant, à la main puis à la machine, jusqu'à 2 µm (Figure 4.2) afin d'obtenir ce qu'on appelle techniquement « la poudre » qui permet à la quasi-totalité des minéraux en présence de recevoir l'émission du rayon X et de la diffracter. L'échantillon est ensuite "préparé" sur une plaquette pour passer au diffractomètre. L'appareil envoi alors sur l'échantillon préparé, un faisceau de rayons X via la source Rx du

diffractomètre (Figure 4.3) et mesure la diffraction (angle et intensité) de ce rayonnement avec le détecteur (Figure 4.3). L'angle et l'intensité du rayonnement diffracté dépendent de la nature des atomes, et constituent donc les informations principales qui sont utilisées pour la caractérisation des atomes en présence. Après avoir balayé le maximum d'angle d'émission avec la source Rx, les intensités et les angles de diffraction sont représentés par un diagramme. C'est l'analyse de ce diagramme qui permet de remonter à la structure complète de l'échantillon analysé (Serna *et al.*, 2014).

Le diffractomètre à rayons X utilisé est celui de l'Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) de l'Université Grenoble Aples (Figure 4.4). Les analyses ont été réalisées en 2016.

(a) **(b)**

Figure 4.2 – Préparation de l'échantillon. a) broyage à la main (mortier et pilon) de l'échantillon : préparation pour broyage à la machine ; b) broyage à la machine jusqu'à 2 µm.

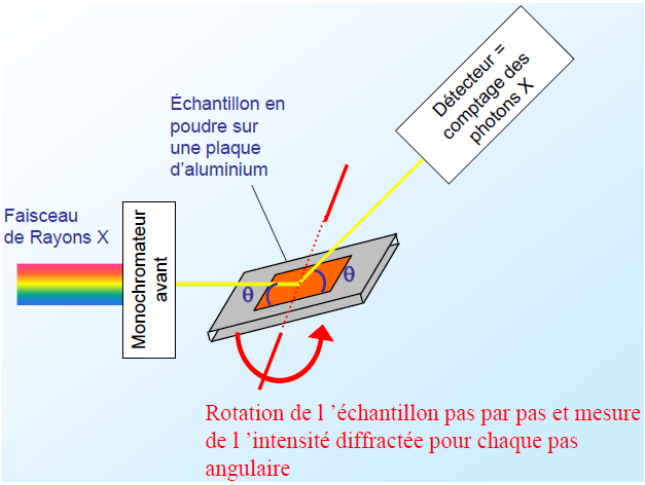


Figure 4.3 – Schéma descriptif du fonctionnement du diffractomètre à rayons X.

Figure 4.4 – Image du diffractomètre à rayons X utilisé pour cette étude (diffractomètre à rayons X D5000 de l'Institut des Sciences de la Terre (ISTerre) de l'Université Grenoble Alpes, en 2016).

4.2.2. Détermination du type d'argile en présence et sa proportion dans l'échantillon

L'identification du type d'argile passe par l'identification des différentes phases en présence dans le diagramme. En effet, chaque élément chimique va diffracter le rayon X à des angles et à des intensités qui lui sont propres (Figure 4.5). Une argile étant composée de plusieurs éléments chimiques, l'ensemble des angles de diffraction de ces éléments constitue la phase de cette argile. Dans un diagramme, on peut donc avoir plusieurs phases qui vont révéler les différentes argiles en présence. La hauteur du pic (représentant l'intensité de la diffraction) et sa largeur renseignent sur la concentration de l'élément ; ce qui permet de calculer la proportion de l'élément chimique et donc de l'argile en présence. Un exemple de diagramme résultant d'une diffractométrie de rayons X est présenté ci-dessous avec des illustrations de phases de quelques éléments chimiques (Figure 4.5).

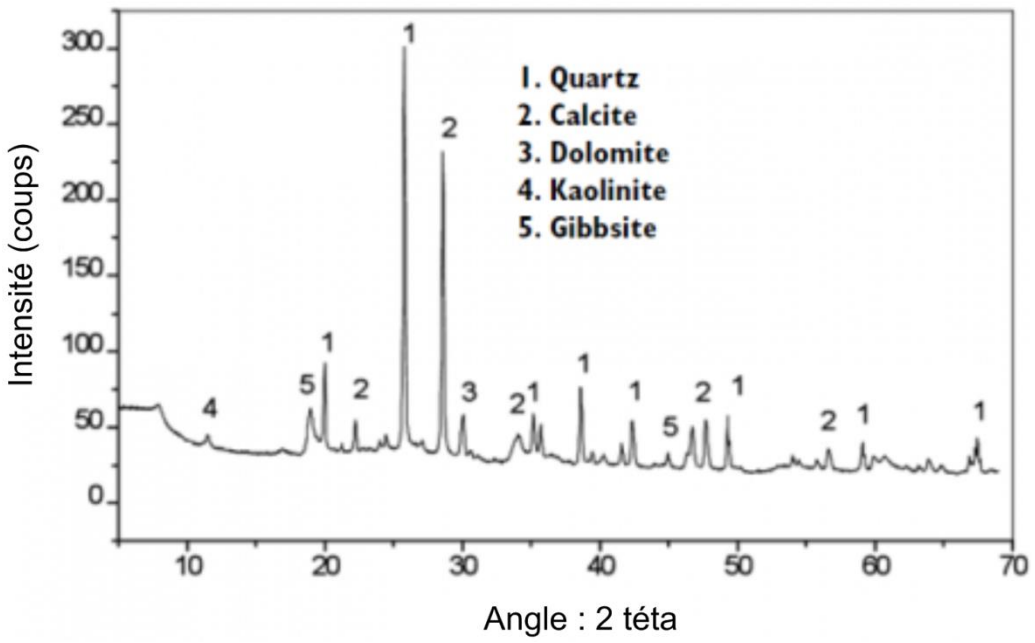


Figure 4.5 – Schéma d'un diagramme résultant d'une diffractométrie de rayons X avec des illustrations de phases de quelques minéraux.

Dans la pratique, une fois le diagramme obtenu, pour identifier chaque élément en présence, on compare les positions et les intensités des pics observés avec ceux de la base de données PDF (Powder Diffraction File) de l'ICDD (International Centre for Diffraction Data) qui contient plus de 600.000 diagrammes de références. Des logiciels existent pour faire automatiquement cette identification. Le logiciel propose des modèles de phases de minéraux qui permettent d'identifier rapidement les éléments en présence. La phase du minéral (ou élément) proposée peut être différente de celle qui existe dans le diagramme expérimental (diagramme que l'on veut analyser) en termes de hauteur de pic ou d'absence de pic sur des angles donnés. La quantité du minéral en présence étant liée à l'intégrale en dessous de la courbe de la phase, il est important de modéliser au mieux la phase proposée par le logiciel afin que cette dernière puisse se superposer idéalement à la phase du diagramme expérimental. La différence entre le modèle (après modélisation) et le diagramme expérimental constitue l'incertitude du résultat qu'on obtient. La délicatesse de cette modélisation nécessite pour des cas compliqués le regard d'un expert. Le logiciel utilisé pour cette étude est : Profex – 3.9.2.

4.2.3. Echantillonnage et résultats des analyses au diffractomètre à rayons X

Echantillonnage

L'analyse au diffractomètre à rayons X est relativement coûteuse (environ 250.000 FCFA / analyse). Nous avons analysé cinq échantillons représentatifs de l'étendue de la gamme de valeurs de résistivités et de chargeabilités électriques que nous avons pour la ZA. Seule la ZA a été échantillonnée, puisque c'est d'abord le compartiment principal de la cible hydrogéologique, et ensuite c'est le compartiment qui contient le plus d'argile et donc, qui est le plus à même de révéler les argiles en présence sur un site. Sur les six sites expérimentaux de notre zone d'étude, 5 sites ont été sélectionnés et sur chacun d'eux, un échantillon de cutting a été sélectionné en veillant à ce que la résistivité et la chargeabilité de cet échantillon soient très proches de la résistivité et de la chargeabilité médiane de la ZA du site. Ainsi, 5 échantillons des sites ARA, F68, FD19, FD30 et F117 ont été analysés (voir Tableau 4.2). Considérant que le choix des sites a été fait dans l'objectif de couvrir toute la gamme de résistivité et de chargeabilité totale de la ZA pour l'ensemble des sites, le site FD17 n'a pas été sélectionné parce que ses valeurs médianes de résistivité et de chargeabilité de la ZA sont très proches de celles des sites Ara et F117 qui sont déjà représentées (voir Tableau 4.3 dans la suite).

Résultats

La figure 4.6 présente le résultat de l'analyse de l'échantillon du site F68 (voir Annexe 6 pour tous les autres sites - diagrammes expérimentaux et diagrammes modélisés - avec les teneurs en minéraux des échantillons analysés). En observant le diagramme expérimental issu de l'analyse au diffractomètre à rayons X (Figure 4.6a), différentes phases de minéraux ont été modélisées (Figure 4.6b) afin de construire un modèle résultant qui puisse reproduire au mieux le diagramme expérimental (Figure 4.6c).

Le tableau 4.1 présente, pour le site F68, les différentes phases de minéraux modélisées et leur teneur (avec les incertitudes) en les identifiant selon les types de minéraux (argiles et quartz) auxquels elles appartiennent.

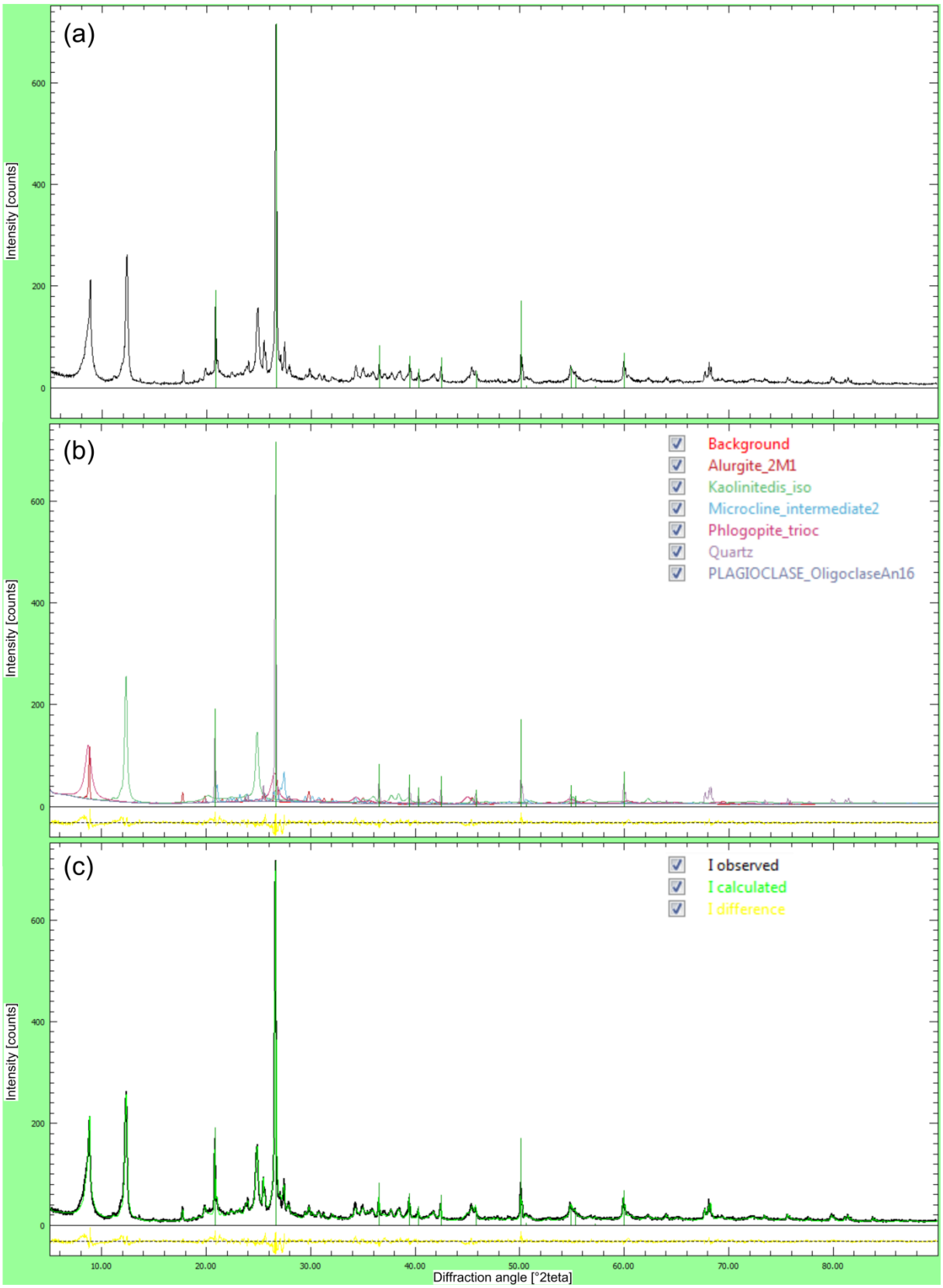


Figure 4.6 – Résultats de diffractométrie de rayons X de l'échantillon F68. a) diagramme expérimental ; b) phases de minéraux modélisées ; c) diagramme expérimental (noir), modèle résultant des phases modélisées (vert) et différence entre ces deux derniers (jaune).

Tableau 4.1 – Résultats de diffractométrie de rayons X de l'échantillon F68 : les phases de minéraux modélisées, leur teneur et les types de minéraux auxquels elles appartiennent.

Phases de minéraux	Teneur (%)	Incertitude sur la teneur (%)	Types de minéraux (argiles et quartz)
Alurgite	11.69	3.6%	Illite
Kaolinitedisiso	33.62	1.9%	Kaolinite
Microcline	13.42	2.5%	Illite
Phlogopite	19.20	4.6%	Illite
Quartz	20.09	1.9%	Quartz
Oligoclase	1.97	7.1%	Illite

Les teneurs de ces types d'argiles ainsi que les teneurs en quartz/sable obtenues pour tous les échantillons (sites) sont présentées dans le tableau 4.2 suivant. La moyenne de l'incertitude calculée sur l'ensemble des analyses est d'environ 4 %.

Tableau 4.2 – Résultats de la diffractométrie de rayons X pour tous les sites (profondeurs des cuttings échantillonnés, teneurs en type d'argile et en quartz, paramètres géophysiques).

Sites Echantillonnés	Profondeur de l'échantillon - piézomètre P3 (m)	Argiles Non Gonflantes ANG (%)				Argile Gonflante AG (%)	Somme des argiles ANG + AG (%)	Sable ou quartz (%)	Vérification: somme argile + sable (%)	Résistivité - rho (ohm.m)	Chargeabilité totale - M (mV/V)
		Kaolinite	Illite	Chlorite	Somme ANG	Smectite					
ARA	14	9,88	55,3	4,72	69,87	1,73	71,6	28,39	99,99	75	9.8
F68	15	33,62	46,3	0	79,91	0	79,91	20,09	100	220	28
FD19	10	37,78	34,4	0	72,13	0	72,13	27,87	100	180	11.5
FD30	10	44,62	34	0	78,63	1,4	80,03	19,99	100,02	155	29
F117	5	41,9	43	0	84,88	6,41	91,29	8,69	99,98	23	1,4

On remarque que les types d'argiles les plus importants en présence sont la kaolinite et l'illite. Il y a peu de chlorite et de smectite (argile gonflante). Certains échantillons n'en

contiennent pas du tout (F68 et FD19). Puisque nous recherchons des liens pouvant aider à mieux caractériser les aquifères, nous prenons en compte le comportement des argiles en présence d'eau. Nous regroupons les argiles en deux catégories : les argiles gonflantes et les argiles non gonflantes. En effet, certaines argiles présentent la capacité d'augmenter leurs espaces interfoliaires. Cette propriété provient de l'incorporation de cations hydratés permettant de compenser les déficits de charges permanentes : c'est le cas des vermiculites et des smectites (ou montmorillonites) dont la distance « feuillet + distance interfolaire » peut passer de 10 Å à 18 Å en présence d'eau. Comme on peut le voir sur la figure 4.7, l'empilement désordonné des feuillets des smectites permet d'avoir des substitutions d'atomes plus importantes. Ce désordre et la faible charge des feuillets facilitent leur écartement et l'adsorption des molécules variées (eau, cations, molécules organiques) au niveau de l'espace interfoliaire qui s'écarte (d = 18 Å) (Beauchamp, 2005). C'est d'ailleurs le seul type d'argile sur la figure 4.7 qui a pour substituant l'eau. Ces argiles retiennent ainsi fortement l'eau en la fixant dans ces espaces interfoliaires. Les autres argiles comme la kaolinite, la illite et la chlorite n'ont pas cette propriété, elles sont donc classées dans le groupe des argiles non gonflantes. Les interprétations des relations qui seront établies entre les argiles et les paramètres géophysiques prendront en compte cette catégorisation des argiles.

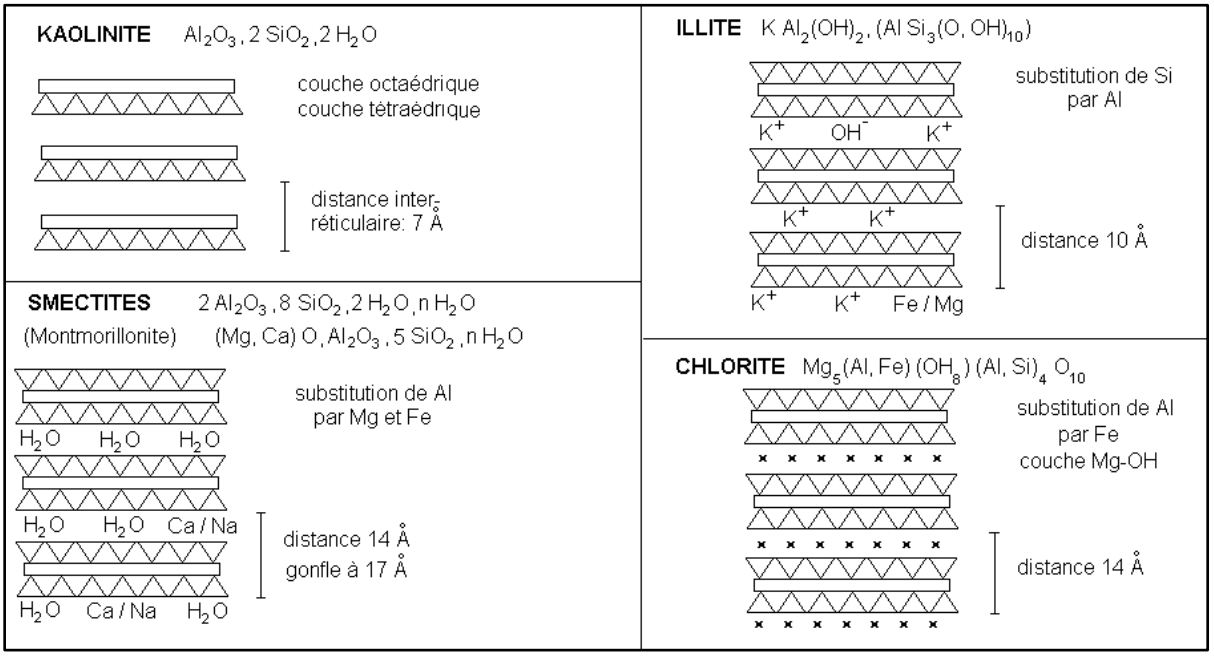


Figure 4.7 – Structure des minéraux argileux avec présentation des espaces interfoliaires (Beauchamp, 2005).

4.3. Test de bleu de méthylène

4.3.1. Définition du test de bleu de méthylène

Le test de bleu de méthylène, ou « essai au bleu », est souvent utilisé en géotechnique pour déterminer la teneur en argile d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol (Magnan *and* Youssefian, 1989). L'essai consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans un échantillon de matériaux sableux. Le bleu de méthylène dont le nom en nomenclature systématique est 3,7-bis-(dimethylamino) phenazathionium, étant une substance adsorbée par les argiles, la teneur en argile est déterminée en mesurant la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par la fraction granulaire analysée (la roche).

L'adsorption doit s'effectuer sur 30 g de matériau de fraction 0/2 mm, mis à tremper avec 200 ml d'eau dans un récipient et maintenu en permanence sous agitation. La quantité de bleu de méthylène adsorbée est mesurée par dosage, en procédant à des additions successives de 5 ml de bleu de méthylène (Figure 4.8), jusqu'à ce que les particules argileuses en soient saturées. On observe alors un excès de bleu de méthylène, qui marque la fin de l'essai que l'on met en évidence, par la méthode dite du « test de la tache ».

Le test de la tache (Figure 4.8) consiste à prélever à l'aide d'une baguette de verre, après chaque addition de bleu de méthylène et après une minute d'agitation, une goutte de suspension à déposer sur un papier filtre. La tache ainsi formée est un dépôt de sol coloré généralement en bleu soutenu, entouré d'une zone humide et incolore due à l'eau du trempage. Cette zone humide et incolore dans la première phase de l'essai, prend une coloration bleue claire dès l'apparition de l'excès de bleu de méthylène, ce qui est le témoin de test positif. Du fait qu'à l'approche de la saturation, l'adsorption s'effectue avec un certain retard, l'excès constaté peut n'être que temporaire. On vérifie alors que le test de la tache reste positif pendant 5 min après la dernière addition de bleu de méthylène. S'il est négatif à la cinquième minute après avoir été positif, il faut ajouter encore 2 ml de bleu de méthylène. Le test s'achève donc quand l'auréole bleue persiste autour de la tache pendant 5 minutes. Le volume total de bleu de méthylène adsorbé est noté V.

On verra dans le paragraphe suivant que l'estimation de la teneur en argile par le test de bleu est limitée par le fait que la capacité d'adsorption du bleu de méthylène diffère d'une argile à l'autre alors que le test ne permet pas de différencier les argiles. Mais heureusement la

diffractométrie de rayons X nous permet de savoir quelles sont les types d'argiles en présence et en majorité sur un site, si on suppose que le cutting échantillonné pour la diffractométrie nous donne une idée des types d'argiles en présence sur un site.

Figure 4.8 – Procédure du test de bleu de méthylène.

4.3.2. Détermination de la teneur en argile et la limite du test de bleu

La teneur en argile est déterminée par la quantité de bleu de méthylène V_{BS} (Valeur de bleu sols) exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbé pour 100 g de sols. Si la solution de bleu de méthylène utilisée a une concentration de 10 g/l (comme pour cette étude), on utilise l'équation 5.1 pour calculer V_{BS} (Tran, 1980).

$$V_{BS} = \left(\frac{V.10^{-4}}{M}\right) \tag{5.1}$$

avec : V = volume de la solution de bleu adsorbé (ml), M = masse de l'échantillon (g).

4.3.3. Échantillonnage et résultats des tests de bleu de méthylène

Échantillonnage

Les échantillons analysés ont été prélevés dans les cuttings des forages P3 (forage superficiel captant uniquement la ZA) de chaque site. Le forage P3 de certains sites étant plus profond, on a un nombre d'échantillons plus important sur ces sites. Les valeurs des paramètres géophysiques électriques (résistivité et chargeabilité) obtenues en diagraphie et correspondant aux profondeurs des cuttings sont présentées dans le tableau 4.3.

Résultats

Le tableau 4.3 présente les résultats des tests de bleu de méthylène réalisés sur les échantillons. L'incertitude sur les résultats des tests est estimée à environ 5 %. Elle représente l'imprécision au niveau du dosage : la quantité de bleu ajoutée par dosage étant de 5 ml et la baguette de verre étant graduée au cinquième de millilitre, on pourrait se retrouver, par imprécision, le cas échéant, avec des quantités de 4,8 ml ou 5,2 ml ce qui engendrerait une incertitude de + ou – 0,2 ml et qui représenterait 4 % de 5 ml. D'où une estimation de l'incertitude à 5 %.

Tableau 4.3 – Présentation des résultats issus des tests de bleu de méthylène.

Sites	Profondeur du cutting – forage P3 (m)	Volume de bleu (ml)	V_{BS} (g/100g)	Résistivité - rho (ohm.m)	Chargeabilité totale - M (mV/V)
ARA	8	20	0,67	71	13,0
	10	40	1,33	87	11,1
	12	24	0,80	84	9,1
	14	15	0,50	76	9,9
	16	20	0,67	80	9,2
	18	20	0,67	97	9,1
	20	10	0,33	103	11,1
	22	12	0,40	118	10,4
F68	10	13	0,43	400	26,4
	12	11	0,37	404	32,6
	13	10	0,33	330	34,3
	14	14	0,47	246	33,0
	16	17	0,57	190	23,7
	17	20	0,67	125	15,8
	18	19	0,63	153	17,2
	20	18	0,60	165	16,2
	22	18	0,60	254	17,5
	24	19	0,63	196	17,6
	26	21	0,70	206	15,6
FD19	8	27	0,90	184	11,7
	10	15	0,50	212	12,0
	12	12	0,40	198	12,0
	14	10	0,33	181	11,6
	16	7	0,23	141	11,8
	18	13	0,43	123	10,9
	20	19	0,63	131	11,3
	22	21	0,70	141	10,4
	24	26	0,87	134	12,2
	26	21	0,70	163	12,6
	28	14	0,47	281	14,3

	30	20	0,67	233	13,7
	32	14	0,47	247	15,6
FD30	6	10	0,33	150	29,7
	8	16	0,53	127	26,1
	10	20	0,67	108	23,0
	12	24	0,80	115	21,7
FD17	7	43	1,43	42	16,2
	8	47	1,57	38	9,6
	10	43	1,43	75	9,0
	12	30	1,00	105	14,5
F117	5	87	2,90	23	1,4
	6	93	3,10	25	2,9
	8	12	0,40	84	5,2
	10	12	0,40	146	7,9
	12	16	0,53	167	13,4
	14	10	0,33	181	12,1
	16	10	0,33	382	20,2
	18	24	0,80	96	6,7
	20	16	0,53	92	6,6
	22	16	0,53	82	6,9
	24	50	1,67	43	5,0
	25	45	1,50	41	3,7
	26	43	1,43	34	3,9
	27	48	1,60	38	3,7
	28	60	2,00	32	3,2

4.4. Autres paramètres utilisés : porosité de drainage et conductivité hydraulique

La porosité de drainage et la conductivité hydraulique ont été définies dans le chapitre 1 du présent manuscrit. Nous présentons ici les valeurs de ces paramètres que nous avons utilisés et qui ont été publiés dans Vouillamoz *et al.*, (2014). Ces valeurs ont été déterminées pour chacun des six sites LETS à l'issue des essais de pompage de longues durées (72h) réalisés. Le tableau 4.4 présente les valeurs de porosité de drainage et de conductivité hydraulique, et rappelle les valeurs médianes de résistivité et de chargeabilité totale précédemment obtenues sur chaque site pour la ZA et la ZFS. En considérant des mesures répétées à un même endroit, l'incertitude maximale sur les paramètres géophysiques a été calculée entre 4 à 10 % (augmentant avec la profondeur), nous avons retenu 10 % pour les représentations graphiques. Les incertitudes sur les valeurs de porosité de drainage et de conductivité hydraulique sont respectivement de 20 % et 40 % (Vouillamoz *et al.*, 2014).

Tableau 4.4 – Présentation des valeurs de porosité de drainage, de conductivité hydraulique et rappel des valeurs médianes de résistivité (ZA et FZS) et de chargeabilité totale (ZA).

Sites	Porosité de drainage ou Specific yield –Sy (%)	Conductivité hydraulique – K (m/s)	Résistivité – rho médiane (ohm.m)		Chargeabilité totale – M médiane (mV/V)
			ZA	ZFS	ZA
ARA	2,3	8.00E-07	90	315	10,5
F68	7,7	1.24E-05	206	816	18,0
FD19	5,0	9.55E-06	177	1300	12,0
FD30	6,6	1.08E-05	149	1282	22,9
FD17	3,2	3.58E-06	85	584	8,8
F117	1,7	6.82E-07	77	419	6,5

4.5. Présentation des relations obtenues

4.5.1. Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et, d'une part la porosité de drainage, d'autre part la conductivité hydraulique

Les médianes de chaque paramètre géophysique électrique (résistivité et chargeabilité) ont été mises en relation avec la porosité de drainage et la conductivité hydraulique (Figure 4.9).

Les relations obtenues sont des corrélations qui montrent en général que les résistivités médianes (de la ZA et de la ZFS) et les chargeabilités médianes (de la ZA) augmentent avec la porosité de drainage et la conductivité hydraulique. Plus précisément on voit que :

- les corrélations obtenues pour la ZA sont toujours légèrement meilleures que celles obtenues pour la ZFS (Figures 4.9a à 4.9d, la résistivité étant le seul paramètre géophysique que nous avons pour la ZA et la ZFS) ;
- les résistivités médianes de la ZA et de la ZFS sont mieux corrélées avec la conductivité hydraulique - K (respectivement R^2 = 0,91 et 0,77) (Figures 4.9b et 4.9d) qu'avec la porosité de drainage - Sy (respectivement R^2 = 0,85 et 0,61) (Figures 4.9a et 4.9c) ;
- la chargeabilité totale médiane de la ZA a sensiblement la même corrélation avec la porosité de drainage (R^2 = 0,77) qu'avec la conductivité hydraulique (R^2 = 0,74) (Figures 4.9e et 4.9f).

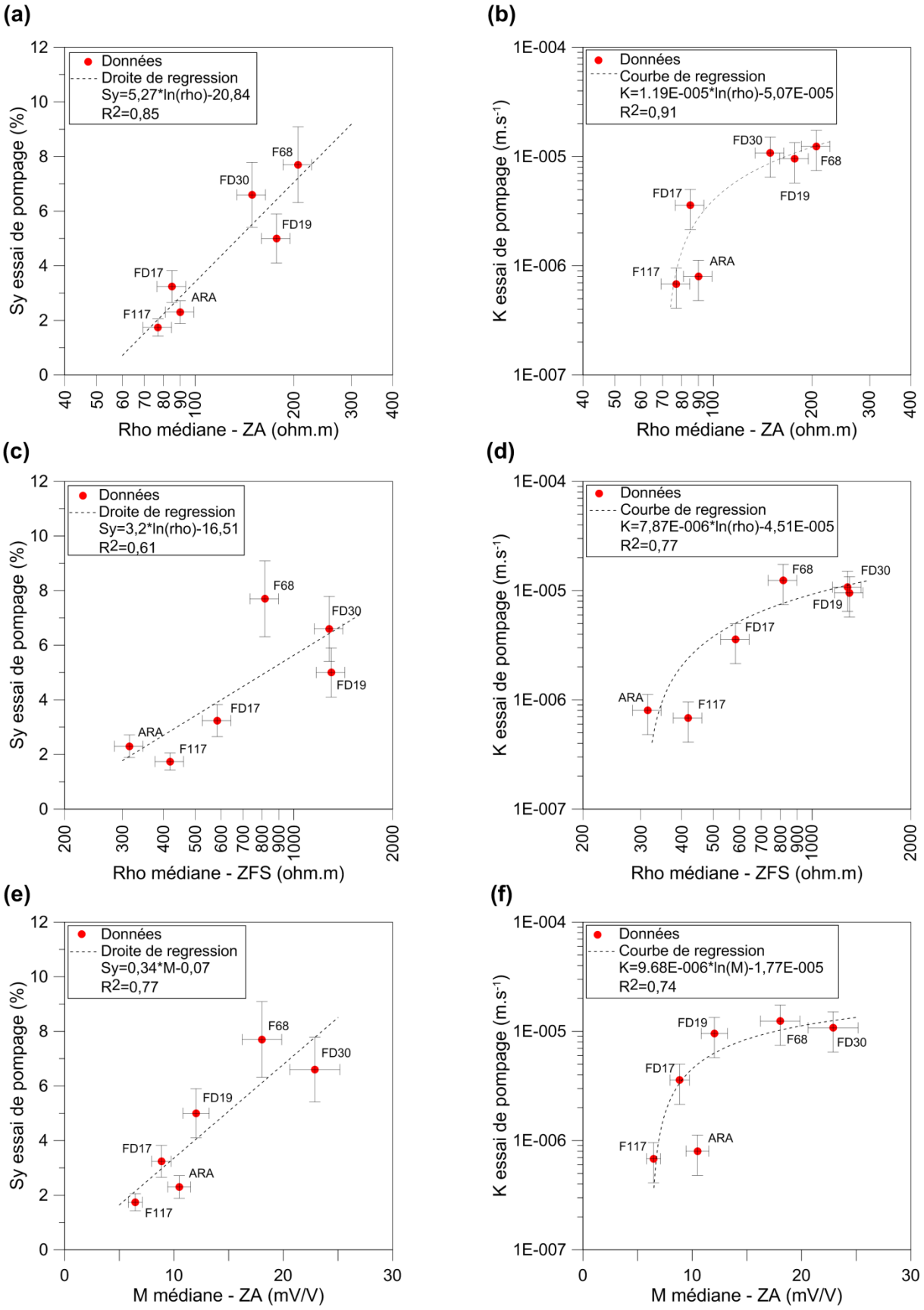


Figure 4.9 – Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et, d'une part la porosité de drainage, d'autre part la conductivité hydraulique. a) relation entre la résistivité médiane de

la ZA et la porosité de drainage ; b) relation entre la résistivité médiane de la ZA et la conductivité hydraulique; c) relation entre la résistivité médiane de la ZFS et la porosité de drainage ; d) relation entre la résistivité médiane de la ZFS et la conductivité hydraulique ; e) relation entre la chargeabilité totale médiane de la ZA et la porosité de drainage ; f) relation entre la chargeabilité totale médiane de la ZA et la conductivité hydraulique.

L'augmentation des paramètres hydrodynamiques avec les paramètres géophysiques électriques qu'on observe pourrait s'expliquer par le fait que des résistivités faibles dans la ZA et la ZFS traduiraient la présence d'altération argileuse alors que les résistivités fortes représenteraient des ZA et des ZFS (fissures/fractures) avec moins d'altération argileuse. Si l'on fait l'hypothèse de ce que l'eau gravitaire et sa circulation seraient réduites avec la présence d'argile existant entre les pores et fissures (Bisdom *et al.*, 1982), alors les relations obtenues entre paramètres géophysiques électriques et hydrodynamiques se justifient. Contrairement à la corrélation que nous avons entre la résistivité et la porosité de drainage, l'application de la loi d'Archie modifiée qui lie la porosité des sables à leur résistivité a toujours montré que la résistivité diminue normalement avec l'augmentation de la porosité de drainage. Cette opposition entre la loi d'Archie et les corrélations obtenues confirme qu'en présence d'argiles, la loi d'Archie n'est pas applicable. L'équation 2.4 de Simandoux (1963) qui intègre la résistivité surfacique de la fraction argileuse et son volume semble bien peu pratique pour lier aisément la porosité à la résistivité d'une roche argileuse.

Le fait que *(1)* les corrélations obtenues pour la ZA soient meilleures par rapport à celles de la ZFS, et *(2)* la résistivité électrique soit mieux corrélée avec la conductivité hydraulique qu'avec la porosité de drainage, pourrait s'expliquer par ce qui suit :

1- dans la ZA, la résistivité, la conductivité hydraulique et la porosité de drainage seraient contrôlées majoritairement par la présence d'argile qui influencerait fortement la circulation de l'eau, alors que dans la ZFS, cette influence ne serait pas majoritaire ; il y a aussi et surtout la roche elle-même qui change d'état avec la profondeur (passant de roche meuble à faiblement consolidée puis à consolidée), ce qui influence la résistivité dans un sens (croissance de la résistivité avec la profondeur) et les paramètres hydrodynamiques en sens inverse (diminution de la conductivité hydraulique et de la porosité de drainage avec la profondeur) (Lachassagne *et al.*, 2011).

2- la résistivité électrique et la conductivité hydraulique ont, dans leur définition, un point commun : la circulation de l'eau entre les pores, ce qui n'est pas tout-à-fait le cas de la porosité de drainage (qui serait plus influencée par la taille des pores).

Considérant les corrélations obtenues, une porosité de drainage et une conductivité hydraulique faibles (respectivement autour de 1 % et 5.10^{-7} $m.s^{-1}$) correspondent d'une part, à des résistivités de 60 ohm.m dans la ZA et à 300 ohm.m dans la ZFS, et d'autre part à des chargeabilités totales de 5 mV/V dans la ZA. Ces valeurs sont témoins de terrains non productifs et plus argileux (à confirmer dans la suite). Une porosité de drainage et une conductivité hydraulique fortes (respectivement autour de 10 % et 10^{-5} $m.s^{-1}$), fait assez rare en zone de socle, correspondent d'une part, à des résistivités de 400 ohm.m dans la ZA et à 2.000 ohm.m dans la ZFS, et d'autre part à des chargeabilités totales de 30 mV/V dans la ZA.

4.5.2. Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et la présence d'argile partant des résultats de diffractométrie de rayons X

En 4.2.3., les résultats des analyses au diffractomètre à rayons X ont été présentés et l'idée d'établir les relations entre les paramètres géophysiques et les argiles gonflantes et non gonflantes a été expliquée. Ces premières relations établies, bien qu'elles soient intéressantes, nous les considérons comme étant des tendances car, ne prenant en compte que 5 échantillons, elles doivent être regardées avec prudence.

Les tendances obtenues ci-dessous, entre les résistivités des échantillons et les teneurs en argile gonflante, non gonflante et totale (Figure 4.10), montrent que les argiles, selon leur type, n'influencent pas de la même façon la résistivité. Les argiles gonflantes (ici les smectites) influencent beaucoup la valeur résistivité : on voit une tendance forte qui existe entre la résistivité et la teneur en argile gonflante (Figure 4.10a), mais il n'y a pas de tendance flagrante entre la résistivité et, *(1)* les autres argiles non gonflantes et *(2)* la teneur en argile totale, à part le site F117 qui se démarque de l'ensemble des sites (Figure 4.10b et c). A part les argiles, le reste de l'échantillon est constitué de sable et donc, la figure 4.10c montre « inversement » que la résistivité n'est pas le bon paramètre pour estimer la teneur en sable, lorsqu'on est en présence d'argile gonflante qui apparemment est l'élément qui influence le plus la résistivité : *(1)* les échantillons qui contiennent de l'argile gonflante (Ara, FD30 et F117) ont systématiquement les résistivités les plus faibles bien que les teneurs en argile

gonflante soient inférieures à 10 % ; *(2)* lorsqu'on compare les sites FD30 et F68, on remarque que pour des taux en argile totale et inversement en sable, sensiblement égaux (respectivement 80,03 % et 19.99 % pour FD30 et 79,91 % et 20,09 % pour F68), FD30 a une résistivité plus faible (149 ohm.m) que celle de F68 (206 ohm.m) de 30 %, apparemment parce que FD30 a seulement moins de 2 % d'argile gonflante (smectite) et que F68 n'en a pas.

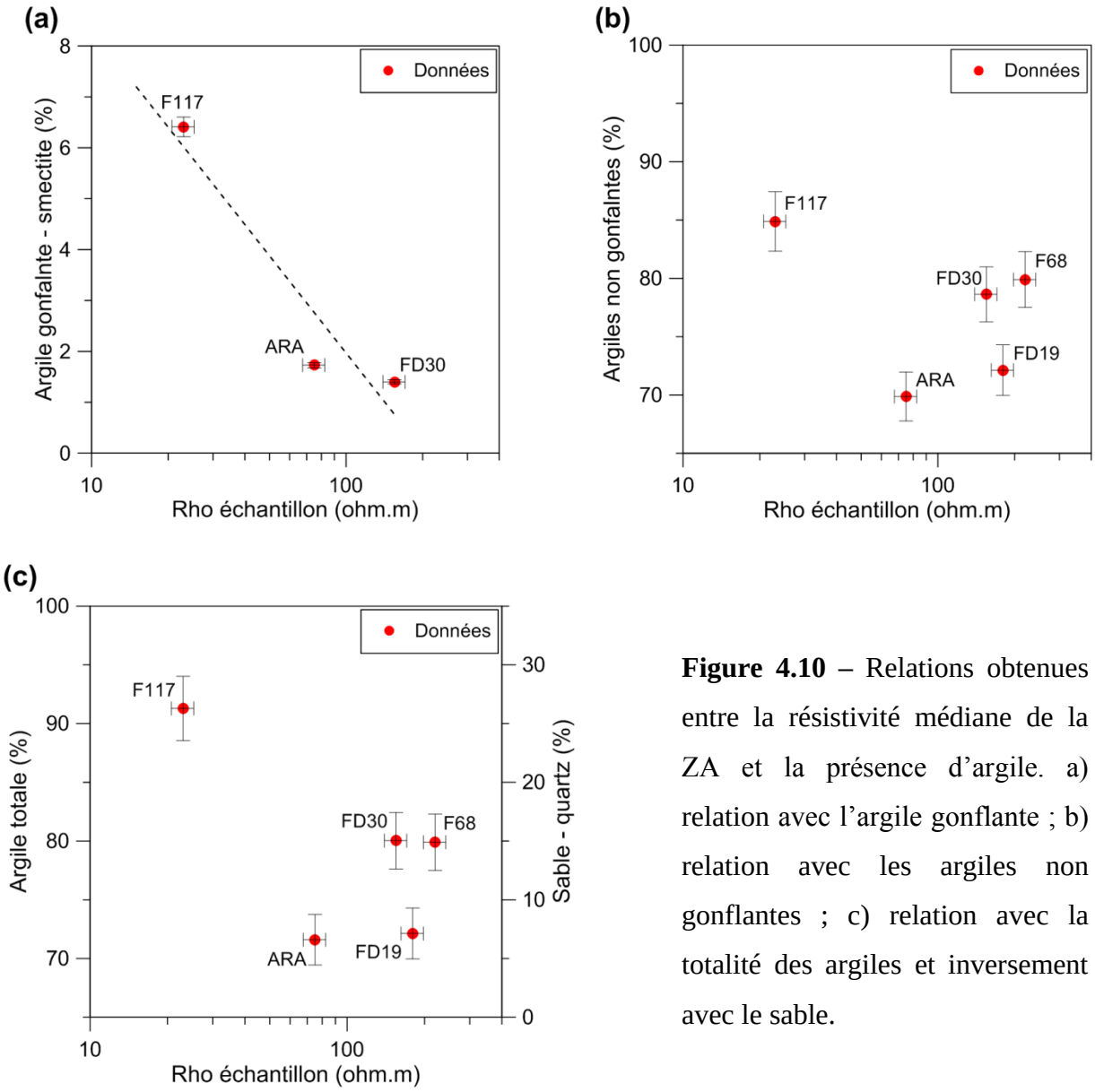


Figure 4.10 – Relations obtenues entre la résistivité médiane de la ZA et la présence d'argile. a) relation avec l'argile gonflante ; b) relation avec les argiles non gonflantes ; c) relation avec la totalité des argiles et inversement avec le sable.

Les précédentes tendances sont obtenues cette fois-ci avec le deuxième paramètre géophysique, la chargeabilité totale (Figure 4.11). On voit des résultats similaires à ceux obtenus avec la résistivité. L'argile gonflante influence également la chargeabilité totale (Figure 4.11a) tandis qu'il n'y a quasiment pas de relation (encore moins flagrante qu'avec la

résistivité) avec la teneur en argile non gonflante (Figure 4.11b), en argile totale et inversement en sable (Figure 4.11c).

On note que les trois sites contenant de l'argile gonflante ne sont pas tous ceux qui ont les chargeabilités totales les plus faibles (seulement Ara et F117). La différence entre les sites FD30 et F68 observée avec la résistivité, ne l'est pas ici avec la chargeabilité totale. La résistivité serait donc plus sensible à la présence d'argile gonflante que la chargeabilité totale. Et cela ne va pas dans le sens de l'hypothèse posée au départ sur le fait que la chargeabilité serait influencée par la teneur en argiles. Il est possible que la structure du sol influence aussi (*i.e.* la dissémination des argiles dans le sol, qui n'est étudiable qu'avec des échantillons non remaniés [carottes] et non des cuttings).

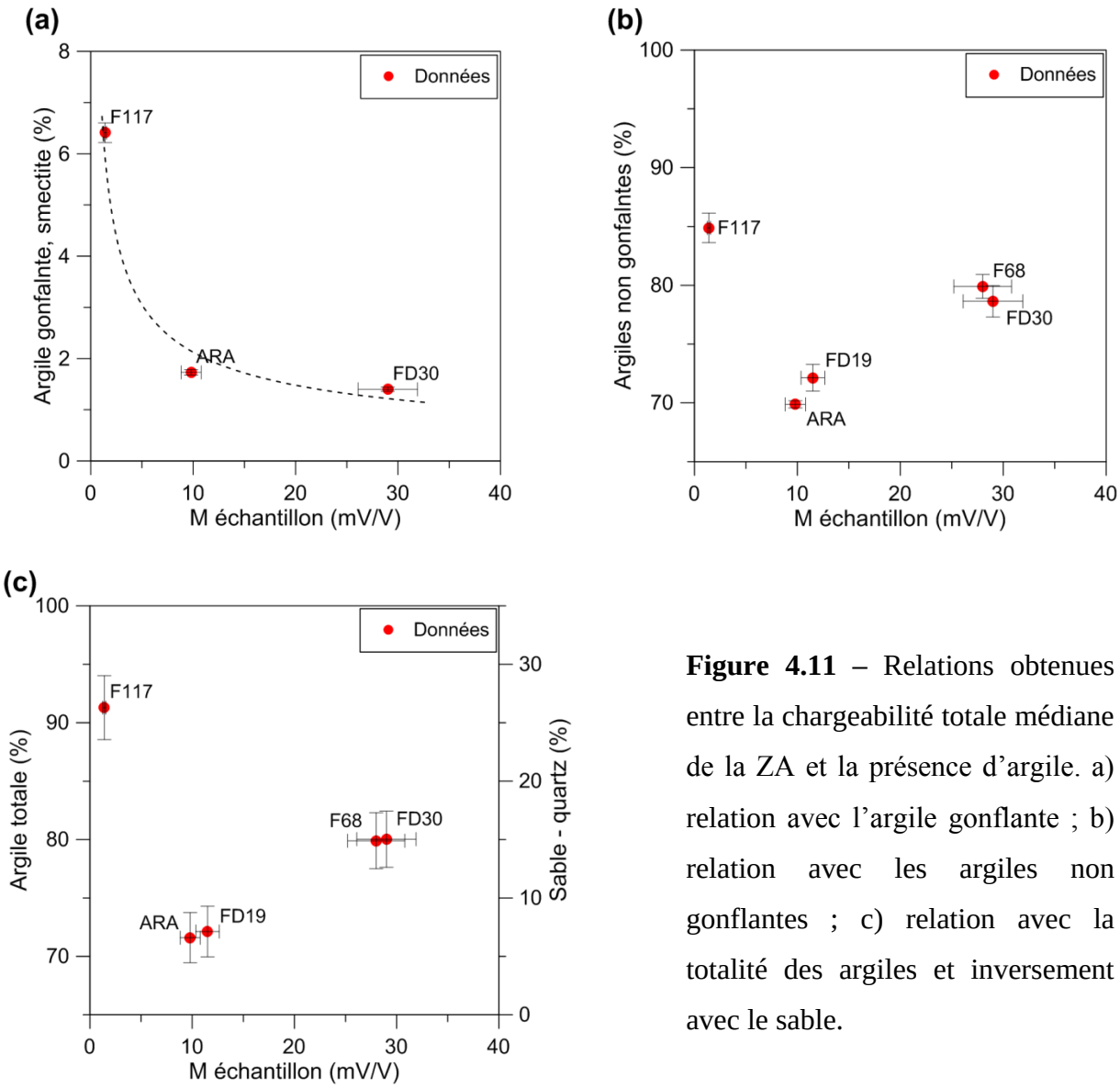


Figure 4.11 – Relations obtenues entre la chargeabilité totale médiane de la ZA et la présence d'argile. a) relation avec l'argile gonflante ; b) relation avec les argiles non gonflantes ; c) relation avec la totalité des argiles et inversement avec le sable.

4.5.3. Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et les valeurs de bleu sols (V_{BS})

La sensibilité du test de bleu de méthylène aux argiles gonflantes est confirmée par les relations obtenues entre la valeur de bleu sols (V_{BS}) et les paramètres géophysiques (Figure 4.12). On remarque que les sites pour lesquels les échantillons analysés au diffractomètre à rayons X indiquent la présence d'argile gonflante (F117, Ara et FD30), les V_{BS} pour ces sites sont les plus importants. Leurs valeurs de résistivité et de chargeabilité totale sont les plus faibles surtout pour F117 qui a la teneur en argile gonflante la plus forte (on ne considère pas les V_{BS} du site FD17 n'ayant pas eu d'échantillon analysé au diffractomètre à rayons X).

La sensibilité du test de bleu de méthylène à la teneur en argile totale n'est cependant pas flagrante : A part le site F117, les 4 autres sites dont les échantillons ont été analysés au diffractomètre à rayons X et pour lesquels les teneurs en argile totale varient entre 70 et 80 % sont tous regroupés entre des V_{BS} de 0 et 1 g/100g sans distinction nette. Seuls les V_{BS} du site F117 se démarquent de l'ensemble (on ne considère toujours pas les V_{BS} du site FD17).

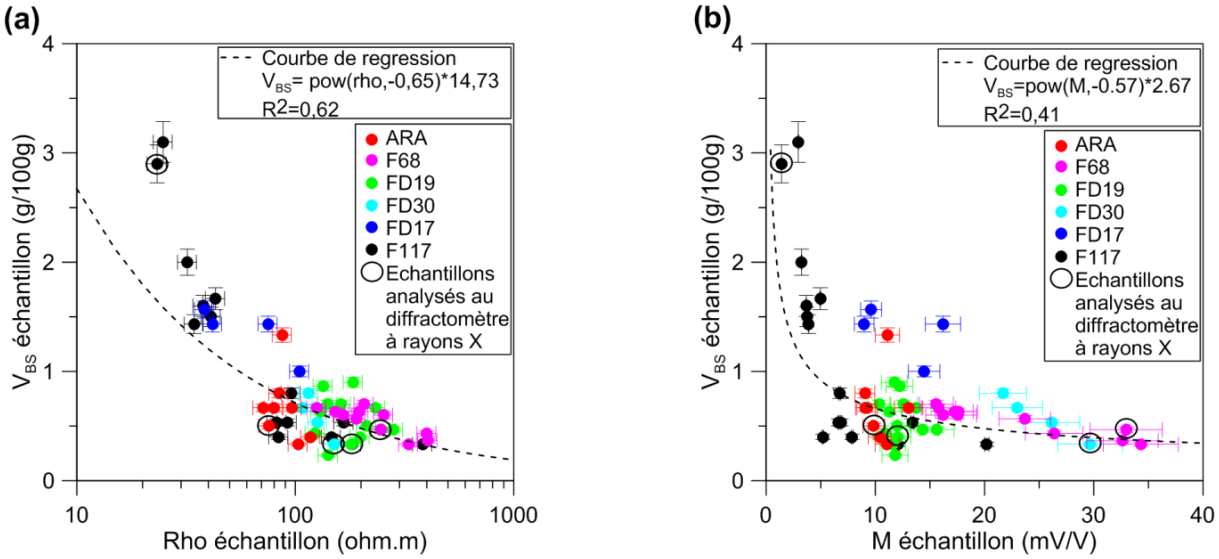


Figure 4.12 – Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et la présence d'argile via le test de bleu de méthylène. a) relation entre la résistivité médiane de la ZA et la V_{BS} ; b) relation entre la chargeabilité totale médiane de la ZA et la V_{BS}.

Les remarques faites ci-dessus sur le comportement de la V_{BS} face aux argiles, sont étayées par les relations présentées ci-dessous entre les V_{BS} et les teneurs en argile gonflante, en argiles non gonflantes, en argile totale et inversement en sable, pour les échantillons analysés au diffractomètre à rayons X (Figure 4.13). Les V_{BS} sont très fortement liés à la teneur en argile gonflante : on observe une très forte tendance entre les V_{BS} et les teneurs en argile gonflante (Figure 4.13a, R^2=0,99). L'absence de relation et la démarcation du site F117 sont bien observées pour les argiles non gonflantes, l'argile totale et inversement le sable (Figures 4.13b et 4.13c). Ces résultats sont concordants car le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles gonflantes (smectites). Les autres argiles (illites et kaolinites) qui ne sont pas gonflantes sont peu sensibles au bleu de méthylène.

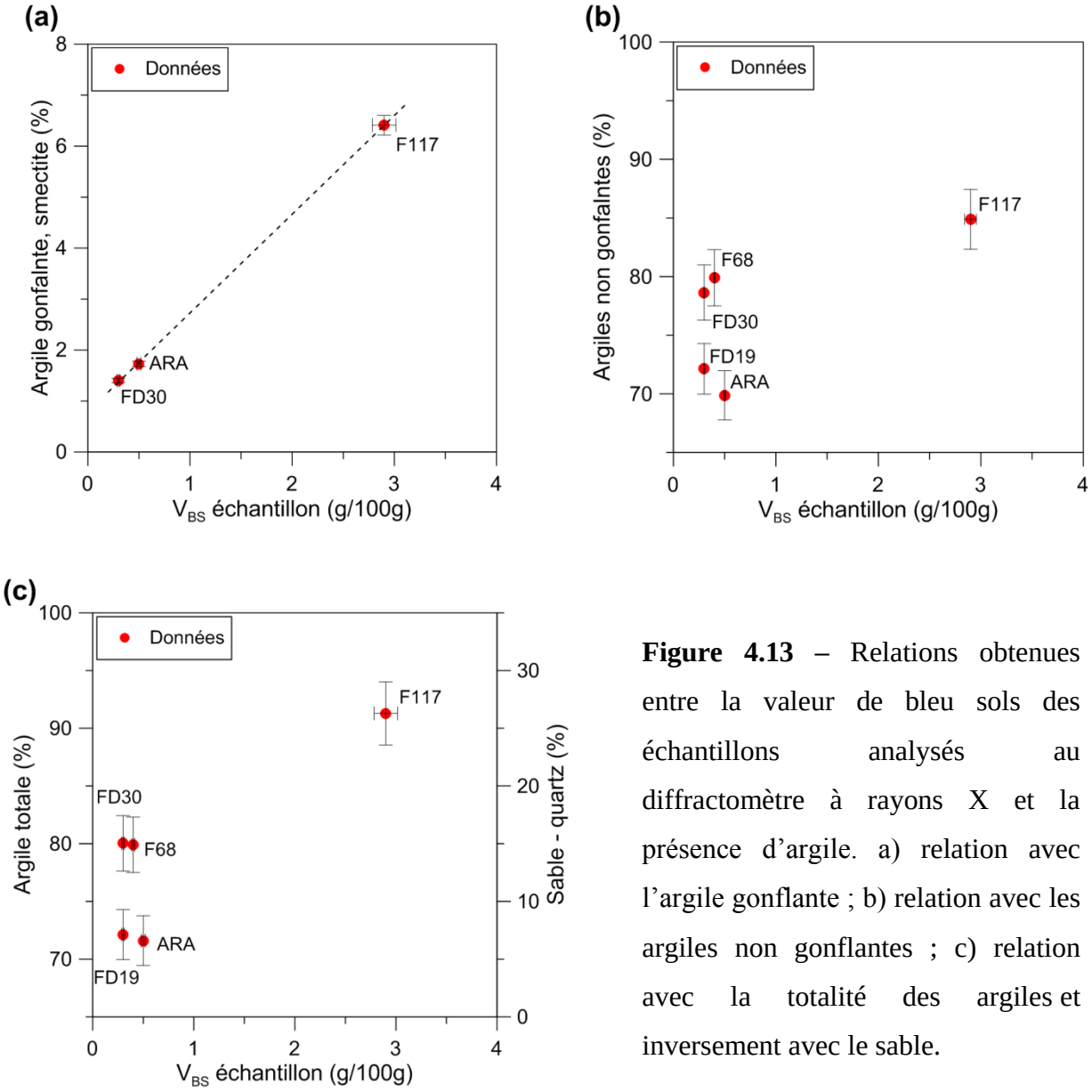


Figure 4.13 – Relations obtenues entre la valeur de bleu sols des échantillons analysés au diffractomètre à rayons X et la présence d'argile. a) relation avec l'argile gonflante ; b) relation avec les argiles non gonflantes ; c) relation avec la totalité des argiles et inversement avec le sable.

Conclusion partielle

Dans le but d'apporter des informations supplémentaires aux hydrogéologues via la mesure des paramètres géophysiques électriques, une recherche de lien a été menée entre ces derniers paramètres et les paramètres hydrodynamiques en utilisant des données géophysiques mesurées en forages (valeurs "vraies") et des données hydrodynamiques issues d'essais de pompage de longue durée, ainsi que des teneurs en argiles issues d'analyses au diffractomètre à rayons X et au test de bleu de méthylène. Les points suivant sont retenus.

- Les résistivités médianes (entre 60 et 400 ohm pour la ZA et entre 300 et 2.000 ohm.m pour la ZFS) et la chargeabilité totale médiane de la ZA (entre 5 et 30 mV/V) sont positivement corrélées avec la porosité de drainage (entre 1 et 10 %) et la conductivité hydraulique (entre 5.10^{-7} et 10^{-5} $m.s^{-1}$).
- Les corrélations obtenues entre les paramètres géophysiques électriques et hydrodynamiques pour la ZA sont légèrement meilleures à celles de la ZFS, la résistivité étant le seul paramètre géophysique que nous avons pour la ZA et la ZFS.
- La résistivité est mieux corrélée avec la conductivité hydraulique, qu'avec la porosité de drainage ;
- La chargeabilité totale médiane de la ZA pourrait être utilisée comme paramètre de confirmation dans la caractérisation de la ZA car elle évolue avec les paramètres hydrodynamiques (comme la résistivité) mais avec des corrélations moins bonnes.
- Sur les mêmes intervalles de résistivités et de chargeabilités totales dans la ZA (60 à 400 ohm.m et 5 à 30 mV/V), c'est la teneur en argile gonflante qui influence le plus les variations de ces paramètres géophysiques : la résistivité et la chargeabilité diminuent avec la présence d'argile gonflante (smectites).

L'hypothèse N°3 selon laquelle, les paramètres géophysiques électriques sont certainement liés à certains paramètres hydrodynamiques et à la présence d'argile est vérifiée. De tout ce qui précède (du chapitre 1 à 4), on déduit que la cible hydrogéologique n'est pas seulement une ZA+ZFS épaisse mais aussi une ZA qui a une résistivité comprise entre 150 et 400 ohm.m et une ZFS qui a une résistivité comprise entre 800 et 2.000 ohm.m correspondant aux valeurs élevées des paramètres hydrodynamiques. Ainsi, le cahier des charges du géophysicien se précise pour caractériser la cible depuis la surface. Est-ce que les techniques de la méthode électrique permettent de caractériser la cible depuis la surface du sol ?

Chapitre 5

Comparaison des techniques de prospection électrique par modélisation numérique

Introduction

La pertinence d'utiliser le paramètre résistivité électrique pour la caractérisation de la cible hydrogéologique étant validée (plus discriminante que la chargeabilité), il s'agit ici d'évaluer la capacité des différentes techniques de mesure de résistivité de la méthode électrique employées depuis la surface à caractériser la cible. Les différentes techniques évaluées sont le Profil Electrique – PE, le Sondage Electrique – SE qui sont traditionnelles, et la Tomographie de Résistivité Electrique – ERT (acronyme anglais communément utilisé pour « Electrical Resistivity Tomography ») qui est plus élaborée.

La modélisation numérique permet d'évaluer les capacités d'application d'un outil sur un objet en simulant son application sur différentes représentations possibles de l'objet suivant différents scénarios tout en prenant en compte certaines réalités inhérentes à l'application de l'outil. Afin de dégager les insuffisances, limites et avantages des trois techniques de prospection électrique pour l'implantation de forage d'eau en zone de socle en milieu tropical, une modélisation numérique est conduite dans ce chapitre, pour simuler les résultats d'application de ces techniques suivant différentes configurations ou géométries du sous-sol (modèles), tout en prenant en compte le bruit de mesure, l'erreur de positionnement de dispositif, etc. La capacité des trois techniques à caractériser la cible hydrogéologique depuis la surface est ainsi testée dans un environnement de roches de socle à altération développée (*e.g.* Chandra *et al.*, 2010; Descloitres *et al.*, 2011, 2008; Seaton *and* Burbey, 2002).

Après une présentation succincte du processus adoptée pour la modélisation numérique, la construction des modèles et la génération des données ainsi que leur traitement sont détaillés. Ensuite les résultats sont présentés, et on termine par une inter-comparaison des techniques.

5.1. Méthodologie mise en œuvre

La Figure 5.1 ci-dessous présente la démarche méthodologique adoptée pour la modélisation numérique.

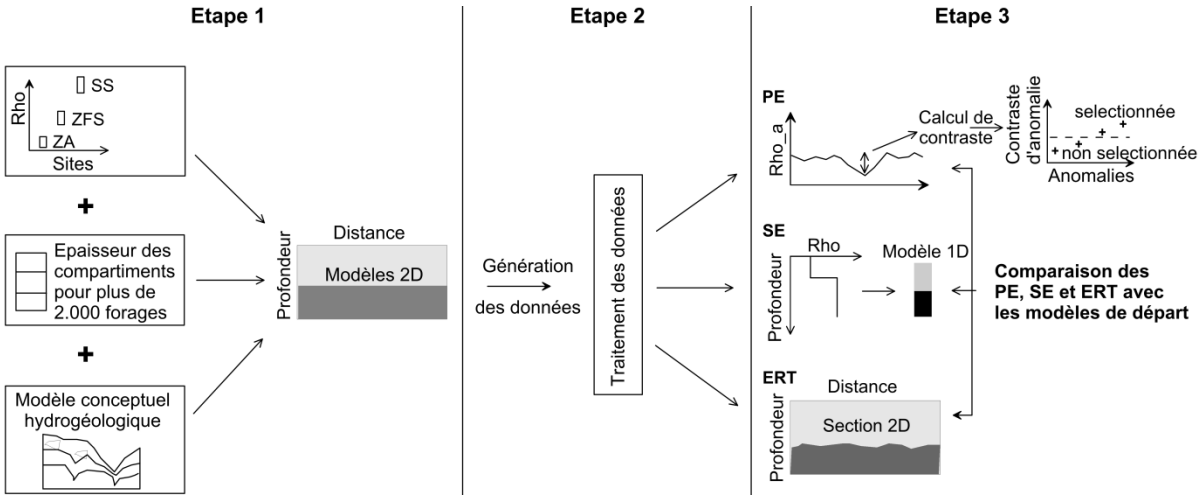


Figure 5.1 – Schéma descriptif de la démarche méthodologique de la modélisation numérique.

- **Etape 1** : Construction des modèles 2D du sous-sol.

  On part de 3 types d'informations pour construire les modèles 2D du sous-sol :
  - les gammes de valeurs de résistivité pour chaque compartiment ;
  - les épaisseurs statistiques des compartiments hydrogéologiques ;
  - le modèle conceptuel hydrogéologique.

- **Etape 2** : Application de chaque technique (PE, SE, ERT) sur les modèles construits :
  - les trois techniques sont appliquées sur chaque modèle ;
  - les données synthétiques sont générées pour chaque technique ;
  - les données synthétiques sont traitées pour obtenir les résultats.

- **Etape 3** : Obtention des résultats et comparaison des différentes techniques :
  - on présente les résultats et on évalue la capacité de chaque technique à représenter le modèle numérique de départ ;
  - on compare la capacité des différentes techniques ;
  - on déduit les forces et limites de chaque technique.

5.2. Construction des modèles numériques 2D

5.2.1. Modèles de base : Géométries 1D

Partant d'un modèle tabulaire simplifié du sous-sol qui représente les 3 compartiments hydrogéologiques ZA, ZFS et SS, avec des valeurs de résistivités respectives de 150, 800 et 8.000 ohm.m obtenues par diagraphies (voir chapitre 3), quatre modèles tabulaires ont été considérés comme des géométries de base en augmentant la profondeur du Socle Sain (SS) de 10 m à 32, 48 et 64 m. Ces profondeurs correspondent aux fréquences cumulées de 10 %, 25 %, 50 % et 75 % de la profondeur du SS, telles qu'observées dans la base de données nationale du Bénin des forages réalisés en zone de socle. L'épaisseur de l'ensemble ZA+ZFS a ensuite été divisée en utilisant un rapport de 0,6 représentant le rapport entre les épaisseurs ZA et ZFS obtenues dans la base de données. Ce ratio est observé dans 70 % des forages de la base de données nationale du Bénin (Tableau 5.1) et est également décrit ailleurs dans le monde pour les profils d'altération non érodée (voir Dewandel *et al.*, 2010; Lachassagne *et al.*, 2011). Finalement, un sol sec ou latéritique de 2 m d'épaisseur et de 1.000 ohm.m (valeur issue de mesures sur affleurements, en diagraphie) a été ajouté au-dessus de chaque modèle (*e.g.* Chilton *and* Foster, 1995; Comte *et al.*, 2012; Maignien, 1958) pour représenter la partie non-saturée.

Nous avons ainsi 4 géométries de base à une dimension (1D) numérotées 1, 2, 3 et 4 (Tableau 5.1).

Tableau 5.1 – Géométries tabulaires de base (source : 2.122 forages de la base de données nationale de la Direction Générale de l'Eau).

Géométrie tabulaire de base (1D)	Epaisseur ZA	Epaisseur ZFS	Toit du socle	Fréquence cumulée	Rapport ZA /ZFS
1	4 m	6 m	10 m	10 %	0,6
2	12 m	20 m	32 m	25 %	
3	18 m	30 m	48 m	50 %	
4	24 m	40 m	64 m	75 %	

5.2.2. Modèles complexes représentant les structures du sous-sol en zone de socle en milieu tropical : géométries 2D

Pour rendre les modèles plus conformes à la réalité rencontrée dans les zones de socle à altération épaisse, les modèles tabulaires sont rendus plus complexes par l'ajout de structures ayant des géométries 2D. Nous avons construit 4 catégories de structures inspirées des réalités rencontrées sur le terrain, mais simplifiées et qui se retrouvent dans le modèle conceptuel hydrogéologique.

- **La catégorie de structure A** représente une zone de fracturation subverticale non altérée d'origine tectonique ou de discontinuité géologique, souvent recherchée préférentiellement par les prospecteurs praticiens. Nous avons montré que, contrairement aux présuppositions de ces derniers, elle n'est pas la cible à privilégier dans notre contexte de socle (voir chapitre 1). Sa présence est par contre un contexte favorable au développement d'un large approfondissement de la ZA+ZFS, qui devient la cible à privilégier. Nous avons néanmoins choisi de modéliser ce type de fracturation sans considérer un cortège d'altération environnant, de manière à savoir si ce type de structure est détectable en elle-même. La largeur de la fracturation est augmentée de 2 m à 5 et 10 m (voir Olorunfemi *and* Fasuyi, 1993). Considérant que la plupart des fractures tectoniques ont un fort pendage (Lachassagne *et al.*, 2011) le pendage de la fracture subverticale non altérée est de 80° et maintenu constant. La résistivité de la zone de fracturation est 1.000 ohm.m telle que mesurée en diagraphie.

- **La catégorie de structure B** représente un élargissement de l'approfondissement localisé de la ZA et de la ZFS engendré par une altération préférentielle au droit d'une zone de fracturation de catégorie A ou d'une discontinuité géologique (voir modèle conceptuel au chapitre 1). La largeur de l'ensemble de l'approfondissement ZA+ZFS est progressivement augmentée de 5 m à 10, 20, 50 et 100 m comme observée sur les sections de résistivité électrique réalisées.

- **La catégorie de structure C** représente un changement latéral de la teneur en argile de la ZA. La largeur de la zone argileuse est progressivement augmentée de 20 m à 50 et 100 m, et sa valeur de résistivité va de l'argile aux sables argileux, *i.e.* de 20 ohm à 50 et 100 ohm.

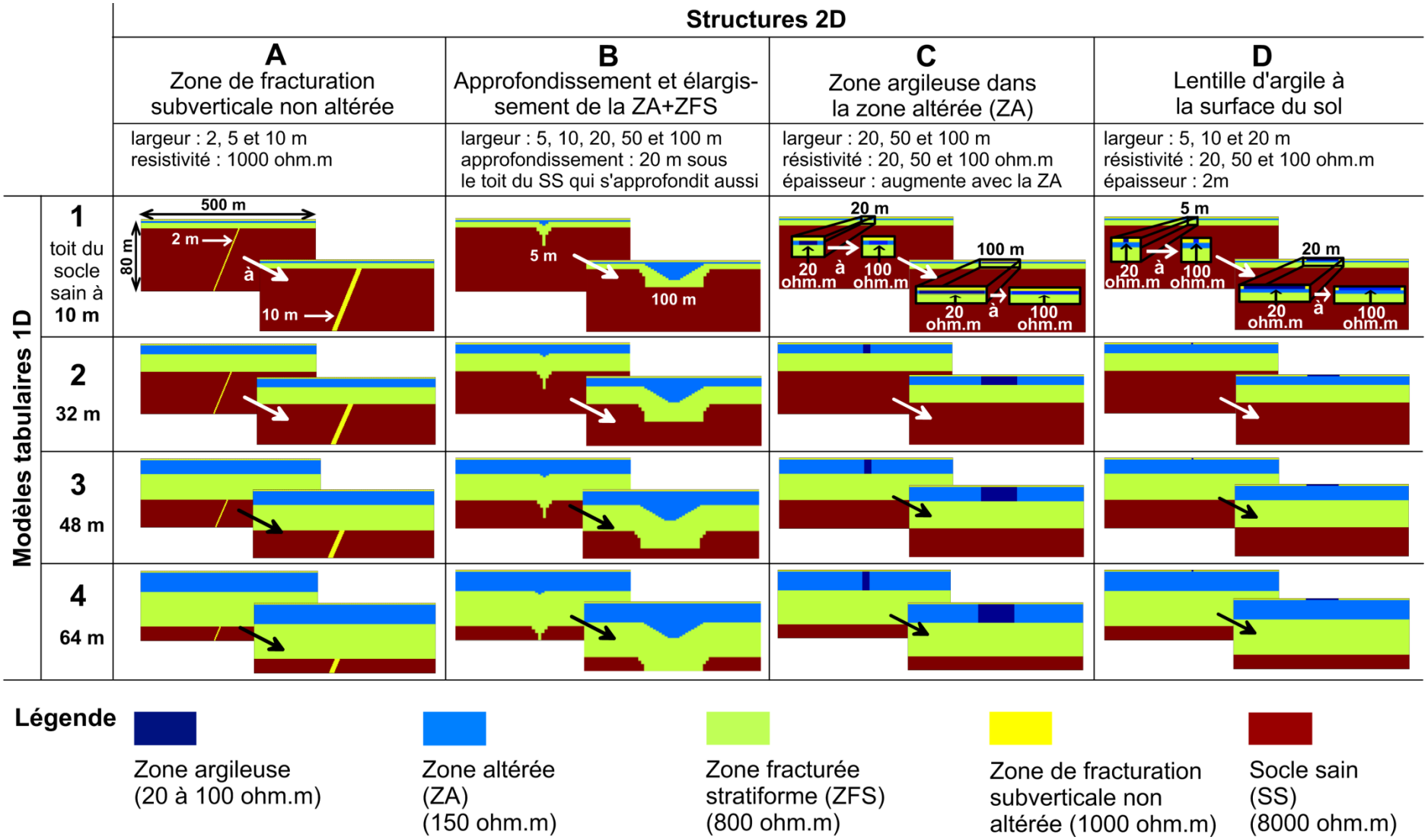


Figure 5.2 – Modèles numériques utilisés pour la modélisation (104 modèles).

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

- **La structure D** est une mince lentille argileuse superficielle d'une épaisseur de 2 m. La largeur de cette lentille argileuse est progressivement augmentée de 5 m à 10 et 20 m, et sa résistivité de 20 ohm à 50 et 100 ohm.

En tout, 104 modèles de 500 m de longueur et de 80 m de profondeur ont ainsi été construits (Figure 5.2).

5.3. Génération et traitement des données

5.3.1. Génération des données

Le calcul numérique des données de résistivité apparente a été réalisé à l'aide du logiciel DC2D (voir Günther, 2004). Des pseudo-sections synthétiques 2D de résistivités apparentes ont été générées pour avoir les données d'ERT et aussi pour en extraire les données de PE et de SE. Afin d'obtenir des données synthétiques similaires aux données de terrain obtenues au Bénin et en Afrique de l'Ouest, les données ont été générées avec des dispositifs d'électrodes couramment utilisés sur le terrain. Les données de PE ont été extraites pour les deux dispositifs Schlumberger (200 m de longueur de ligne : AB/2 = 100 m, fréquemment utilisées) et Wenner (150 m de longueur de ligne : AB/3 = 50 m, parfois utilisé au Bénin). D'autres espacements d'électrodes peuvent être envisagés car ils pourraient fournir une meilleure capacité à détecter l'anomalie. Mais pour cela les praticiens doivent effectuer plusieurs PE sur le même site (plus de temps de travail et une augmentation du coût de l'implantation), ce qui est très rarement fait. Nous avons donc choisi d'étudier uniquement les longueurs de profils standards. Les SE ont été simulés uniquement avec le dispositif Schlumberger, car les autres dispositifs ne sont pas couramment utilisés par les praticiens. La modélisation ERT a été réalisée en simulant 96 électrodes avec un espacement de 5 m entre les électrodes. Les dispositifs Wenner, dipôle-dipôle et pôle-dipôle ont été utilisées pour les simulations d'ERT (voir Barker *and* Moore, 1998). Le pôle-dipôle est utilisé pour obtenir une meilleure profondeur de pénétration dans les zones très altérées (argileuses) en surface. Enfin, un bruit de 1 % a été ajouté aux données modélisées pour prendre en compte des conditions de terrain plus réalistes. En tout, 416 jeux de données synthétiques (Shlumberger, Wenner, dipôle-dipôle et pôle dipôle) ont été créés en utilisant les 104 modèles synthétiques.

5.3.2. Analyse et traitement des données

208 PE ont été obtenus. Afin de se conformer aux situations réelles, nous avons choisi de sélectionner les anomalies supposées intéressantes par les praticiens. Pour cela nous avons analysé la façon dont les praticiens implantent les forages en routine en zone de socle au Bénin en étudiant des PE réels extraits des rapports des bureaux d'études. En routine, ils repèrent des anomalies qui correspondent à des baisses de résistivités apparentes (voir Figure 2.7). Au droit de ces anomalies, ils supposent être en présence d'une fracturation tectonique.

Pour 410 anomalies obtenues sur des PE réalisés par des bureaux d'études sur l'ensemble de la zone de socle béninoise et sélectionnées pour y réaliser des SE, on voit que :

- les résistivités apparentes minimales varient d'environ 30 à 2.000 ohm.m (Figure 5.3). Il n'y a donc pas une valeur de résistivité apparente minimale recherchée pour la réalisation du SE, seule la présence d'une anomalie relative compte.
- une équation linéaire (Equation 5.1) définit le rapport minimal (contraste) entre la valeur de résistivité de la partie plane du profil juste avant ou juste après l'anomalie, et la valeur de résistivité inférieure située au cœur de l'anomalie (Figure 5.3) : les anomalies ne sont choisies que si elles ont un contraste minimum de 1,4.

$$\text{rho max} = 1{,}4 \text{ rho min} \tag{5.1}$$

avec : rho max = résistivité maximale ; rho min = résistivité minimale,

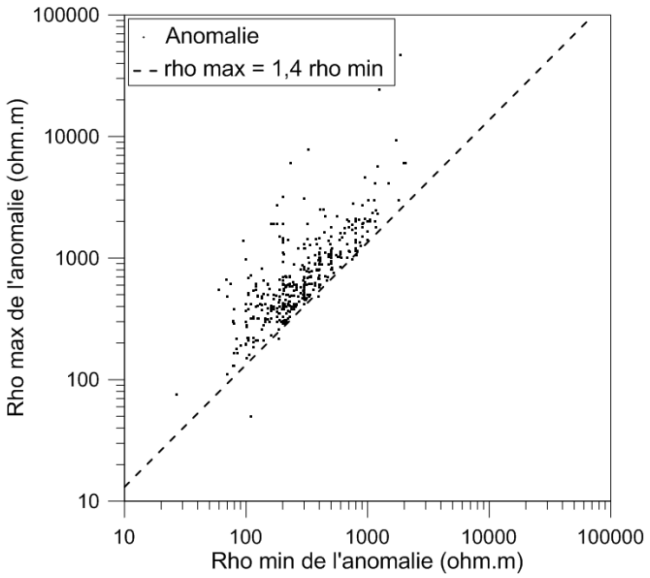


Figure 5.3 – Résistivités minimales et maximales des anomalies de profils électriques.

Ce facteur de seuil de 1,4 est proche de la valeur de 1,5 considérée comme intéressante pour l'implantation de forage en zone de socle d'Afrique de l'Ouest (CIEH, 1984).

En considérant qu'en plus du contraste, la largeur de l'anomalie peut être aussi un critère de choix, pour le même jeu de données que précédemment, il est présenté un graphe qui met en relation l'amplitude des contrastes et la largeur des anomalies (Figure 5,4). Ce graphe montre qu'il n'y a pas une relation entre le contraste et la largeur de l'anomalie. Nous constatons donc que des anomalies ayant un même contraste mais des largeurs complètement différentes peuvent être sélectionnées. Cela signifie que la forme de l'anomalie au point sélectionné pour le forage n'est pas un critère de choix, bien que plusieurs auteurs définissent des formes d'anomalies en PE qui pourraient être productives (CIEH, 1984; Dieng *et al.*, 2004).

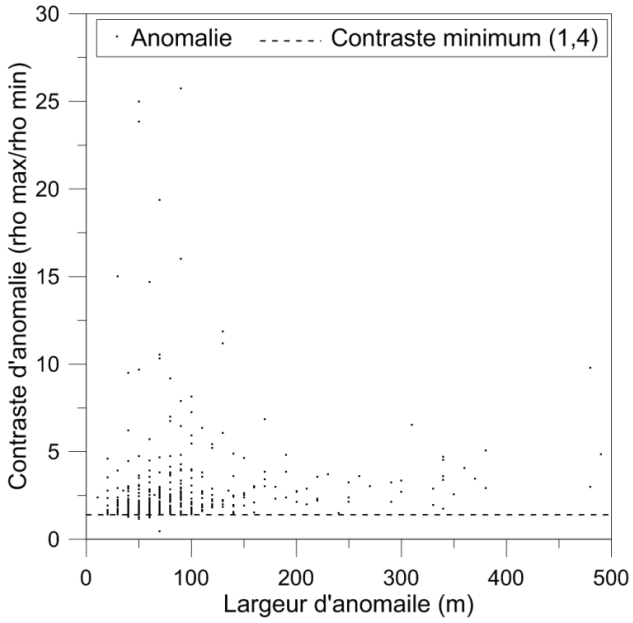


Figure 5.4 – Contrastes de résistivité en fonction de la largeur des anomalies de profils électriques.

Nous avons appliqué ces considérations pour les PE obtenus par modélisation numérique. Ainsi, les anomalies obtenues ont été considérées comme dignes d'intérêt uniquement lorsque la résistivité diminue d'un facteur supérieur à 1,4. Nous avons alors inter-comparé les résultats des différents dispositifs appliqués, en considérant l'amplitude des contrastes des anomalies obtenues pour chacun d'eux.

Les données de SE ont été interprétées à l'aide du logiciel IX1D (voir Interpex Ltd, 2002) avec une hypothèse d'inversion de modèle 1D. L'inversion des pseudo-sections synthétiques ERT a été faite en utilisant le logiciel DC2D. La capacité du SE et de l'ERT, après traitement (inversion) à restituer la réalité est appréciée par comparaison avec les modèles de départ tout en respectant la qualité mathématique du traitement. Cette dernière est appréciée par analyse des critères comme le « RMS » ou le « Chi2 ». Pour les sondages, les notions d'équivalence ont été également prises en compte (voir chapitre 2).

5.4. Résultats et inter-comparaisons

5.4.1. Profils électriques (PE)

Les résultats des différents PE obtenus en utilisant les dispositifs Schlumberger et Wenner sont présentés dans la figure 5.5.

- **La structure A**, *i.e.* zone de fracturation subverticale non altérée, ne produit aucune anomalie sur le PE quelles que soient sa largeur et la profondeur de la roche non altérée entourant cette fracturation (Figure 5.5a). Même une zone de fracturation subverticale non altérée, d'une épaisseur de 10 m, située à faible profondeur (*i.e.* 10 m de profondeur) ne peut pas être identifiée à partir d'un PE. Ces résultats montrent qu'**une zone de fracturation subverticale dans la roche non altérée ne peut pas être révélée par la technique du PE**. Ceci est un résultat important issu de la modélisation numérique, il a des implications majeures pour la communauté des hydrogéologues. Si la zone de fracturation subverticale non altérée est plus large que 10 m, le modèle devient similaire à la structure B.

- **La structure B**, *i.e.* approfondissement et élargissement de la ZA+ZFS (appelée unité altérée), engendre une anomalie de forme arrondie et peut être relativement intéressante pour l'hydrogéologue lorsqu'on considère que, l'approfondissement, à un endroit donné, de la ZA et de la ZFS, permet d'avoir des épaisseurs plus importantes de la ZA et de la ZFS à cet endroit. Ces dernières seront encore plus importantes à mesure que le toit du socle s'approfondit (Figure 5.5b). On constate que dans tous les cas, *une unité altérée de moins de 20 m de large ne peut pas être identifiée comme une*

situation sélectionnable. Plus important encore, *une situation d'approfondissement et d'élargissement de l'unité altérée ne peut pas être sélectionnée lorsque le SS est à plus de 35 m de profondeur*. Ce résultat de modélisation montre qu'une **altération préférentielle profonde peut ne pas être révélée par le PE mis en œuvre avec les dispositifs d'électrodes communs utilisés dans cette étude** et par les praticiens en très grande majorité.

- **La structure C**, *i.e.* une zone argileuse à l'intérieur de la ZA, entraîne toujours des anomalies sélectionnables très nettes avec le dispositif Schlumberger (Figure 5.5c). Ces anomalies, pour la plus petite taille de zone argileuse prise en compte dans la construction des modèles (*i.e.* 20 m de large correspondant à l'écartement des électrodes MN avec une résistivité de 20 ohm.m), engendrent les contrastes les plus importants. Lorsqu'on utilise le dispositif Wenner, l'anomalie est plus lissée et sera identifiée comme sélectionnable seulement si la résistivité de la zone argileuse est trois fois inférieure à la résistivité de la ZA environnante.

- **La structure D**, *i.e.* une mince plaque ou lentille argileuse située à la surface du sol, entraîne toujours des anomalies sélectionnables très prononcées. Ces anomalies, pour la plus petite taille de la plaque argileuse prise en compte dans la construction des modèles (*i.e.* 20 m de large avec une résistivité de 20 ohm.m), engendrent les contrastes les plus importants de toutes les structures modélisées (contrastes supérieurs à 5) (Figure 5.5d). Même en considérant une faible teneur en argile de 100 ohm.m, dans tous les cas, les PE obtenus avec un dispositif Schlumberger génèrent toujours des anomalies avec un contraste sélectionnable important sur les zones argileuses au sein ou au-dessus de la ZA (*i.e.* **les structures C et D), indiquant ainsi une fausse cible aux praticiens**. Le dispositif Wenner est moins sensible à ces structures argileuses mais il présente néanmoins des anomalies sélectionnables engendrées par ces structures. Les formes de ces anomalies pourraient d'ailleurs intéresser certains praticiens qui considèrent ces dernières comme étant révélatrices de structures intéressantes du point de vue hydrogéologique (*e.g.* CIEH, 1984; Dieng *et al.*, 2004). Mais le caractère révélateur de structures intéressantes qu'auraient ces formes d'anomalies n'est pas constaté dans la présente étude.

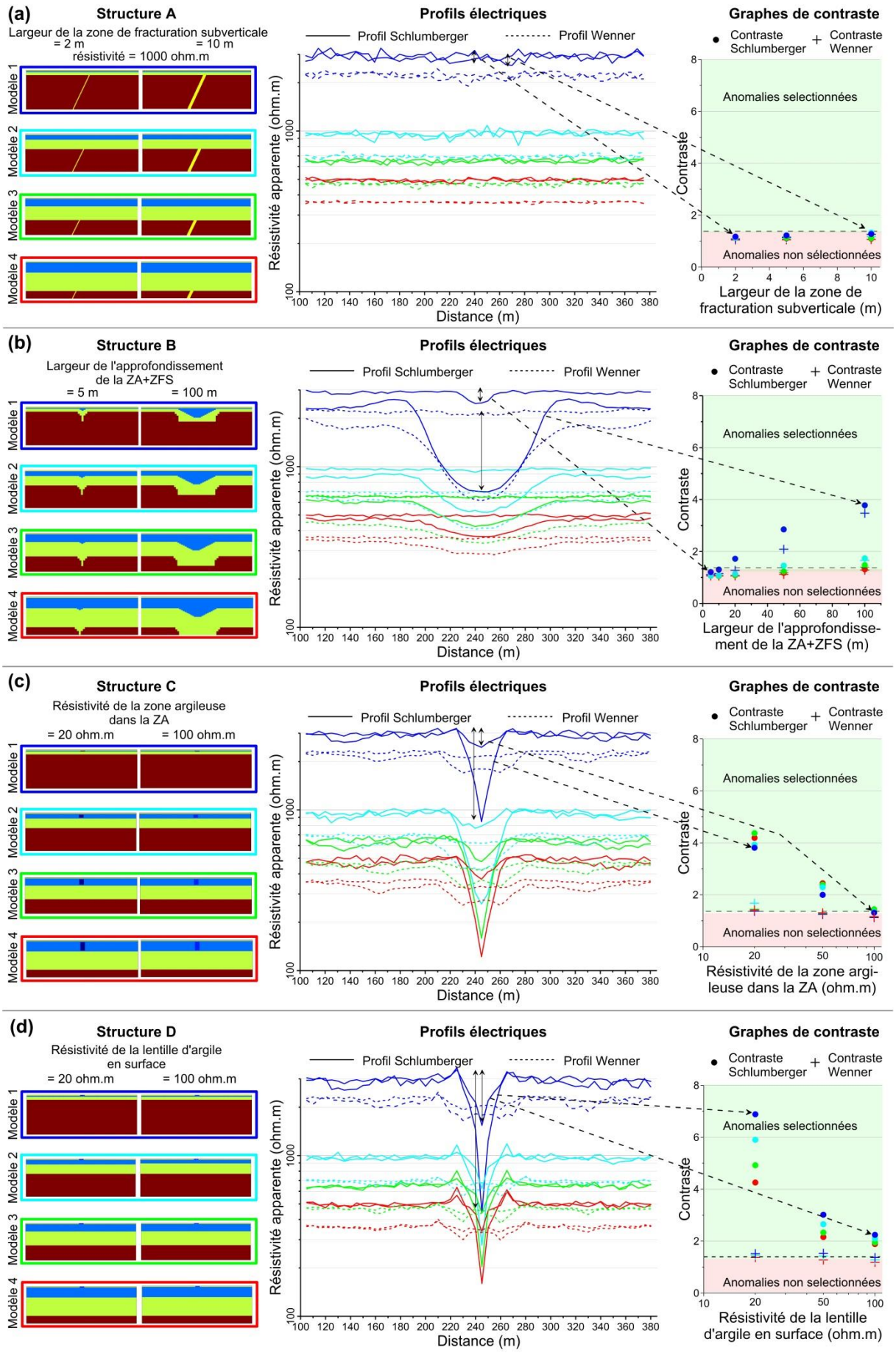

(a)
Structure A
Largeur de la zone de fracturation subverticale
= 2 m
= 10 m
résistivité = 1000 ohm.m
Modèle 1
Modèle 2
Modèle 3
Modèle 4
Profils électriques
Profil Schlumberger
Profil Wenner
Résistivité apparente (ohm.m)
Distance (m)
Graphes de contraste
Contraste Schlumberger
Contraste Wenner
Anomalies selectionnées
Anomalies non sélectionnées
Contraste
Largeur de la zone de fracturation subverticale (m)
(b)
Structure B
Largeur de l'approfondissement de la ZA+ZFS
= 5 m
= 100 m
Anomalies non selectionnées
Largeur de l'approfondissement de la ZA+ZFS (m)
(c)
Structure C
Résistivité de la zone argileuse dans la ZA
= 20 ohm.m
= 100 ohm.m
Résistivité de la zone argileuse dans la ZA (ohm.m)
(d)
Structure D
Résistivité de la lentille d'argile en surface
= 20 ohm.m
= 100 ohm.m
Résistivité de la lentille d'argile en surface (ohm.m)

Figure 5.5 – Exemples de profils électriques (PE) issus de différentes catégories de structures ; à gauche, les modèles ; au centre, les PE ; à droite, le graphique de contraste des anomalies obtenu à partir de l'analyse des PE basée sur le seuil de sélection des anomalies. a) zone de fracturation subverticale non altérée (structure A) ; b) approfondissement et élargissement de l'unité altérée (structure B) ; c) zone argileuse à l'intérieur de la ZA (structure C) ; d) mince plaque ou lentille argileuse située près de la surface (structure D).

Le PE se révèle donc, au total, comme une technique qu'il faut manier avec d'infinies précautions : son application peut *très* souvent conduire à des identifications et sélections d'anomalies de résistivité apparente qui résultent de la présence de structures hydrogéologiquement inintéressantes (zones argileuses). Ce sont d'ailleurs ces dernières qui engendrent les contrastes d'anomalie les plus importants qui constituent le critère de sélection des anomalies sur les PE.

6.4.2. Sondages électriques (SE)

Trois modèles géophysiques (*i.e.* les structures B, C et D) qui engendrent des anomalies sélectionnables en PE, et dont l'amplitude des anomalies est quasiment la même, ont été sélectionnés (Figure 5.6a) afin d'apprécier le pouvoir discriminant ou non des SE. Le sondage étant une investigation suivant la profondeur, il devrait aider à déterminer la structuration du sous-sol de sorte à pouvoir discriminer les structures entre elles. Aucune structure A n'a été sélectionnée à ce stade car une zone de fracturation subverticale non altérée n'entraîne aucune anomalie en PE. Les courbes de SE ont été extraites des données des sections de résistivité apparente de l'ERT au centre exact des anomalies en PE (Figure 5.6b). Ceci dit, la ligne du dispositif de sondage est la même que celle du profil, donc perpendiculaire à la direction de la structure que l'on veut caractériser comme le font les praticiens en général.

Les inversions des trois courbes de SE (Figure 5.6c) aboutissent toujours à une structure à trois couches : *(1)* la couche supérieure est bien identifiée résistante, *(2)* la couche plus conductrice ZA+ZFS (unité altérée) est représentée par une seule couche (*i.e.* effet de suppression, voir 2.4.1), et (3) le SS plus résistant est retrouvé en dessous. Pour ces exemples,

les résultats d'inversion ne différentient pas la ZA et la ZFS et sous-estiment toujours l'épaisseur de l'ensemble (l'unité altérée), ce qui démontre que lorsque le SE est effectué avec une ligne d'électrode perpendiculaire à la structure comme le font souvent les praticiens, il n'est pas possible de différentier la ZA de la ZFS et même l'épaisseur de l'unité altérée ne peut être quantifiée avec fiabilité. Le cas où la ligne d'électrode du SE est parallèle à la structure peut conduire à des résultats différents. Cependant, ce dernier cas n'a pas été étudié ici parce qu'il n'est jamais considéré par les praticiens au Bénin. Réaliser un sondage avec une ligne d'électrodes parallèle à la structure revient à faire en brousse, un layon perpendiculaire à celui qui avait été déjà fait pour la ligne d'électrodes du profil qui elle, est perpendiculaire à la structure. Souvent 2 ou 3 sondages peuvent être réalisés sur un même profil, ce qui revient à réaliser 2 ou 3 layons en plus de celui du profil, constituant ainsi une perte de temps énorme pour les praticiens.

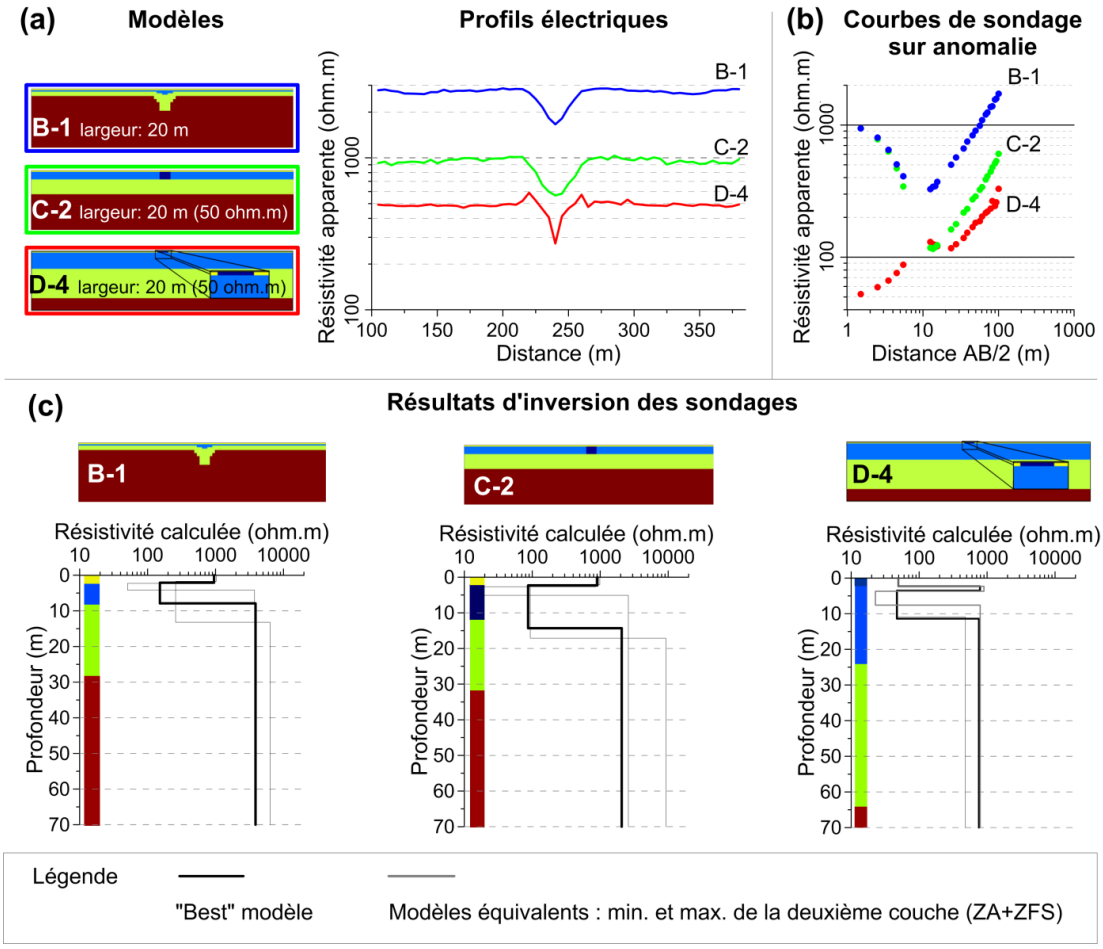


Figure 5.6 – Inversions de sondages électriques (SE) sur les anomalies de profil électrique (PE) des structures B, C et D. a) modèles des structures B, C et D avec leur PE; b) les courbes de données de SE obtenues au centre des anomalies de PE; c) les résultats d'inversion de SE.

6.4.3. Tomographie de Résistivité Electrique (ERT)

Des exemples d'inversions ERT, prenant les mêmes modèles précédents (Figure 5.6a) sont présentés. Une inversion de la structure A (zone de fracturation subverticale non altérée) a été ajoutée pour évaluer la capacité de l'ERT à révéler ce cas indétectable avec le PE.

Pour la structure A, l'ERT révèle qu'une zone de fracturation subverticale non altérée large de 10 m, jusqu'alors indétectable en PE, peut être identifiée par une auréole de baisse de résistivités (Figure 5.7a, modèle A-1) dans le cas le plus favorable (SS à 10 m de profondeur). Cette auréole peu marquée, ne permet pas formellement de caractériser la structure responsable de cette auréole qui pourrait aussi être due à une variation latérale de faciès. Dans le 2e cas, où le socle est à 32 m, la zone de fracturation subverticale non altérée n'est plus identifiable sur la section ERT. Ceci montre que, pour la modélisation effectuée, cette structure n'est identifiable avec l'ERT que lorsqu'elle est proche de la surface (modèle A-1).

Les structures B, C et D interprétées à partir des observations des PE comme des éventuelles cibles, ne sont pas bien discriminées par les SE. L'ERT améliore nettement la caractérisation de ces 3 structures. Le modèle B-1 (*i.e.* approfondissement et élargissement de l'unité altérée) est bien caractérisé même si sa largeur est légèrement exagérée. Les résultats du SE peuvent ne pas amener les praticiens à choisir un tel emplacement comme étant le point de forage le plus favorable dans la zone de prospection, mais **les résultats de l'ERT donnent clairement les bonnes informations nécessaires pour prendre la bonne décision**. Les deux zones argileuses au sein de la ZA (modèle C-2) et superficielle (modèle D-4) sont également bien caractérisées par l'ERT. Les praticiens peuvent identifier les zones argileuses où le PE génère de fortes anomalies traditionnellement interprétées à tort comme une fracture subverticale non altérée. De manière similaire au SE, **l'ERT ne discrimine pas franchement la ZA et la ZFS** : les résistivités calculées des sections ERT augmentent progressivement avec la profondeur. **Mais une zone de transition entre la ZA et la ZFS peut être définie** en faisant des hypothèses : par exemple en observant avec attention les variations de résistivités avec la profondeur, on peut considérer que la zone de transition entre la ZA et la ZFS est définie par la zone subhorizontale où les variations sont plus importantes. Cette zone indiquerait un passage de la ZA à la ZFS. Lorsqu'on a des connaissances supplémentaires sur la gamme de résistivité de la ZA dans la zone de prospection (voir chapitre 3) en utilisant des diagraphies électrique réalisées dans la zone (*e.g.* Braun *et al.*, 2009) il est possible de délimiter l'épaisseur de la ZA avec plus de certitude, et donc l'épaisseur de la ZFS également.

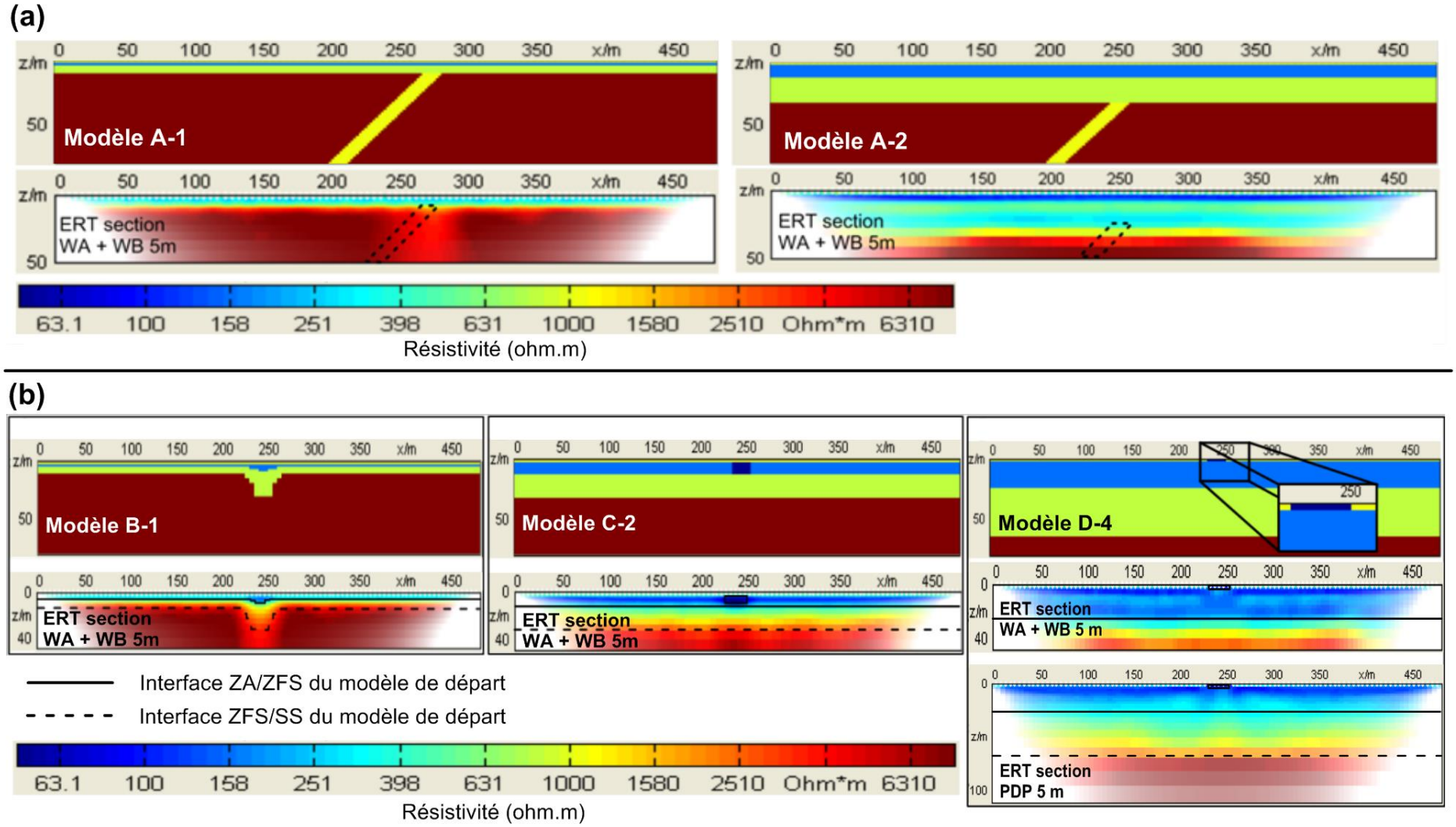


Figure 5.7 – Tomographie de résistivité électrique (ERT) de toutes les structures. a) ERT de la structure A (les 2 cas les plus favorables : zone de fracturation subverticale large de 10 m, à 10 et 32 m de profondeur) ; b) ERT des structures B, C et D qui n'étaient pas caractérisées par le SE.

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

L'ERT caractérise bien en revanche le toit du socle sain puisque les résistivités du socle sain sont les plus élevées et sont quasi constantes, permettant de définir une zone presque homogène dont les limites sont assez bien définies. Dans cette modélisation numérique, en faisant l'hypothèse que la zone de fortes variations marque la transition ZA - ZFS et en comparant cela aux limites des modèles de départ, l'ERT sous-estime l'épaisseur de la ZA de 10 à 15 %. Lorsque le SS est situé à plus de 50 m de profondeur, c'est le dispositif pôle-dipôle qui localise mieux l'interface ZFS/SS (Figure 5.7b, modèle D-4), confirmant ainsi l'efficacité des dispositifs plus pénétrants comme le pole-dipôle (Loke, 2000) pour étudier des structures plus profondes.

Conclusion partielle

Une modélisation numérique a été conduite en simulant les résultats que produiraient les techniques de prospection électrique utilisées par les praticiens pour l'implantation de forages (Profils Electriques – PE et Sondages Electriques – SE) et une technique plus élaborée (la Tomographie de Résistivité Electrique – ERT). Cette modélisation a été réalisée avec des modèles construits grâce à des informations obtenues sur la zone de socle du Bénin et qui ont pris en compte les différentes situations ou configurations du sous-sol que l'on pourrait rencontrer. Des résultats éclairants ont été obtenus et on retient ce qui suit.

- Les profils électriques ne peuvent pas détecter une zone de fracturation subverticale non altérée dans les conditions de socle rencontrées au Bénin et en Afrique de l'Ouest.
- Les profils électriques et surtout ceux obtenus avec un dispositif Schlumberger génèrent toujours des anomalies avec un contraste important sur les zones argileuses aussi bien en surface qu'au sein de la ZA, indiquant ainsi une fausse cible aux praticiens.
- Les profils électriques produisent des anomalies moins importantes pour des approfondissements et élargissements de l'unité altérée (ZA+ZFS) de grandes tailles (et inversement) qui sont en fait les situations les plus intéressantes pour l'implantation d'un forage.
- Les sondages électriques n'arrivent pas à discriminer les différentes structures que l'on peut rencontrer dans notre zone de socle et sous-estiment dans tous les cas étudiés

l'épaisseur de l'unité altérée, ce qui trompe considérablement le praticien dans le choix du meilleur emplacement pour le forage.

- **L'ERT est capable de bien caractériser les différentes structures, de bien localiser la profondeur du SS et donc l'épaisseur clef ZA+ZFS avec des possibilités de déterminer une zone de transition entre la ZA et la ZFS.** La ZA et la ZFS constituant la cible hydrogéologique, l'ERT nous permet donc de caractériser la cible tout en étant aussi capable de nous faire éviter les structures **très** défavorables du point de vue hydrogéologique (comme les zones argileuses).

Il convient maintenant de confronter ces résultats de modélisations à des résultats de mesures de terrain. C'est l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 6

Validation in-situ de la technique ERT pour l'implantation géophysique des forages

Introduction

Les résultats de la modélisation numérique ont montré que l'ERT présente des avantages considérables par rapport aux techniques traditionnelles, quant à sa capacité à caractériser la cible hydrogéologique pour l'implantation d'un forage en zone de socle en milieu tropical et à discriminer les structures du sous-sol pouvant conduire à des erreurs d'implantation. Dans ce chapitre, il s'agit de confronter les résultats numériques (qui se basent sur des modèles simplifiés du sous-sol) à la réalité du terrain. D'abord, la mise en œuvre de l'ERT sur l'ensemble des sites est exposée (permettant de disposer simultanément des données de PE et SE). Ensuite, les résultats de terrain sont présentés et inter-comparés pour valider ou infirmer les conclusions de la modélisation numérique. Puis, une utilisation de la Résonnance Magnétique des Protons (RMP) et de la technique reconnue meilleure est faite pour enrichir la corrélation entre la résistivité de la ZA et la porosité de drainage. Enfin, une analyse de l'impact économique de la mise en œuvre de la meilleure technique est faite.

6.1. Méthodologie mise en œuvre

L'ERT et les techniques traditionnelles sont appliquées sur sept sites :

- les six sites (LETS) où les techniques traditionnelles et l'ERT ont été appliquées. Cela a permis d'explorer plusieurs situations conformes aux modèles numériques ;
- et le site test « Saré » utilisé comme démonstrateur. Deux forages y ont été réalisés en deux phases : l'un sur la base des techniques traditionnelles, qui a conduit à un échec et l'autre sur la base de l'ERT qui a permis d'obtenir un forage positif.

Les résultats sont inter-comparés en ressortant leur capacité à caractériser la cible et à discriminer les situations défavorables pour un forage productif. Pour enrichir la relation entre la résistivité ZA et la porosité de drainage, l'ERT, après sa validation, a été appliquée sur 7

nouveaux sites avec la RMP pour avoir des résistivités et des porosités de drainage sans diagraphies ni pompages d'essai. Afin d'estimer l'impact de l'utilisation de la meilleure technique validée, l'analyse du modèle économique actuel des prospections géophysiques au Bénin est faite en considérant le coût des équipements et du staff.

6.2. Mise en œuvre de l'ERT et des autres techniques in situ

6.2.1. Études préalables

Il est important de connaitre le contexte géologique dans lequel l'on se situe avant de mettre en œuvre toute technique de la méthode électrique, comme toute autre méthode géophysique. Il s'agit principalement de connaitre les types de roches en présence, leur orientation et avoir une idée des profondeurs moyennes d'altérations rencontrées dans la zone en général (via l'étude des coupes de forages existant). Cela permet de définir le dispositif adéquat pour la prospection et aussi l'orientation du profil d'acquisition (l'alignement des électrodes). Le chapitre 1 a présenté la géologie de notre zone d'étude en présentant une figure que nous reprenons ici pour ajouter la position du site test : Saré (Figure 6.1).

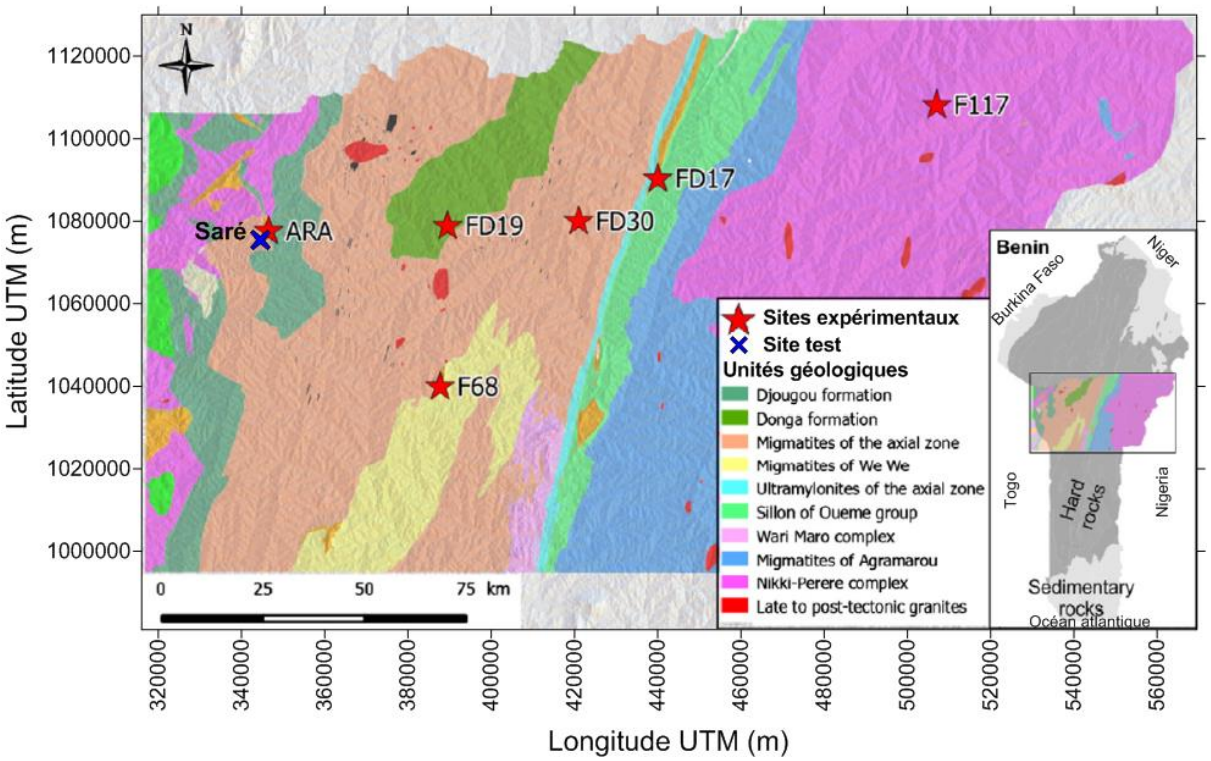


Figure 6.1 – Géologie et localisation des 6 sites LETS et du site test.

La partie Ouest de la zone d'étude est constituée de roches métamorphiques (Ara, FD19, F68, FD30, et FD17) alors que la partie Est est constituée de roches granitiques (F117). Nous avons donc choisi d'appliquer la combinaison des dispositifs Wenner Alpha (WA) et Wenner Beta (WB) pour tous les sites en général car l'efficacité de l'application de cette combinaison en zone de socle est validée (Barker *and* Moore, 1998). Elle permet d'avoir une sensibilité à la fois aux variations latérales qu'horizontales. Mais pour le site F117 situé dans les roches granitiques (*i.e.* altération plus argileuse), nous avons appliqué le dispositif Pôle-Dipôle (PD) qui permet une investigation beaucoup plus profonde (voir Figure 2.4.) permettant de nous affranchir ainsi de la limitation de la profondeur d'investigation due à la présence d'une ZA argileuse sur ce site (voir Figure 2.3).

L'espacement inter-électrode, défini par la taille de l'objet que l'on recherche et la profondeur d'investigation en prenant en compte le nombre d'électrodes disponibles, a été choisi en sachant que l'objectif est de caractériser la ZA et la ZFS et aussi le toit du socle sain. Nous avons recherché la gamme de profondeur du toit du socle sain en utilisant la base de données des forages de la zone d'étude. Le toit du socle varie entre 30 m et 65 m (1er et 3e quartiles). Avec l'équipement dont nous disposons, Syscal Pro 96 électrodes (http://www.iris-instruments.com/syscal-pro.html), nous avons choisi 5 m d'espacement inter-électrodes, ce qui permet d'avoir une ligne d'acquisition de 475 m et une profondeur d'investigation théorique (en milieu homogène sans argile) qui peut atteindre en profondeur 70 à 90 m avec la combinaison WA+WB et plus de 130 m avec le PD. Cette longueur de ligne d'acquisition suffit donc largement pour une prospection correcte de notre zone d'étude.

Pour respecter au mieux, les hypothèses d'inversion de l'algorithme d'inversion 2D, qui considère que le sous-sol a une structuration majeure en 2 dimensions (en profondeur et latéralement dans une direction), il faut que les lignes d'acquisitions soient perpendiculaires aux structures que l'on veut prospecter afin d'obtenir de bons résultats d'inversion des données acquises. L'orientation majeure des structures géologiques a été identifiée entre N10° et N20°. Les lignes d'acquisition ont été donc généralement orientées Est-Ouest avec des variations d'un site à l'autre lorsqu'on prend en compte la variation locale de l'orientation des structures (après observation des roches in-situ) et aussi les contraintes des sites qui peuvent être diverses (habitations, cours d'eau, etc.). L'annexe 3 présente l'orientation des lignes d'acquisition ERT positionnées sur des cartes de résistivité de 360.000 m^2 des 15 premiers mètres du sous-sol. Ces cartes ont été réalisées avec l'appareil électromagnétique EM34 (voir Borne, 1990 pour l'utilisation et l'apport de l'EM34 dans la prospection de sub-surface).

6.2.2. Matériel d'acquisition

Le matériel utilisé pour l'ERT est semblable à celui utilisé pour la diagraphie (voir 3.3.1.) à la différence des câbles (flûtes). Quatre câbles multiconducteurs ont été utilisés, chacun ayant 24 sorties espacées de 5 m pour la connexion de 96 électrodes (Figure 6.2). Pour trouver l'azimut de la ligne d'acquisition une boussole a été utilisée. Notons que l'acquisition des données ERT permet d'obtenir simultanément les données de profils et de sondages électriques (après extraction des données dans la section de résistivités apparentes).

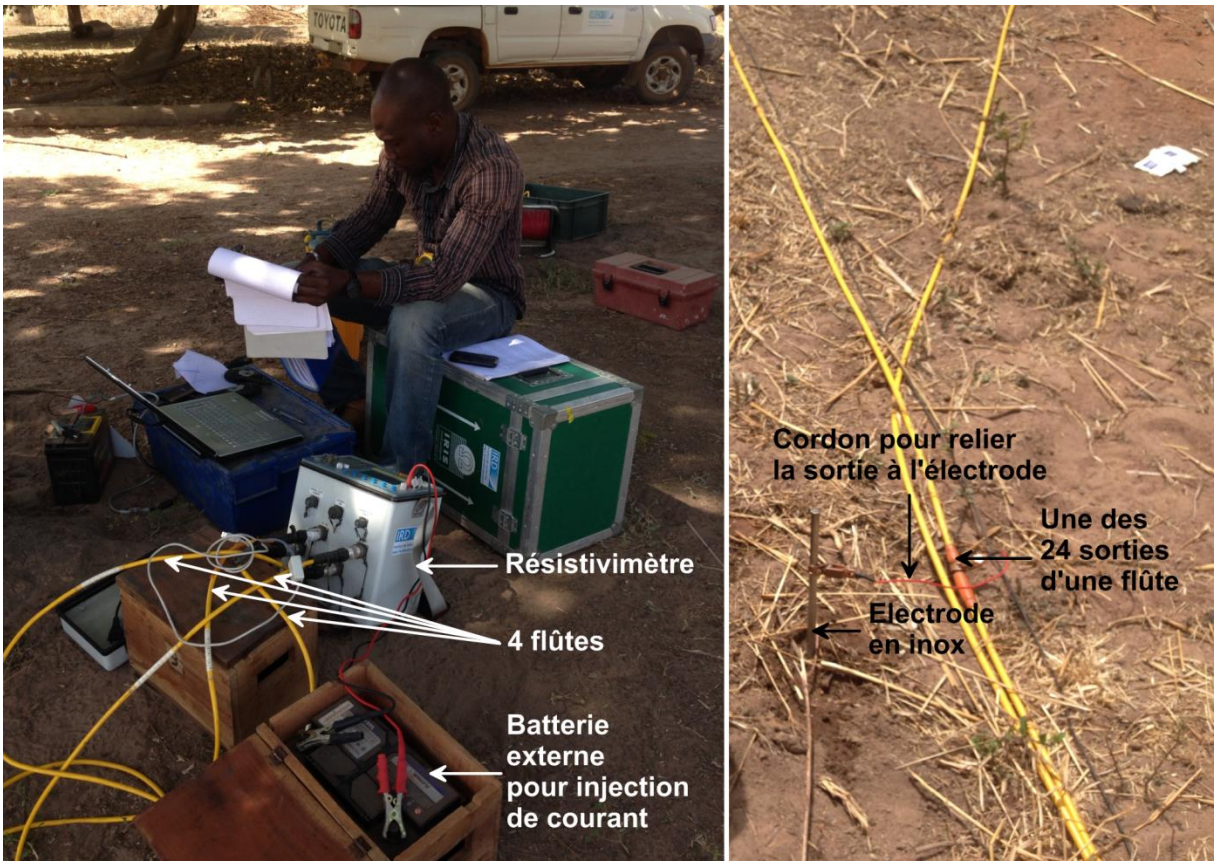


Figure 6.2 – Présentation du matériel d'acquisition des données d'ERT.

6.2.3. Acquisition des données

Le dispositif, l'orientation de la ligne et le matériel étant définis, l'acquisition des données s'est faite en commençant par préparer la séquence de mesure. La séquence de mesure a été préparée avec le logiciel Electre Pro de IRIS Instruments. La séquence est une programmation automatique de toutes les mesures qui seront effectuées avec un dispositif

donné. Nous avons alors préparé 4 séquences (WA, WB, PD avant et PD arrière) pour tous les sites. Notons que le PD consiste à faire deux acquisitions : une avec une électrode d'injection (A) à l'infini et l'autre avec la deuxième électrode d'injection (B) à l'infini d'où la préparation de deux séquences pour le PD. La distance correspondant à l'infini doit être environ égale à 5 fois la distance OB si c'est A qui est à l'infini (voir Figure 2.4). L'orientation de l'électrode à l'infini est en général perpendiculaire à la ligne d'acquisition (Razafindratsima *and* Lataste, 2014), ce que nous avons fait en positionnant l'électrode à l'infini à 1.000 m. Le positionnement de cette dernière constitue l'une des difficultés majeures de l'application de ce dispositif (respect de l'azimut d'orientation et risque de coupure du câble par des autochtones ou des passants, véhiculés ou pas, s'il arrivait que le câble traverse un chemin).

Pour assurer une bonne acquisition des données, après que la ligne d'acquisition est déployée, il faut effectuer certaines mises au point.

- Vérifier la qualité des contacts entre les électrodes et le sol. C'est très important. Cela se fait avec le résistivimètre qui, connecté aux électrodes via les flûtes, permet de mesurer la valeur de la résistance entre chaque électrode et le sol. En général une valeur de résistance inférieure à 10 kohm est acceptable ; au-delà, il faudra faire des efforts pour améliorer le contact en enfonçant un peu plus l'électrode, en l'arrosant d'eau salée si possible, ou encore en la déplaçant de quelques centimètres.

- Paramétrer l'acquisition. Il s'agit en général de définir un mode d'injection du courant, un temps d'injection et le nombre de stacks. Nous avons défini un mode d'injection automatique car il permet d'optimiser l'injection pour injecter la quantité de courant nécessaire en économisant de l'énergie. Le temps d'injection a été de 1 seconde en général pour stabiliser le niveau de courant. Le nombre de stacks a été de 3 et 6 respectivement pour des facteurs de qualité inférieurs à 2 et supérieurs à 2.

Après les mesures, la dernière étape de l'acquisition des données est le déchargement des données du résistivimètre vers l'ordinateur. Pour cela on utilise un logiciel qui peut varier d'un résistivimètre à un autre. Nous avons utilisé ProsysII (comme pour les diagraphies) qui permet de décharger les données et aussi de les apprécier avec des outils de filtrage et d'affichage graphique des paramètres mesurés. Il est important de vérifier la qualité de l'ensemble des données acquises avant de désinstaller la ligne d'acquisition. De mauvaises données pourraient emmener à reprendre l'acquisition.

6.3. Traitement des données

6.3.1. Analyse de la qualité des données

L'analyse de la qualité des données, au-delà de la vérification de l'acquisition qui est faite sur le terrain avec le logiciel de récupération des données, consiste à regarder avec un autre logiciel plus adapté (X2IPI ou DC2D), les données fausses souvent issues d'électrodes débranchées par le passage d'un troupeau par exemple, ou de sorties de câbles défectueuses (s'il y en a). Les données fausses sont celles dont les valeurs sont complètement différentes de celles de l'environnement immédiat. Lorsqu'une électrode ou une sortie de câble multiconducteur sont endommagées, ce sont toutes les mesures auxquelles cette électrode a participé qui sont erronées et fausses. Toutes ces analyses ont été faites et les données fausses ont été toutes éliminées avant de passer à l'inversion des données correctes. Il faut noter que nous avons eu très peu de fausses données grâce au respect strict des conditions de bons contacts entre les électrodes et le sol, et à la surveillance continue de la ligne d'électrodes.

6.3.2. Inversion des données

Les données ont été inversées à l'aide du logiciel DC2D avec des paramètres d'inversion définis à partir d'une modélisation numérique. Le dispositif décrit dans la section précédente (WA+WB, 96 électrodes et 5 m d'espacement) a été appliqué sur un modèle numérique qui prend en compte l'objectif de l'étude en variant la profondeur de l'interface ZA/ZFS avec un SS à 45 m (en s'inspirant de la base de données des forages) (Figure 6.3).

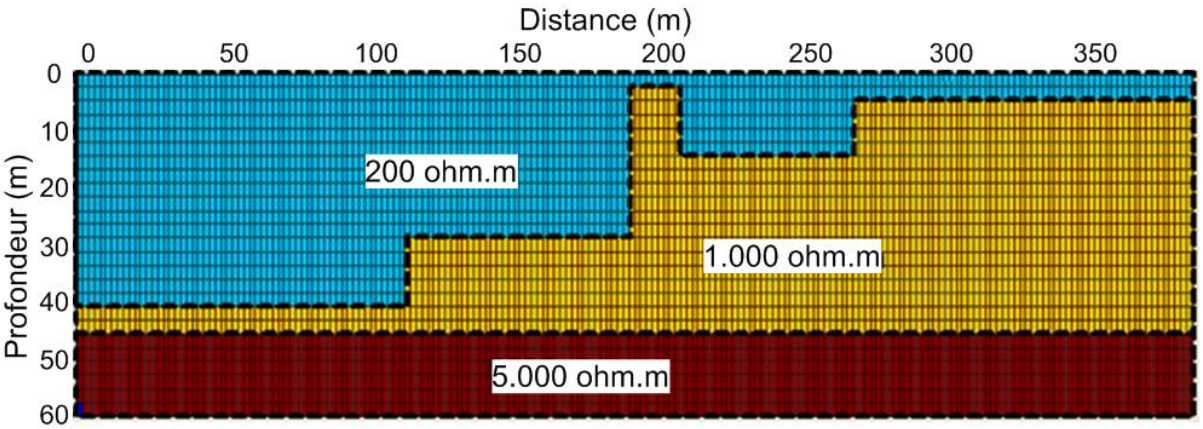


Figure 6.3 – Modèle synthétique numérique complexifié de notre zone d'étude.

Comme les modèles réalisés dans le chapitre de modélisation précédent, le modèle utilisé ici a été inspiré des réalités de terrain (complexifiées). Cette modélisation numérique est destinée à régler au mieux les paramètres d'inversion que l'on applique ensuite aux données réelles.

Après de nombreux essais de jeux de paramètres d'inversion sur les données de résistivités apparentes (Figure 6.4), ceux qui ont été choisis sont ceux qui permettent une restitution, suivant la géométrie et la résistivité des compartiments, la plus proche possible du modèle initial, (Figure 6.5). Les meilleurs paramètres se sont avérés être les paramètres par défaut (Günther, 2004). Lambda = 30, Z weight = 1, Robust inversion (choisi pour des données dispersées), Global régularisation, Line search (pour ressortir les limites des interfaces s'il y en a).

Outre la qualité de restitution géométrique des structures du sous-sol (restitution des épaisseurs et des résistivités), la qualité d'inversion des données de terrain est aussi appréciée à travers les valeurs des critères de qualité mathématique que sont le Chi2 et le RMS (Günther, 2004) comme cela a été fait pour les modélisations numériques du chapitre précédent.

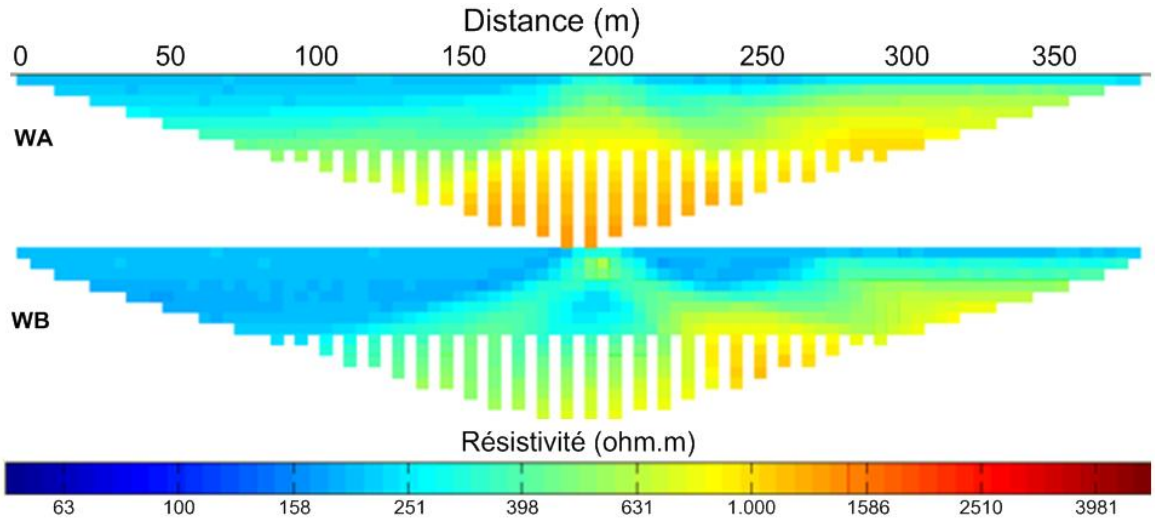


Figure 6.4 – Jeux de données de résistivités apparentes générés numériquement par les dispositifs Wenner alpha (WA) et Wenner beta (WB).

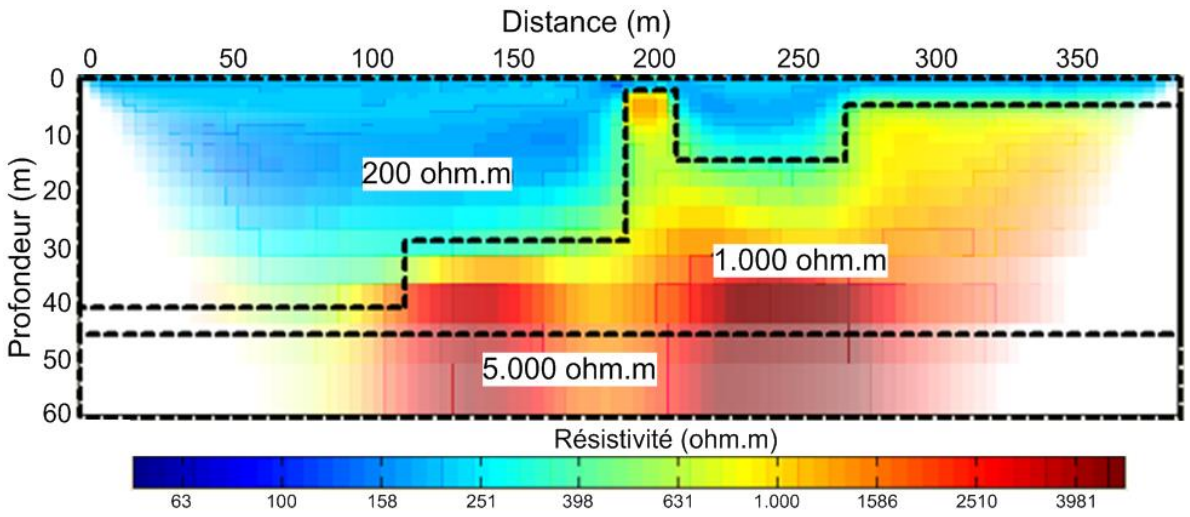


Figure 6.5 – Résultat d'inversion du modèle numérique évaluant les choix pour l'application de l'ERT sur le terrain (dispositifs WA+WB combinés et paramètres d'inversion par défaut).

6.4. Résultats

Rappelons que les LETS sont les 6 sites expérimentaux où des forages sont réalisés. Les valeurs de débits obtenues à la fin de la réalisation de ces forages seront utilisées ici pour illustrer certains résultats. Nous avons choisi de présenter dans un premier temps, pour ne pas nous répéter dans nos commentaires, les résultats de trois sites parmi ces 6 sites, permettant d'illustrer au mieux les différents cas de figures conformes aux modèles numériques du chapitre précédent (plusieurs cas de figures sont rencontrés parfois sur un même site). Dans un second temps, les résultats du site test supplémentaire « Saré » sont présentés (l'Annexe 5 présente les résultats de tous les sites).

Le premier site expérimental FD19, pris comme exemple des modèles de structures B (approfondissement et élargissement de la ZA+ZFS), est situé dans un environnement géologique de gneiss altéré, commun au Bénin et en Afrique de l'Ouest. Le débit instantané mesuré à la fin du forage est de 25 m^3/h. Par rapport aux faibles débits habituellement observés dans les forages réalisés dans les zones de socle (Courtois *et al.*, 2010; Vouillamoz *et al.*, 2014), ce débit est exceptionnel et mérite un intérêt particulier. Les deuxième et troisième sites, FD30 et F68, sont pris respectivement comme exemples des modèles de structures C et D. Ils illustrent bien les cas de présence de zones argileuses au sein de la ZA et en surface et *peut-être* aussi le cas de zone de fracturation subverticale (structure A, site F68).

Le site test « Saré », est le site démonstrateur où l'ERT a été mise en œuvre uniquement dans un deuxième temps après une première campagne d'un bureau d'études utilisant les techniques traditionnelles. L'ERT apparait ici comme un moyen de démontrer l'intérêt qu'elle apporte par rapport aux techniques traditionnelles : en effet, les praticiens cherchaient le meilleur emplacement pour réaliser un forage en l'implantant sur la base de l'interprétation de PE et de SE, ce qui a conduit à un échec du forage et, ensuite, un deuxième forage positif a été positionné avec l'utilisation de l'ERT.

6.4.1. Sites expérimentaux : FD19, FD30 et F68

FD19

Les mesures de Profil Electrique (PE), effectuées avec le dispositif Schlumberger couramment utilisé, révèlent trois anomalies conductrices avec des contrastes de résistivités sensiblement égaux ou légèrement supérieurs à 1,4 (Figure 6.6a). Les principales anomalies (N°1 et N°2), qui ont des contrastes de résistivités plus élevés, auraient pu être sélectionnées comme points de sondage par les praticiens. Le Sondage Electrique (SE) réalisé à l'aplomb de l'anomalie N°2 (la plus importante) révèle une couche située à partir de la surface du sol jusqu'à 30 m de profondeur dont la valeur de résistivité est d'environ 100 ohm.m (Figure 6.6b). Cette valeur de résistivité indique une couche altérée et ce point aurait pu être choisi pour le forage puisque l'épaisseur de la ZA révélée par le SE est significative. Le PE Wenner alpha n'engendre aucune anomalie sélectionnable. La plus importante relativement, située en dessous de l'anomalie N°2 du dispositif Schlumberger, serait engendrée par la même cause que celle de cette dernière.

L'ERT (Figure 6.6c) révèle que *(1)* l'anomalie N°1 du PE est due à une faible variation superficielle (diminution de la résistivité entre deux plaques résistantes peu profondes), et *(2)* l'anomalie N°2 résulte uniquement des zones argileuses situées dans la ZA. Ainsi, l'implantation d'un forage sur la base de l'analyse des données de PE et de SE conduirait à positionner un forage en se basant sur une raison erronée (*i.e.* en considérant que des anomalies de PE sont dues à des structures profondes et hydrogéologiquement intéressantes). L'ERT montre également un approfondissement de la ZA+ZFS, entre 150 et 220 m sur la section, qui serait la cible pour l'implantation du forage.

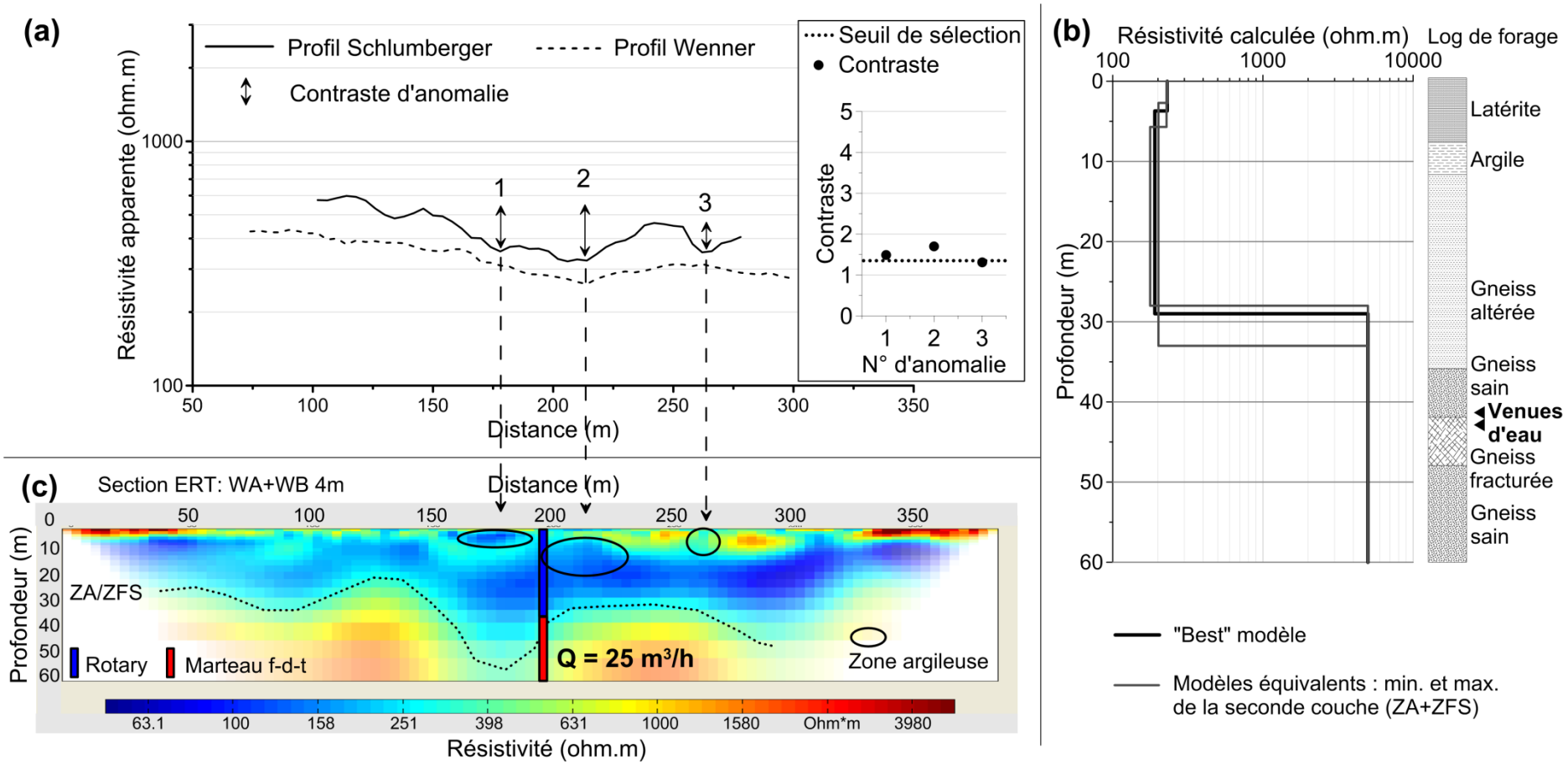


Figure 6.6 – Profil électrique (PE), sondage électrique (SE) et tomographie de résistivité électrique (ERT) sur le site FD19. a) PE avec les dispositifs Schlumberger et Wenner alpha ; b) SE sur l'anomalie N°2 du PE Schlumberger ; c) ERT utilisant les dispositifs combinés Wenner alpha (WA) et Wenner beta (WB).

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

Enfin, le forage P1 réalisé à la distance de 195 m (sur la ligne ERT) et positionné dans l'approfondissement de la ZA+ZFS a été couronné de succès (Q = 25 m^3/h), ainsi que P2 situé dans la même zone à 20 m de P1 perpendiculairement à la ligne ERT (voir Annexe 3) avec Q = 51 m^3/h (voir Annexe 7). L'approfondissement de la ZA+ZFS situé entre la distance 150 et 220 m sur la ligne ERT n'est pas clairement révélé par le PE alors que c'est la véritable cible pour implanter un forage. La lithologie et le débit élevé du forage réalisé en bordure de cet approfondissement de la ZA+ZFS confirment la géométrie et l'intérêt de la cible révélée par l'ERT. Il y a sûrement une explication à ces approfondissements locaux de l'altération : la présence de discontinuités anciennes, de joints, de veines, etc., ou de légers changements lithologiques favorisant localement une altération préférentielle.

FD30 et F68

L'interprétation des anomalies conductrices trompeuses le long des mesures PE considérées à tort comme les témoins de zones de fracturation subverticale alors qu'il s'agit en réalité de zones argileuses, est courante au Bénin comme l'illustrent les mesures effectuées sur les sites expérimentaux FD30 et F68 (Figures 6.7a et 6.7b). Sur ces sites, les anomalies de PE sont clairement liées à la présence de petites zones argileuses dans la ZA (structure C, site FD30) ou à des plaques argileuses situées en surface et peu profondes (structure D, site F68).

Sur les diagraphies réalisées dans les deux forages/piézomètres profonds (P1 et P2) du site F68 présentées dans le chapitre 3, on a des chutes brusques de résistivités (à 35 et 45 m environ pour P1, 40 et 50 m environ pour P2) qui pourraient représenter des fracturations subhorizontales voire subverticales dans la ZFS (aucun élément pour confirmer l'orientation de la fracturation). Le site F68 pourrait ainsi illustrer le modèle de structure de type A.

Les résultats de l'ERT ont conduit à implanter *(1)* le forage du site FD30 au droit de l'un des approfondissements de la ZA+ZFS et *(2)* le forage du site F68 « simplement » là où la ZA+ZFS est plus épaisse (l'épaisseur étant quasiment constante entre 100 et 200 m). Les débits obtenus de ces forages ont donnés respectivement 9 m^3/h et 4,2 m^3/h, débits largement suffisants pour l'installation d'une pompe à motricité humaine (débit supérieur à 0,7 m^3/h) et même pour une adduction d'eau villageoise (débit supérieur à 3.6 m^3/h). Remarquons que la zone de fracturation soupçonnée sur le site F68 sur la base des mesures de diagraphie, n'est pas visible sur la section ERT.

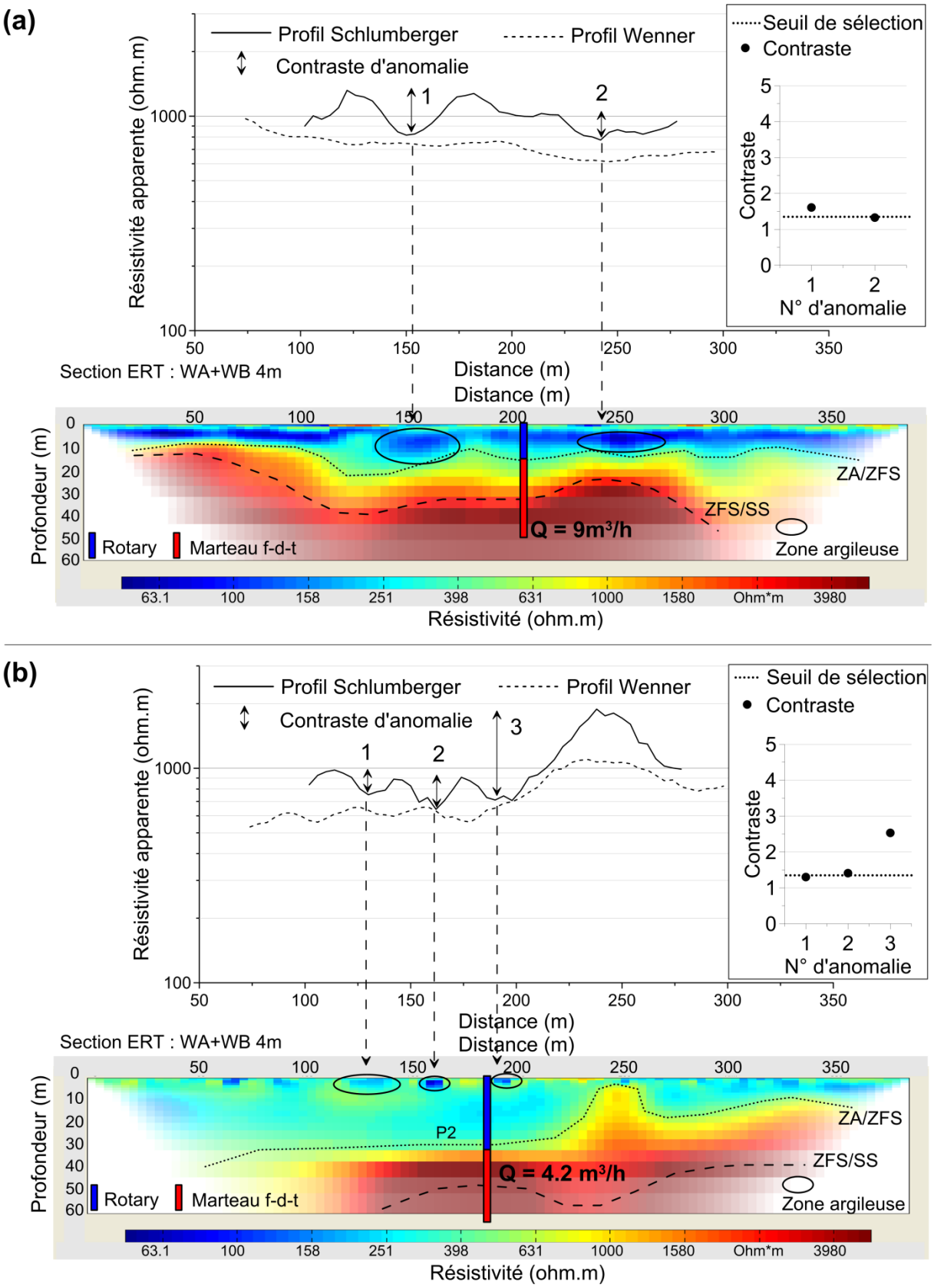


Figure 6.7 – Profil électrique (PE) et tomographie de résistivité électrique (ERT) sur les sites FD30 et F68. a) PE et ERT avec les dispositifs combinés Wenner alpha (WA) et Wenner beta (WB) sur FD30 ; b) EP et ERT avec les dispositifs combinés WA et WB sur F68.

L'interprétation des mesures de terrain réalisées sur les sites expérimentaux FD19, FD30 et F68 confirme les résultats de la modélisation numérique : *(1)* les zones argileuses au sein de la ZA ou à la surface du sol (structures C et D de la modélisation numérique) engendrent très souvent de fortes anomalies sur les PE qui sont fréquemment interprétées de façon erronée comme de possibles cibles alors qu'on devrait les éviter, *(2)* les résultats de SE ne peuvent *évidemment* pas révéler les structures 2D et tendent à sous-estimer l'épaisseur de la ZA+ZFS sans pouvoir les distinguer, et *(3)* les fractures subverticales non altérées ne peuvent pas être directement identifiées distinctement à partir de mesures électriques depuis la surface (PE, SE ou ERT). Bien sûr, si la largeur de la fracture est plus importante et est caractérisée par un important processus d'altération, la signature géophysique résultante deviendrait révélatrice.

Dans ces différents résultats obtenus (FD19, FD30, F68) et ceux des autres sites qui ne sont pas présentés ici, le succès des forages n'est certainement pas dû au fait qu'ils traversent une fracture subverticale, mais plutôt au fait que :

- ils traversent une importante épaisseur de zone productive de la ZA+ZFS peu argileuse ;
- les valeurs de résistivités de la ZA et de la ZFS traversées par les forages sont respectivement situées, pour tous les sites, entre 150 et 400 ohm.m et entre 800 et 2.000 ohm.m qui sont les gammes de valeurs cibles pour avoir des propriétés hydrodynamiques acceptables (*i.e.* dont les valeurs sont supérieures à la moyenne des valeurs rencontrées en zone de socle au Bénin et dans la sous-région Ouest-Africaine) (voir chapitre 3).

6.4.2. Site test démonstrateur : SARE

Sur le site Saré, le forage F1 qui a été réalisé en premier, sur la base de l'interprétation des données de PE et de SE, est négatif (*i.e.* débit inférieur au seuil de 0,7 m^3/h). Comme déjà observé sur les sites FD19, FD30 et F68, les anomalies de PE sélectionnées comme cibles résultent de zones argileuses situées à l'intérieur ou en surface de la ZA (Figure 6.8a). Les praticiens ont effectué un SE sur l'anomalie N°1 en raison de son fort contraste de résistivités. L'analyse du SE a révélé une couche altérée mal définie puisque la plage d'équivalence est très grande (certainement due à un effet 2D très fort) (Figure 6.8b).

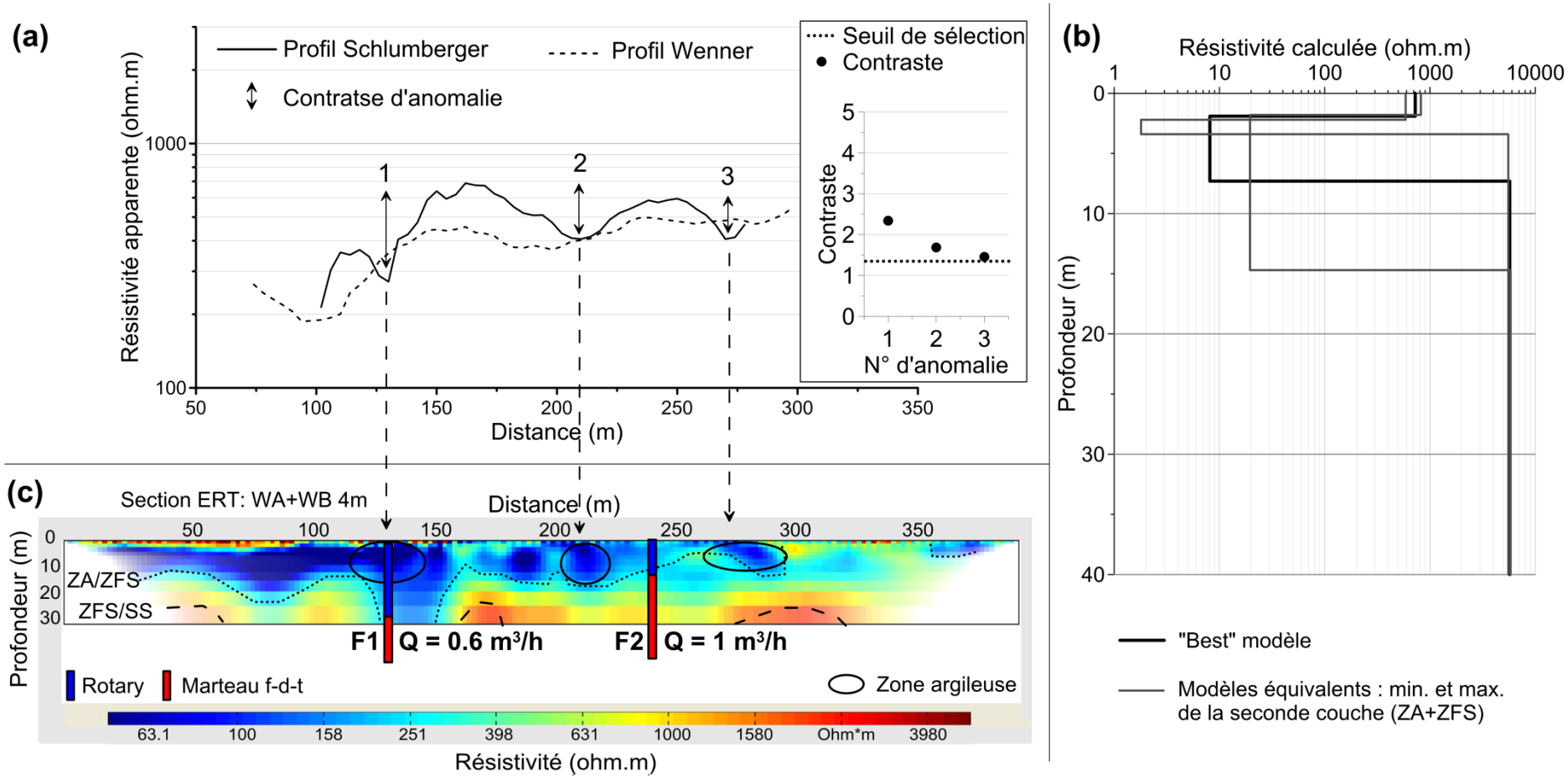


Figure 6.8 – Profil électrique (PE), sondage électrique (SE) et tomographie de résistivité électrique (ERT) sur le site Saré. a) PE avec les dispositifs Schlumberger et Wenner ; b) SE réalisé sur l'anomalie N°1 du PE Schlumberger ; c) ERT utilisant les dispositifs combinés Wenner alpha (WA) et Wenner beta (WB).

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

Pour implanter un autre forage, l'interprétation de l'ERT qui a été effectuée a révélé la raison pour laquelle les contrastes des anomalies du PE sont si élevés : plusieurs structures argileuses 2D, de résistivités inférieures à 60 ohm.m (indicatrice de teneur en argile élevée et de présence d'argile gonflante) sont présentes là où le premier forage a été réalisé sur l'anomalie N°1. Sur la base de l'interprétation de l'ERT, une zone moins argileuse de 150 à 200 ohm.m est sélectionnée à une distance égale à 240 m environ, pour réaliser le second forage F2 (Figure 6.8c). F2 est un forage productif avec un débit acceptable de 1 m^3/h (débit commun aux aquifères de socle au Bénin et en Afrique de l'Ouest, et suffisant pour l'installation d'une pompe à motricité humaine – Figure 6.9). Les mesures de terrain effectuées sur le site Saré confirment également les résultats de la modélisation numérique. Notons que la roche mère est constituée de micaschistes et que la zone argileuse est certainement affectée par la présence d'argiles gonflantes, plus précisément des smectites (identique au site ARA, situé à moins d'un kilomètre, dont les résultats d'analyse au diffractomètre à rayons X, montrent la présence d'argiles gonflantes appelées smectites, voir 4.5.2).

Figure 6.9 – Photographie du forage F2 du site Saré en exploitation, implanté sur la base d'une section ERT.

6.5. Discussions : doit-on faire évoluer nos pratiques de la méthode électrique pour l'implantation ?

6.5.1. Pratique du PE et du SE

La pratique courante au Bénin et en Afrique de l'Ouest consiste à utiliser les techniques traditionnelles 1D (EP et ES) pour caractériser les structures géologiques qui peuvent souvent être 2D. Cependant, cette approche a de sérieuses limites. Les PE sont principalement interprétés sur la base de l'importance du contraste de résistivités engendré par une anomalie correspondant à une chute de la résistivité apparente. Plusieurs auteurs ont également analysé la forme et la largeur des anomalies (CIEH, 1984 en Afrique; Dieng *et al.*, 2004 et Koussoubé *et al.*, 2003 au Burkina Faso; Dibi *et al.*, 2004 en Côte d'Ivoire; Bernardi *et al.*, 1988 au Bénin, Togo, Burkina Faso, Centre Afrique et Cameroun); Darboux-Afouda *and* Louis, 1989 au Bénin), mais la modélisation numérique réalisée dans le chapitre précédent démontre que certaines structures inintéressantes pour l'hydrogéologue, comme les zones argileuses (*i.e.* les structures C et D), peuvent conduire à avoir des anomalies de contrastes bien souvent supérieurs à ceux des anomalies engendrées par des structures intéressantes comme l'approfondissement de la ZA+ZFS (*i.e.* type structure B).

En plus, les résultats de modélisation de PE sont confirmés par de nombreuses mesures sur le terrain : les zones argileuses situées à la surface du sol ou plus profondément dans la ZA induisent souvent les praticiens en erreur lorsqu'ils utilisent le dispositif Schlumberger. Le dispositif Wenner est moins sensible à ces « fausses cibles » mais reste malheureusement assez insensible aux structures intéressantes comme l'approfondissement de la ZA+ZFS. Il est d'ailleurs rarement utilisé pour les mesures de PE car il est plus difficile à mettre en œuvre en sondage notamment. Enfin, quel que soit le dispositif, le PE ne peut pas caractériser les zones de fracturations subverticales non altérées.

Les intérêts et les limites du SE dans un environnement 1D sont bien connus (Telford *et al.*, 1990). Bien que des études aient mis en évidence des formes de courbes de sondages représentant des situations favorables pour une bonne implantation de forage (*e.g.* Bernardi *et al.*, 1988; Darboux-Afouda *and* Louis, 1989; Dibi *et al.*, 2004 ; Koussoubé *et al.*, 2003), pour réaliser des SE dans un environnement 2D, il est connu que la mise en œuvre de SE doit minimiser les effets 2D en déployant les électrodes dans le même sens que celui de la

structure géologique que l'on veut prospecter. Cependant, cette règle est rarement appliquée au Bénin et en Afrique de l'Ouest car elle nécessite plus de travail et de temps, notamment lorsqu'il y a de la végétation. En effet, la mise en œuvre du PE nécessite de dégager un chemin (en brousse notamment) pour aligner les électrodes dans une direction perpendiculaire à la structure géologique, puis, mettre en œuvre le SE nécessite à son tour de dégager un nouveau chemin perpendiculaire à celle du précédent PE. Même en faisant cela, la condition pour interpréter correctement un sondage électrique, *i.e.* de faire l'hypothèse que le terrain est 1D (tabulaire), n'est pas remplie de façon satisfaisante. Au Bénin et probablement dans la plupart des études en zone de végétation, la pratique courante est de mettre en œuvre le SE suivant le même chemin (layon) dégagé que celui utilisé pour le PE, *i.e.* perpendiculaire à la structure géologique. Enfin, lorsqu'il est appliqué dans un environnement 2D, rencontré fréquemment dans les aquifères de socle d'Afrique de l'Ouest, le SE décrit imparfaitement la géométrie et la résistivité du sous-sol : en effet, les modélisations et mesures de terrains effectuées dans cette étude, montrent que la ZA et la ZFS sont regroupées en une couche unique et que l'épaisseur de cette dernière est très généralement sous-estimée. Pour respecter le principe de la conductance longitudinale présenté dans le chapitre 2 avec l'équation 2.10, si l'épaisseur de l'unité altérée ZA+ZFS est sous-estimée, sa résistivité peut être également et par conséquent sous-estimée (*e.g.* Figures 6.8b et 6.8c : le SE montre une épaisseur de la ZA+ZFS variant entre 2 et 13 m avec des résistivités respectives de 2 et 20 ohm.m alors que l'ERT montre une résistivité de 50 à 100 ohm.m qui part de la surface jusqu'à plus de 30 m de profondeur).

6.5.2. Pratique de l'ERT

Les résultats de la modélisation numérique ont été confirmés par les mesures sur le terrain. Les principales limites du PE et du SE ont été surmontées par l'ERT : les zones argileuses situées près de la surface du sol ou à l'intérieur de la ZA ont été bien définies et n'ont donc pas été interprétées comme des cibles hydrogéologiques intéressantes. De plus, la plupart des structures géologiques dominantes ont été caractérisées de manière appropriée, favorisant ainsi une interprétation correcte.

Cependant, l'ERT a certaines limites. *(1)* Une zone de fracturation subverticale non altérée ne peut pas être identifiée. Toutefois, ceci n'est pas un inconvénient majeur, car la plupart des forages positifs captent les fissures/fractures subhorizontales de la ZFS engendrées

par une altération plutôt chimique. *(2)* Lorsqu'on utilise les dispositifs Wenner alpha et Wenner beta combinés (96 électrodes avec 5 m d'espacement), les structures géologiques situées à plus de 50 m de profondeur ne peuvent pas être correctement identifiées dès que la ZA est argileuse (résistivité moyenne inférieure à 100 voire 150 ohm.m). Le dispositif pôle-dipôle améliore l'identification des structures profondes lorsqu'elles mesurent au moins 20 m de large. Cependant, le pôle-dipôle est rarement utilisé sur le terrain car il est plus difficile à mettre en œuvre : il nécessite plus de câble électrique, une distance minimale égale ou supérieure à 5 fois la moitié de la ligne des électrodes est nécessaire (Razafindratsima *and* Lataste, 2014). L'installation d'électrodes distantes (à l'infini) est donc plus coûteuse pour l'équipe de terrain, mais dans les zones où la ZA est réputée épaisse (> 30 m) avec des résistivités généralement faibles (< 150 ohm.m), ce dispositif doit absolument être considéré. Les programmes d'implantions de forages devraient tenir compte de ce surcoût.

Avec l'étude de (Soro *et al.*, 2017), l'efficacité de l'ERT pour la caractérisation de la ZA+ZFS est confirmée ainsi que la limitation de l'ERT pour caractériser les fractures subverticales profondes situées sous une unité fortement altérée, le cas échéant. L'utilisation de la méthode de résonnance magnétique des protons (RMP) est complémentaire dans le processus d'implantation de forage (surtout pour des gros débits destinés aux adductions d'eau à long terme) afin d'améliorer la connaissance de l'aquifère de socle en déterminant sa réserve en eau et sa transmissivité (Vouillamoz *et al.*, 2014). Pour nous, elle est un moyen, une fois calibrée, de compléter, avec l'ERT, les graphes de corrélation de la résistivité avec les paramètres hydrodynamiques.

6.5.3. Utilisation de l'ERT et de la RMP pour enrichir la corrélation entre résistivité ZA et porosité de drainage.

Pourquoi l'ERT et la RMP ?

Pour l'établissement des relations obtenues dans le chapitre 4 entre la résistivité (meilleure que la chargeabilité pour les relations géophysique/hydrogéologie) et la porosité de drainage, nous avons utilisé uniquement les données de résistivités de la ZA obtenues par diagraphies et les données de porosité de drainage issues des pompages d'essai.

Afin d'obtenir plus de données de résistivité de ZA nous avons investigué d'autres sites dans notre zone d'étude, non pas en réalisant de nouvelles diagraphies (coûteuses car il faut inéluctablement réaliser des forages), mais en appliquant l'ERT car, en plus de sa capacité à reconnaître les conditions intéressantes et à éviter celles inintéressantes pour le forage, elle donne des valeurs de résistivités inversées assez proches des données de diagraphie. La Figure. 6.10 montre une superposition des résistivités de diagraphie et celles d'ERT (résultat d'inversion) obtenues sur le site F68 avec la délimitation des compartiments faite à partir de la lithologie des forages (voir Figure 3.10). On remarque qu'il n'y a pas d'« offset » entre les données de diagraphie (corrigées, rappelons-le, de K et de l'effet du trou) et les valeurs inversées d'ERT : elles sont très proches les unes des autres. La différence moyenne observée entre elles est d'environ 15 % due au fait que de brusques augmentations de résistivités peinent parfois à être reproduites correctement par l'ERT. Une variation importante et continue de résistivités indiquant la zone d'interface ZA/ZFS s'observe aux mêmes profondeurs en diagraphie et dans les valeurs inversées (entre 25 et 33 m environ). Ainsi, l'ERT a permis d'identifier les interfaces ZA/ZFS et d'extraire les valeurs de résistivités de la ZA. En plus, les gammes de résistivités par compartiment obtenues sur notre zone d'étude, ont aidé à confirmer la définition des épaisseurs de la ZA des nouveaux sites.

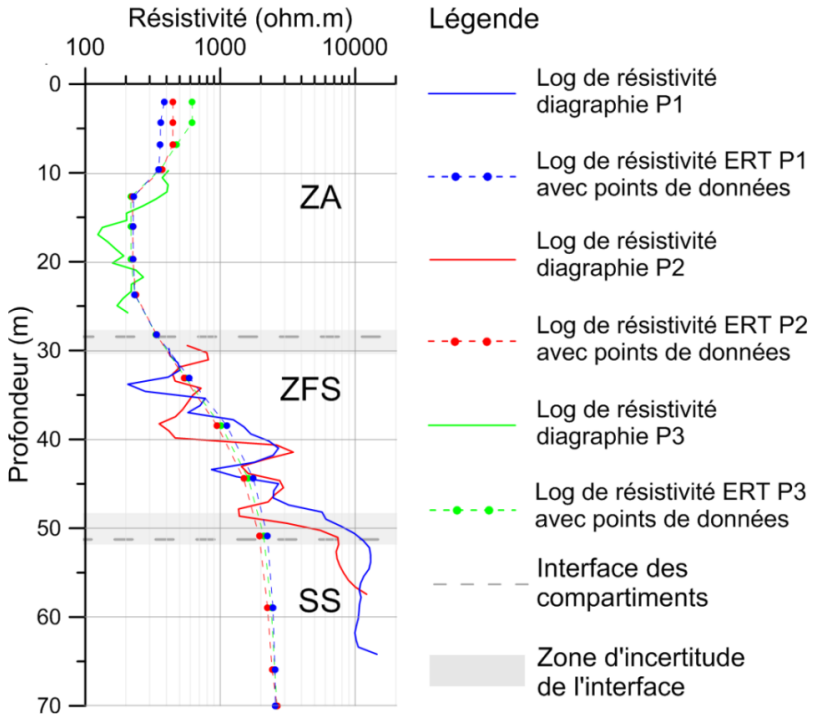


Figure 6.10 – Superposition des valeurs de résistivité ERT avec celles de diagraphie au droit de P1, P2 et P3 (site F68).

La résonnance magnétique des protons (RMP) mesure la teneur en eau du sous-sol. Elle est intéressante pour la détermination du volume d'eau (stock) contenu dans l'aquifère et la transmissivité de ce dernier. Cette méthode a été appliquée en Afrique de l'Ouest (voir Boucher *et al.*, 2009) et récemment sur notre zone d'étude dans le cadre du projet GRIBA (Vouillamoz *et al.*, 2015b; Vouillamoz *et al.*, 2014). Mais l'intégration d'un volume d'investigation comparable à la taille de la boucle émettrice (souvent un carré de 50 à 150 m de côté) handicape son aptitude à préciser le point de forage à quelques mètres près. Cependant la RMP est très intéressante pour caractériser « hydrogéologiquement » deux sites/zones afin d'en choisir le/la meilleur(e).

Sept nouveaux sites ont été investigués (Figure 6.11). Sur ces sites des sections ERT, et des sondages RMP ont été réalisés pour obtenir respectivement la résistivité médiane et la porosité de drainage de la ZA. Cette dernière est obtenue en utilisant la fonction de transfert établie sur notre zone d'étude, entre la teneur en eau RMP mesurée et la porosité de drainage obtenue par pompage d'essai (Vouillamoz *et al.*, 2014).

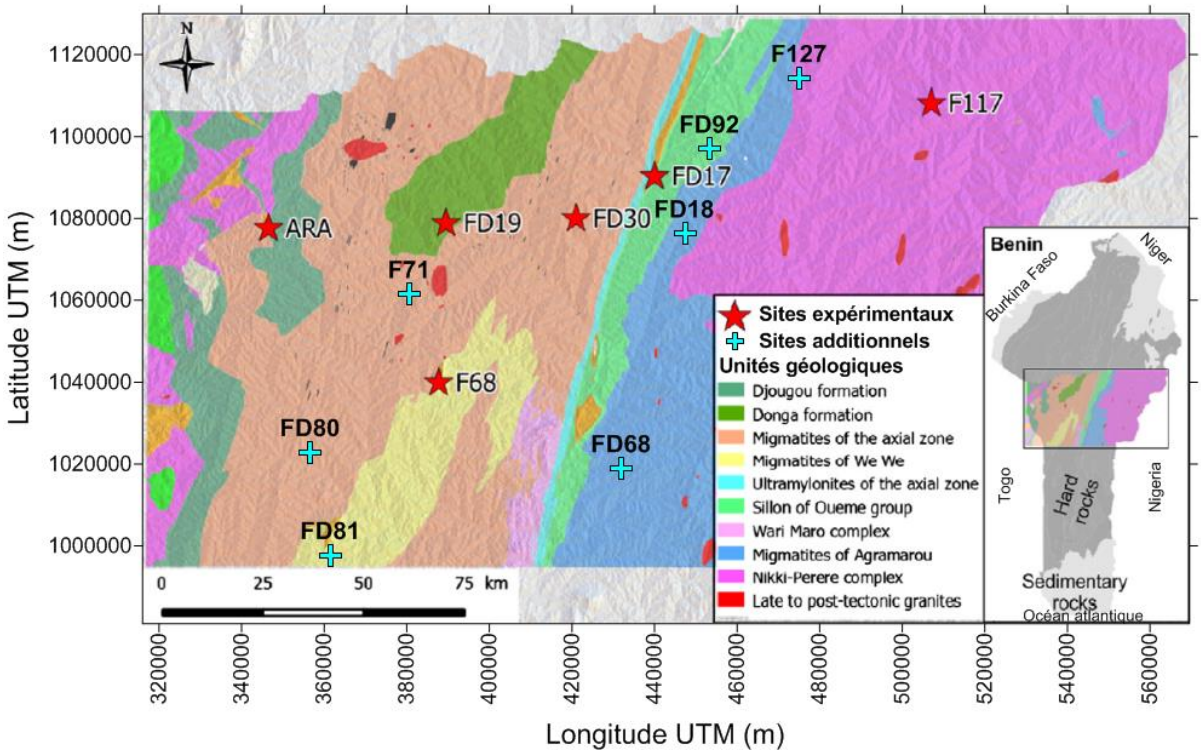


Figure 6.11 – Géologie et localisation des 7 nouveaux sites prospectés en ERT et RMP, en plus des sites expérimentaux (LETS).

Les valeurs de résistivité ZA ont été déduites seulement pour la partie de la section ERT recouverte par la boucle du sondage RMP (Figure 6.12). Nous n'avons pas déduit les valeurs de la ZFS des sections ERT car, sur plusieurs sites nous n'avons pas atteint suffisamment le socle pour être certain des valeurs de la ZFS que nous déduirons (*e.g.* site FD92, Figure 6.12).

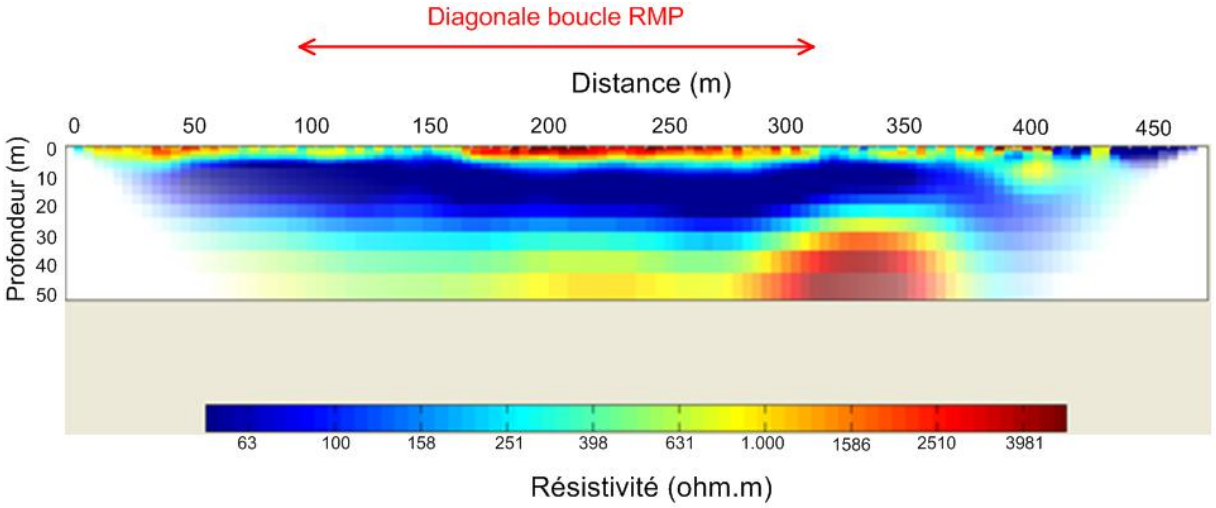


Figure 6.12 – Résultats d'inversion ERT avec représentation de la partie recouverte par le sondage RMP, exemple du site FD92.

Corrélation résistivité ZA/porosité de drainage enrichie

La corrélation obtenue est présentée ci-dessous (Figure 6.13). Les résistivités ZA médianes obtenues par ERT et les porosités de drainage obtenues par RMP sur les nouveaux sites, ont été ajoutées aux données de résistivités ZA et porosités de drainage obtenues respectivement par diagraphie et pompage d'essai sur les sites LETS. On remarque que la corrélation obtenue (Sy = 6,51*ln(rho)-27,57 avec R^2 = 0,85, si on ne prend pas en compte le point encerclé, site FD81) est sensiblement identique à celle obtenue uniquement avec les données de diagraphie et de pompage (Sy = 5,27*ln(rho)-20,84 avec R^2 = 0,85). Nous pensons que la conductivité de l'eau souterraine du site FD81 (que nous n'avons pas pu avoir) pourrait être à l'origine de cette démarcation par rapport à la relation obtenue. Une recherche sur la prise en compte de l'influence de la conductivité de l'eau dans la relation est à envisager. On retient pour le moment les informations suivantes qui confirment la première relation :

- une corrélation positive entre la résistivité de la ZA et la porosité de drainage ;
- une porosité de drainage de 1 à 10 % correspond à des résistivités de 60 à 400 ohm.m.

La résistivité « cible » dans la ZA reste entre 150 à 400 ohm.m : tout doit être mis en œuvre pour obtenir une image la plus correcte possible des VALEURS de résistivités de la ZA, et dans un second temps bien sûr, les épaisseurs.

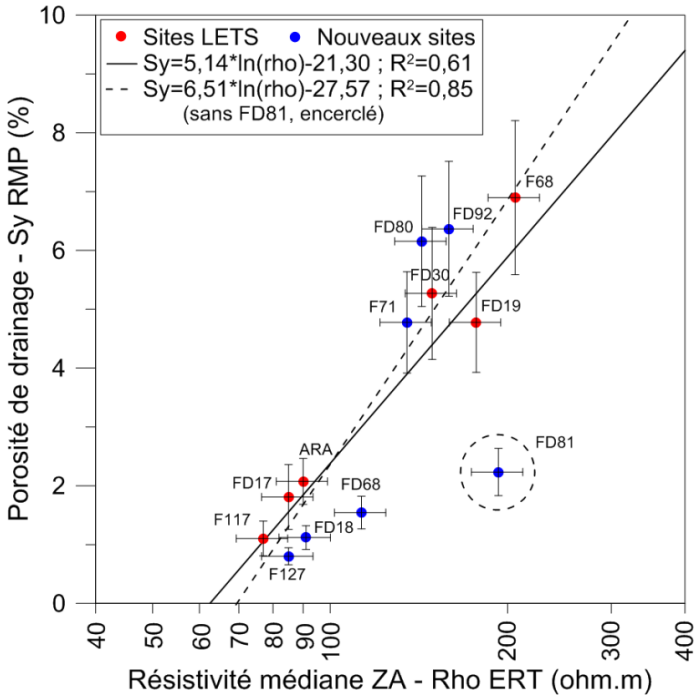


Figure 6.13 – Relation RhoZA/Sy enrichie.

6.5.4. Estimation du coût de l'ERT et son impact

Une estimation des coûts de mise en œuvre des techniques de prospection électrique a été faite pour mesurer l'impact financier de l'utilisation de l'ERT au lieu des PE et SE. Cette étude des coûts est inspirée du travail de Vouillamoz *et al.* (2002) au Cambodge. Le tableau 6.1 montre les coûts moyens des prospections géophysiques au Bénin en 2017. Les calculs effectués ci-dessous sont basés sur les coûts locaux utilisés au Bénin en 2017 et représentent des valeurs moyennes issues de plusieurs entretiens avec des ingénieurs et praticiens du domaine de la prospection géophysique pour l'implantation des forages en zone de socle. Les calculs peuvent être adaptés à d'autres coûts locaux. Par conséquent, les conclusions tirées ici ne s'appliquent qu'au cas béninois et pourraient différer dans d'autres pays.

Les calculs prennent en compte le personnel (ingénieur, technicien et travailleurs non qualifiés), l'achat d'un véhicule, les coûts de fonctionnement et d'amortissement, l'équipement géophysique (achat, entretien et dépréciation) et les coûts de soutien administratif. Les équipements géophysiques retenus pour le calcul sont ceux couramment utilisés en Afrique : un résistivimètre robuste de 250 W adapté aux PE et SE, et un résistivimètre de 200 W avec un interrupteur (multiplexeur), 96 électrodes et des câbles d'espacement inter-électrodes de 10 m pour l'ERT. Les coûts d'appui administratif sont les salaires de bureau et les coûts administratifs. Les calculs sont basés sur les chiffres suivants (Tableau 6.1) : quatre sites sont étudiés par semaine pendant six mois de travail (correspondant à la saison sèche), et le coût moyen d'un forage positif et équipé (bh+) est de 5.750.000 FCFA (8.765 €) et 2.500.000 FCFA (3.811 €) pour un forage négatif (bh-), ces montants représentent la moyenne des coûts béninois enregistrés lors de nos enquêtes.

Le tableau 6.1 montre que le coût total d'une prospection ERT est environ 20 % plus élevé qu'une prospection avec uniquement des PE+SE. D'après Vouillamoz *et al.* (2002), lorsque le PE+SE ou l'ERT est utilisé pour la prospection géophysique, l'équilibre financier d'un budget de programme de financement de forages est :

$$r_x bh_x = r_x bh^+ + (1-r_x)\, bh^- + c_x \qquad (6.1)$$

avec : r_x = le taux de réussite du forage (%), bh_x = le coût moyen d'un forage d'exploitation, bh^+ = le coût moyen d'un forage positif et équipé, bh^- = le coût moyen d'un forage négatif, c_x le coût moyen des prospections géophysiques par forage. Dans la suite, l'indice « x » devient x = 1 pour PE+SE et x = 2 pour ERT.

La technique ERT permet d'économiser de l'argent à l'échelle d'un programme de forage si $bh_2 < bh_1$. Cela signifie :

$$r_2 > r_1\, (c_2 + bh^-) / (bh^- + c1) \qquad (6.2)$$

En utilisant l'équation (6.2), considérant le coût total de la prospection ERT du tableau 6.1, l'utilisation de l'ERT permet d'économiser de l'argent à l'échelle du programme si r_2 augmente de 1 à 3 % par rapport à r_1 (r_1 compris entre 40 et 90 %). Ainsi, dès que l'utilisation de l'ERT fait évoluer le taux de réussite du forage de plus de 5 % par rapport au taux de réussite obtenu avec le PE+SE (*e.g.* si on passe de 60 à 65 % de réussite dans une

zone donnée), les coûts de campagnes de forages baissent et on fait des économies à l'échelle du programme. Selon les résultats de la modélisation numérique et les mesures de terrain réalisées au Bénin, une augmentation de 5 % du taux de réussite des forages peut être espérée en utilisant l'ERT, quel que soit le taux de réussite obtenu avec les techniques traditionnelles au paravent. Ceci grâce à sa capacité à discriminer les zones argileuses (qui sont à éviter), des approfondissements de l'altération non argileuse (résistivités comprises entre 150 et 400 ohm.m à rechercher dans la ZA).

Tableau 6.1 – Présentation des données utilisés pour le calcul des coûts de l'EP+SE et de l'ERT.

	Staff		Un équipement géophysique			Un véhicule 4X4 bâché (pick-up)			Frais administratifs par prospection (FCFA)	Nb de prospections par an	Coût total par prospection (FCFA)
	Nb	Cpp (FCFA)	Prix d'achat (FCFA)	Da (an)	Cpp (FCFA)	Prix d'achat (FCFA)	Da (an)	Cpp (FCFA)			
EP+ES	5	64.280	19.480.000	5	38.700	24.250.000	5	72.800	184.300	100	360.700
ERT	5	74.120	54.802.600	5	109.550	24.250.000	5	72.800	184.300	100	440.800

(nb = nombre ; cpp = coût par prospection ; da = durée d'amortissement).

Conclusion partielle

Ce chapitre confirme, grâce à des cas concrets de terrain, l'intérêt de l'ERT pour la caractérisation de la cible hydrogéologique (ZA+ZFS), et la limitation de l'ERT pour caractériser les zones de fracturation subverticale non altérées situées sous une ZA épaisse, le cas échéant. L'ERT peut permettre également, via la corrélation entre la résistivité ZA et la porosité de drainage enrichie par les données de résonance magnétique, de pouvoir estimer la porosité de drainage sur notre zone d'étude (zone de socle septentrionale du Bénin).

L'hypothèse N°4 de l'étude qui dit que la tomographie de résistivité électrique est plus efficace que les techniques traditionnelles pour la caractérisation de la cible hydrogéologique, est donc vérifiée. Sur le plan économique, on peut espérer gagner, en appliquant l'ERT à l'échelle d'un programme de réalisation de forage d'eau, si on a une augmentation du taux de réussite des forages de 5 % par rapport au taux obtenu avec les techniques traditionnelles. Nous pensons que cette augmentation de 5 % peut être largement atteinte au regard des résultats de la modélisation numérique et des résultats de terrain qui démontrent la capacité de l'ERT à discriminer les zones argileuses (à éviter) et les approfondissements de l'altération non argileuse (à rechercher).

Conclusion générale

Rappel de la problématique, de l'objectif et de la démarche générale

L'eau souterraine est la source d'eau douce la plus mobilisée pour répondre aux besoins des hommes parce qu'elle est souvent protégée de la pollution et généralement disponible dans le sous-sol. Mais au Bénin, en zone de socle avec plus de 5.000.000 d'habitants, malgré l'étude préalable d'implantation des forages destinés à capter la ressource en eau souterraine, 40 % des forages sont négatifs (débits inférieurs à 0,7 m^3/h : minimum pour l'installation d'une pompe à motricité humaine). Des statistiques similaires existent dans la sous-région Afrique de l'Ouest. Considérant les populations non desservies et les pertes financières, la réduction du taux d'échec des forages en zone de socle s'avère une urgence pour tous.

Cette étude a pour objectif de contribuer à améliorer l'implantation des forages, notamment l'implantation géophysique, pour ainsi espérer augmenter le taux de réussite des forages en zone de socle au Bénin, et plus largement en Afrique de l'Ouest. Nous avons conduit une évaluation de la méthode géophysique dite « électrique à courant continu » communément utilisée, en définissant d'abord la cible hydrogéologique pour l'implantation du forage.

La démarche scientifique suivie pour la réalisation de l'étude a été d'abord de mieux connaître les aquifères de socle en milieu tropical (comme au Bénin) pour en définir la cible hydrogéologique à privilégier pour l'implantation d'un forage. Ensuite, nous avons évalué la sensibilité des paramètres géophysiques (résistivité et chargeabilité) mesurés en forage, par rapport à la cible afin de la caractériser « géométriquement » et « hydrogéologiquement ». Enfin, nous avons également évalué la capacité des techniques électriques de mesures en surface à bien mesurer les paramètres géophysiques pour une caractérisation de la cible depuis la surface du sol.

Principaux enseignements

Les résultats auxquels ont abouti cette étude permettent de tirer des enseignements qui infirment, confirment ou complètent des informations renseignées par certains auteurs.

Aquifère de socle en milieu tropical et cible hydrogéologique

Les aquifères de socle en milieu tropical comme ceux du Bénin sont de types poreux et fissurés/fracturés, structurés selon un continuum vertical hérité du processus d'altération, et mis en place par ce dernier dont les principaux acteurs sont l'altération de la biotite, le temps, l'eau, la température (climat) et le contexte géodynamique. Les compartiments hydrogéologiques selon le modèle conceptuel sont : la Zone Altérée (ZA), la Zone Fracturée Stratiforme (ZFS), la Zone Fracturée subVerticale (ZFV) et le Socle Sain (SS).

La cible hydrogéologique à privilégier pour l'implantation des forages dans cette zone de socle n'est pas la fracture (ou zone de fracturation) tectonique comme cela est généralement conçu par les praticiens et certains auteurs, mais plutôt l'épaisseur de la ZA (avec une faible teneur en argile) et les premiers mètres de la ZFS. La ZFV non altérée (n'ayant pas produit un large approfondissement de la ZA et de la ZFS qui deviendrait en ce moment la cible à privilégier) pourrait être recherchée lorsque l'altération est décapée (situation peu rencontrée dans notre fenêtre d'étude, seulement rarement dans la zone de la faille de Kandi).

Sensibilité de la résistivité et de la chargeabilité pour la caractérisation géométrique (identification) et hydrogéologique de la cible

En comparant les valeurs de diagraphies de résistivités et de chargeabilités totales « vraies » entre elles, et avec les informations issues de forages sur 6 différents sites représentant les formations de roches de socle rencontrées au Bénin, on retient ce qui suit :

- La résistivité discrimine chaque compartiment quelle que soit la formation de roche de socle, avec des gammes de résistivités dont les médianes sont : 150 ohm.m pour la ZA, 800 ohm.m pour la ZFS et 8.000 ohm.m pour le SS. La résistivité est par conséquent efficace pour l'identification de la cible hydrogéologique à privilégier.
- La chargeabilité totale évolue globalement de la même façon que la résistivité dans la ZA uniquement quelle que soit la formation de roche de socle, avec une gamme de valeurs qui varient entre 5 et 30 mV/V. Elle n'est pas aussi pertinente que la résistivité pour l'identification de la cible hydrogéologique à privilégier.

Les relations établies entre les paramètres géophysiques électriques de chaque site, les paramètres hydrodynamiques issues de pompages d'essai de longue durée et les teneurs et

types d'argiles issues d'analyses au diffractomètre à rayons X et au test de bleu de méthylène, montrent que :

- Les paramètres géophysiques (résistivité ZA : 60 à 400 ohm.m, ZFS : 300 à 2.000 ohm.m, et chargeabilité totale : 5 à 30 mV/V) sont positivement corrélés avec les paramètres hydrodynamiques (porosité de drainage : 1 à 10 %, et conductivité hydraulique : 5.10^{-7} à 10^{-5} $m.s^{-1}$). Ces corrélations sont meilleures dans la ZA que dans la ZFS et meilleures avec la conductivité hydraulique qu'avec la porosité de drainage.
- La teneur en argile gonflante influence significativement les variations de la résistivité et de la chargeabilité totale de la ZA sur les mêmes intervalles précédents (60 à 400 ohm.m et 5 à 30 mV/V) : la résistivité et la chargeabilité totale diminuent avec la présence d'argile gonflante (smectites).
- Les paramètres hydrodynamiques sont généralement mieux corrélés avec la résistivité qu'avec la chargeabilité totale.
- La cible hydrogéologique n'est pas seulement une ZA+ZFS épaisse mais aussi une ZA peu argileuse avec une résistivité médiane comprise entre 150 et 400 ohm.m et une ZFS de résistivité médiane comprise entre 800 et 2.000 ohm.m. Ces gammes correspondent aux valeurs relativement élevées des paramètres hydrodynamiques.

Capacité des techniques de la méthode électrique à caractériser la cible hydrogéologique depuis la surface

Les modélisations numériques conduites pour simuler les résultats que produirait l'application des techniques utilisées par les praticiens (Profils Electriques – PE et Sondages Electriques – SE) et une technique plus élaborée (Tomographie de Résistivité Electrique – ERT) sur des structures simplifiées du sous-sol représentant l'aquifère de socle en milieu tropical, puis confirmées par l'application in-situ de ces mêmes techniques, démontrent que :

- Les PE ne peuvent pas caractériser une zone de fracturation subverticale non altérée dans les conditions de socle en milieu tropical, avec les dispositifs communément pratiqués.
- Les PE et surtout ceux obtenus avec un dispositif Schlumberger indiquent bien souvent une fausse cible au praticien car ils génèrent des anomalies sur les zones argileuses présentes aussi bien à la surface du sol qu'au sein de la ZA. Ces anomalies présentent presque toujours un contraste de résistivité apparente important, ce qui les

rend « sélectionnables » aux yeux du praticien comme un potentiel point d'implantation.

- Les PE peuvent aussi tromper le praticien en produisant des anomalies moins prononcées sur la cible hydrogéologique représentée par des approfondissements larges de l'unité altérée (ZA+ZFS), et inversement, les approfondissements de petites largeurs (moins intéressantes) génèrent les anomalies de résistivité apparente les plus contrastées.
- Les SE mis en œuvre au point de l'anomalie choisie sur le PE, ne permettent pas de distinguer correctement la cible hydrogéologique d'une situation inintéressante (zone argileuse) et sous-estiment dans tous les cas étudiés l'épaisseur de l'unité altérée (ZA+ZFS), ce qui trompe là aussi le praticien dans le choix du meilleur emplacement pour le forage.
- L'ERT caractérise la cible hydrogéologique tout en la différentiant des structures hydrogéologiquement défavorables et inintéressantes car elle détermine la résistivité des compartiments, la profondeur du SS et donc l'épaisseur-clef ZA+ZFS, et la zone de transition entre la ZA et la ZFS.
- L'ERT ne caractérise que rarement une ZFV non altérée dans les conditions de socle en milieu tropical, seulement lorsqu'elle est à moins de 10 m de profondeur.
- L'ERT reste d'un coût largement acceptable lorsqu'elle est mise en œuvre à l'échelle d'un programme de réalisation de forages d'eau, et qu'elle permet d'augmenter le taux de réussite des forages d'au moins 5 % par rapport au taux obtenu avec les techniques traditionnelles.

Conséquences pratiques et recommandations

Les résultats et enseignements retenus à la fin de cette thèse conduisent, dans la pratique, à :

- Rechercher pour une meilleure implantation des forages en zone de socle en milieu tropical (à altération épaisse) comme en Afrique de l'Ouest et au Bénin notamment, *la zone altérée la plus épaisse possible et peu argileuse (entre 150 et 400 ohm.m) dans le périmètre de prospection et une zone fissurée/fracturée stratiforme qui aurait une résistivité située entre 800 et 2.000 ohm.m,* constituant ainsi la cible hydrogéologique à privilégier.

- Considérer les valeurs de résistivité de la ZA et de la ZFS (respectivement comprises entre 60 et 400 ohm.m et, entre 300 et 2.000 ohm.m) comme *indicatrices d'une porosité de drainage et d'une conductivité hydraulique respectivement comprises entre 1 et 10 % et, entre* 5.10^{-7} *et* 10^{-5} $m.s^{-1}$.
- *Encourager et promouvoir l'utilisation de la tomographie de résistivité électrique* pour la caractérisation de la cible hydrogéologique car, *une augmentation de 5 % du taux de réussite, nécessaire pour économiser à l'échelle d'un programme d'implantation de forage, est vraisemblablement possible au regard des résultats obtenus dans cette étude.*

Perspectives

A l'issue de cette étude, des recherches méritent d'être poursuivies et approfondies et d'autres nouvelles opportunités de recherche sont offertes :

- La réalisation de diagraphie de résistivité électrique systématiquement après la réalisation d'un forage, permettrait d'avoir une base de données bien fournie pour une définition des gammes de résistivités par compartiment en zone de socle afin d'affiner la délimitation des compartiments hydrogéologiques via les mesures ERT. Ainsi, la cible hydrogéologique serait de mieux en mieux caractérisée.
- La recherche de points complémentaires pour renforcer et enrichir encore la relation entre la résistivité électrique et la porosité de drainage pourrait conduire à définir une relation empirique locale voire sous régionale pour l'estimation de la porosité de drainage via des valeurs de résistivités électriques obtenues par ERT uniquement, en prenant en compte, bien entendu, la possible influence de la conductivité de l'eau.
- L'analyse de plus d'échantillons au diffractomètre à rayons X pourrait renforcer le lien qu'on observe entre la teneur en argile gonflante et la résistivité électrique, pour une meilleure caractérisation de la cible hydrogéologique.
- Sachant que, la polarisation provoquée serait liée aux surfaces des minéraux argileux ainsi qu'à leur type et à leur dissémination dans la roche, des mesures au laboratoire de polarisation provoquée sur des échantillons de teneur et type d'argile connus avec une dissémination uniforme, pourraient permettre de mieux connaître le phénomène et de mieux le quantifier afin d'avoir des valeurs de chargeabilités totales correspondant à des teneurs et types d'argile donnés.

- Le développement d'une méthode de reconnaissance spatiale des surfaces altérées, à partir d'un traitement d'images, serait utile pour une étude préalable rapide permettant de positionner convenablement les sections ERT sur des zones d'intérêt.

Références

Abdul Samad, F., 2017. Polarisation provoquée: expérimentation, modélisation et applications géophysiques, thèse de doctorat de l'université Pierre et Marie Curie.

Acworth, R.I., 1987. The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. Quat. J. Eng. Geol. 20, 265–272.

Adissin Glodji, L., 2012. La zone de cisaillement de Kandi et le magmatisme associé dans la région de Savalou-Dassa (Bénin) : étude structurale, pétrologique et géochronologique, thèse de doctorat unique des Universités Jean Monnet Saint-Etienne et d'Abomey- Calavi. Spécialité : Sciences de la Terre.

Adissin Glodji, L., Bascou, J., Yessoufou, S., Ménot, R.-P., Villaros, A., 2014. Relationships between deformation and magmatism in the Pan-African Kandi Shear Zone: Microstructural and AMS studies of Ediacaran granitoid intrusions in central Bénin (West Africa). J. Afr. Earth Sci. 97, 143–160. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.04.012.

Affaton, P., Rahaman, M.A., Trompette, R., Sougy, J., 1991. The Dahomeyide Orogen: Tectonothermal Evolution and Relationships with the Volta Basin, in: Dallmeyer, D.R.D., Lécorché, D.J.P. (Eds.), The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives, IGCP-Project 233. Springer Berlin Heidelberg, pp. 107–122. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84153-8_6.

Aizebeokhai, A.P., Oyeyemi, K.D., 2017. Geoelectrical characterisation of basement aquifers: the case of Iberekodo, southwestern Nigeria. Hydrogeol. J. 1–14. https://doi.org/10.1007/s10040-017-1679-9.

Ajibade, A.C., Wright, J.B., 1989. The Togo-Benin-Nigeria Shield: evidence of crustal aggregation in the Pan-African belt. Tectonophysics 165, 125–129. https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90041-3.

Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, J.M., Yalo, N., Campoy, A., Lawson, F., Adihou, C., 2014. Résistivité et polarisation électrique des aquifères de socle au Bénin. 9ème colloque Geofcan -13/14 Novembre 2014 – Orsay.

Alle, I.C., Descloitres, M., Vouillamoz, J.-M., Yalo, N., Lawson, F.M.A., Adihou, A.C., 2018. Why 1D electrical resistivity techniques can result in inaccurate siting of boreholes in hard rock aquifers and why electrical resistivity tomography must be preferred: the example of Benin, West Africa. J. Afr. Earth Sci. 139, 341–353. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.12.007.

Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Am. Inst. Min. Metallurg. Petr. Eng. Tech., paper 1422.

Banque mondiale, 2018. Croissance de la population (% annuel), 2018, [en ligne], https://donnees.banquemondiale.org/indicateur/sp.pop.grow?end=2018&start=1960 (consulté le 09 juillet 2019).

Banque mondiale, 2019. Afrique subsaharienne : trois ans après la crise, la croissance reste bloquée sous les 3% - Communiqué de presse n° : AFR/066/2019, 08 avril 2019, [en ligne], https://www.banquemondiale.org/fr/news/press-release/2019/04/08/growth-in-sub-saharan-africa-remains-below-three-percent-three-years-after-crisis (consulté le 10 juillet 2019).

Banton, O., Bangoy, L.M., 1997. Hydrogéologie, Multiscience environnementale des eaux souterraines, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 460 p. ed.

Barker, R., Moore, J., 1998. The application of time- lapse electrical tomography in groundwater studies. Lead. Edge 17, 1454–1458. https://doi.org/10.1190/1.1437878.

BBC, 2017. "British Broadcasting Corporation". Catastrophes naturelles, un été meurtrier, 19 septembre 2017, [en ligne], https://www.bbc.com/afrique/region-41320673 (consulté le 10 juin 2019).

Beauchamp, J., 2005. Les argiles, 15 octobre 2005, [en ligne] https://www.u-picardie.f/beauchamp/mst/argiles.htm (consulté le 21 février 2018).

Beck, M., Girardet, D., 2002. Apport des diagraphies électriques expéditives lors de lamise en oeuvre de l'hydrofracturation au Burkina Faso. Rapport de Master, Université de Lausanne.

Berger, J., Camerlo, J., Fahy, C., Haubert, M., 1980. Etudes des ressources en eaux souterraines dans une région de socle cristallin: la boucle du cacao, Côte d'Ivoire (Groundwater resources studies in a crystalline basement rock: the cocoa loop, Ivory Coast). Groun Bull 2è série n°4, (1980-81) p.273-291.

Bernardi, A., Detay, M., De Gramont, H., 1988. Corrélations entre les paramètres géoélectriques et les caractéristiques hydrodynamiques des forages en zone de socle, Hydrogéologie, N° 4, pp 245-253.

Bhattacharya, P.K., Patra, H., 1968. Direct current geoelectric, sounding methods in geochemistry and geophysics. Elsevier, Amsterdam, P. 135.

Binley, A., Kemma, A., 2005. DC resistivity and induced polarization methods. Dans : Hydrogeophysics. N° 50 dans Water Science and Technology Library. Springer Netherlands, P. 129-156, DOI : 10.1007/1-4020-3102-5_5.

Biscaldi, R., 1968. Problèmes hydrogéologiques des régions d'affleurement de roches éruptives et métamorphiques sous climat tropical. Hydrogéol. Bull. Bur. Rech. Géol. Min., Deuxième série. Section III, N°2, 7–22.

Bisdom, E.B.A., Stoops, G., Delvigne, J., Curmi, P., Altemuller, H.J., 1982. Micromorphology of weathering biotite and its secondary products. Contrib. No3 Advis. Panel Weather. Phenom. Neoformations Sub-Comm. Soil Micromorphol. ISSS Pedol. XXXII 2 225–252.

Borne, V., 1990. La méthode électromagnétique EM 34-3 pour la prospection de sub-surface. Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. - Bull. Assoc. Int. Géologie Ing. 42, 11–20. https://doi.org/10.1007/BF02592615.

Boucher, M., Favreau, G., Descloitres, M., Vouillamoz, J.-M., Massuel, S., Nazoumou, Y., Cappelaere, B., Legchenko, A., 2009. Contribution of geophysical surveys to groundwater modelling of a porous aquifer in semiarid Niger: An overview. Comptes Rendus Geosci. 341, 800–809. https://doi.org/10.1016/j.crte.2009.07.008.

Boutt, D.F., Diggins, P., Mabee, S., 2010. A field study (Massachusetts, USA) of the factors controlling the depth of groundwater flow systems in crystalline fractured-rock terrain. Hydrogeol. J. 18, 1839–1854. https://doi.org/10.1007/s10040-010-0640-y.

Braun, J.-J., Descloitres, M., Riotte, J., Fleury, S., Barbiero, L., Boeglin, J.-L., Violette, A., Lacarce, E., Ruiz, L., Sekhar, M., Mohan Kumar, M.S., Subramanian, S., Dupre, B., 2009. Regolith mass balance inferred from combined mineralogical, geochemical and geophysical studies: Mule Hole gneissic watershed, South India. Geochim. Cosmochim. Acta Vol. 73, Issue 4, 935–961. https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.013.

Caby, R., Sial, A.N., Arthaud, M., Vauchez, A., 1991. Crustal Evolution and the Brasiliano Orogeny in Northeast Brazil, in: Dallmeyer, D.R.D., Lécorché, D.J.P. (Eds.), The West African Orogens and Circum-Atlantic Correlatives, IGCP-Project 233. Springer Berlin Heidelberg, pp. 373–397. https://doi.org/10.1007/978-3-642-84153-8_16.

Calow, R.C., Macdonald, A.M., Nicol, A.L., Robins, N.S., 2010. Ground water security and drought in Africa: linking availability, access, and demand. Ground Water 48, 246–256. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00558.x.

Carlsson, A., Olsson, T., 1980. Caractéristiques de fracture et propriétés hydrauliques d'une région au sous-sol cristallin en Suède. Hydrogéologie Bull Bur Rech Géol Min.

Castaing, C., Triboulet, C., Feybesse, J.L., Chèvremont, P., 1993. Tectonometamorphic evolution of the Ghana, Togo and Benin in the light of the Pan-African/Brasiliano orogeny. Tectonophysics 218, 323–342.

Chandra, S., Dewandel, B., Dutta, S., Ahmed, S., 2010. Geophysical model of geological discontinuities in a granitic aquifer: Analyzing small scale variability of electrical resistivity for groundwater occurrences. J. Appl. Geophys. 71, 137–148. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.06.003.

Chapellier, D., 1987. Diagraphies appliquées à l'hydrologie, Lavoisier. ed, Technique et Documentation. Paris.

Chilton, P.J., Smith-Carington, A.K., 1984. Characteristics of the weathered basement aquifer in Malawi in relation to rural water supplies. In: Challenges in African Hydrology and Water Resources (Proceedings of the Harare Symposium, July 1984. Edited by D.E. Walling, S.S.D. Foster and P. Wurzel). IAHS Publ. no. 144. IAHS, pp. 57–72.

Chilton, P.J., Foster, S.S.D., 1995. Hydrogeological Characterisation And Water-Supply Potential Of Basement Aquifers In Tropical Africa. Hydrogeol. J. 3, 36–49. https://doi.org/10.1007/s100400050061.

Cho, M., Ha, K.-M., Choi, Y.-S., Kee, W.-S., Lachassagne, P., Wyns, R., 2003. Relationship between the permeability of hard-rock aquifers and their weathered cover based on geological and hydrogeological observation in South Korea. IAH Conference on "Groundwater in Fractured Rocks", 15–19 September 2003 Prague.

CIEH, 1984. Utilisation des méthodes géophysiques pour la recherche d'eau dans les aquiféres discontinus, Rapport BURGEAP R. 543/E. 1219. ed. CIEH (Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques), Paris.

Cole, K.S., Cole, R.H., 1941. Dispersion and Absorption in Dielectrics I. Alternating Current Characteristics. J. Chem. Phys. 9, 341–351. https://doi.org/10.1063/1.1750906.

Comte, J.-C., Cassidy, R., Nitsche, J., Ofterdinger, U., Pilatova, K., Flynn, R., 2012. The typology of Irish hard-rock aquifers based on an integrated hydrogeological and geophysical approach. Hydrogeol. J. 20, 1569–1588. https://doi.org/10.1007/s10040-012-0884-9.

Courtois, N., Lachassagne, P., Wyns, R., Blanchin, R., Bougaïré, F.D., Somé, S., Tapsoba, A., 2010. Large-Scale Mapping of Hard-Rock Aquifer Properties Applied to Burkina Faso. Ground Water 48, 269–283. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00620.x.

d'Abbundo, A., 2017. L'Afrique au défi de sa démographie, 17 juin 2017, [en ligne] https://www.la-croix.com/Economie/Monde/LAfrique-defi-demographie-2017-06-12-1200854288 (consulté le 03 juillet 2019).

Dada, S.S., 2009. West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region, Edited by R.J. Pankhurst, R.A.J. Trouw, B.B. de Brito Neves, M.J. de Wit Geological Society Special Publication 294, London, 2008. ISBN 978-1862392472, 432 pp. £95. Antarct. Sci. 21, 681. https://doi.org/10.1017/S0954102009990587.

Dahlin, T., 2001. The development of DC resistivity imaging techniques. Comput. Geosci. 27, 1019–1029. https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00160-6.

Darboux-Afouda, R., Louis, P., 1989. Contribution des mesures de l'anisotropie électrique à la recherche des aquifères de fracture en milieu cristallin au Bénin. Geophys. Prospect. 37, 91–105.

Descloitres, M., Ruiz, L., Sekhar, M., Legchenko, A., Braun, J.-J., Mohan Kumar, M.S., Subramanian, S., 2008. Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding. Hydrol. Process. 22, 384–394. https://doi.org/10.1002/hyp.6608.

Descloitres, M., Séguis, L., Legchenko, A., Wubda, M., Guyot, A., Cohard, J.M., 2011. The contribution of MRS and resistivity methods to the interpretation of actual evapo-transpiration measurements: a case study in metamorphic context in north Bénin. Surf. Geophys. 9. https://doi.org/10.3997/1873-0604.2011003.

Dewandel, B., Lachassagne, P., Wyns, R., Maréchal, J.C., Krishnamurthy, N.S., 2006. A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. J. Hydrol., Hydro-ecological functioning of the Pang and Lambourn catchments, UKResults from the Lowland Catchment Research (LOCAR) initiative 330, 260–284. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026.

Dewandel, B., Perrin, J., Ahmed, S., Aulong, S., Hrkal, Z., Lachassagne, P., Samad, M., Massuel, S., 2010. Development of a tool for managing groundwater resources in semi-arid hard rock regions: application to a rural watershed in South India. Hydrol. Process. 24, 2784–2797. https://doi.org/10.1002/hyp.7696.

Dewandel, B., Lachassagne, P., Zaidi, F.K., Chandra, S., 2011. A conceptual hydrodynamic model of a geological discontinuity in hard rock aquifers: Example of a quartz reef in granitic terrain in South India. J. Hydrol. 405, 474–487. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.050.

Dey, A., Morrison, H.F., 1979. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three- dimensional structures. GEOPHYSICS 44, 753–780. https://doi.org/10.1190/1.1440975.

Dibi, B., Inza, D., Goula, B.A., Savané, I., Biemi, J., 2004. Analyse statistique des paramètres influençant la productivité des forages d'eau en milieu cristallin et cristallophyllien dans la région d'Aboisso (Sud-Est de la Côte D'Ivoire). Sud Sci. Technol. 13, 22–31.

Dieng, B., De Heusch Kouassi, A., Bakyono, B.A., 2004. Optimisation de l'implantation géophysique des forages en zone de socle au Nord du Burkina Faso. Sud Sci. Technol. 12, 21–30.

Dutta, S., Krishnamurthy, N.S., Arora, T., Rao, V.A., Ahmed, S., Baltassat, J.M., 2006. Localization of water bearing fractured zones in a hard rock area using integrated geophysical techniques in Andhra Pradesh, India. Hydrogeol. J. 14, 760–766. https://doi.org/10.1007/s10040-005-0460-7.

Florsch, N., Llubes, M., Téreygeol, F., 2012. Induced polarization 3D tomography of an archeological direct reduction slag heap. Near Surface Geophysics, Vol. 10(1957).

Foucault, A., Raoult, J.-F., Cecca, F., Platevoet, B., 2014. Dictionnaire de géologie tout en couleur: 5000 définitions. Dunod, Paris.

Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J., Auken, E., Christiansen, A., 2012. Mapping of landfills using time-domain spectral induced polarization data : the Eskelund case study. Near Surface Geophysics, Vol. 10(1957).

Gnamba, F.M., Oga, Y.M.S., Gnangne, T., Lasm, T., Biémi, J., Kouakou, Y.K.N., 2014. Analyse de la productivité des aquifères de fissures du socle paléoprotérozoïque de la région de Katiola (centre-nord de la Côte d'Ivoire). Eur. Sci. J. 10.

Guiraud, R., Alidou, S., 1981. La faille de Kandi (Bénin), témoin du rejeu fini-crétacé d'un accident majeur à l'échelle de la plaque africaine. Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris 293, 779–782.

Günther, T., 2004. PhD: Inversion methods and resolution analysis for the 2D/3D reconstruction of resistivity structures from DC measurements. Univ. Min. Technol. Freib. Ger.

Hill, S.M., 1996. The differential weathering of granitic rocks in Victoria. Aust. J Aust Geol 16 271–276.

Hill, S.M., Ollier, C.D., Joyce, E.B., 1995. Mesozoic deep weathering and erosion: an example from Wilson's Promontory, Australia. Z Geomorphol NF 39 331–339.

IDMC, 2018. Observatoire des situations de déplacements internes. Rapport mondial 2018 sur les déplacements internes (GRID 2018), 2018, [en ligne], http://www.internal-displacement.org/global-report/grid2018/downloads/misc/2018-GRID-Highlights-FR.pdf (consulté le 09 juillet 2019).

INSAE (Institut Nationale de la Statistique et de l'Analyse économique), 2015. RGPH4 : que retenir des effectifs de population en 2013 ?, juin 2015, [en ligne] https://www.insae-bj.org/images/docs/insae-statistiques/demographiques/population/Resultats%20definitifs%20RGPH4.pdf (consulté le 13 mai 2019).

Interpex Ltd, 2002. IX1D Resistivity Inversion Program Golden, Colorado [WWW Document]. URL http://www.interpex.com/SoftwareIndex.htm (accessed 2.20.17).

Jackson, P.D., Taylor-Smith, D., Stanford, P.N., 1978. Resistivity, porosity, particle shape. Relationships for marine sand. Geophysics, 43 : p. 1250-1268.

Jahns, R.H., 1943. Sheet structure in granites, its origin and use as a measure of glacial erosion in New England. J. Geol., 51, 71–98. J Geol.

Joseph, S., Ingham, M., Gouws, G., 2015. Spectral induced polarization measurements on New Zealand sands - dependence on fluid conductivity. Near Surface Geophysics, Vol. 13(2061).

Keller, G.V., Frischknecht, F.C., 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press.

Keller, G.V., 1988. Rock and mineral properties. In Electromagnetic methods in Applied Geophysics, vol. 1, Nabighian, M., Editor. Socety of Exploration Geophysicists.

Koch, K., Kemma, A., Irving, J., Holliger, K., 2011. Impact of changes in grain size and pore space on the hydraulic conductivity and spectral induced polarization response of sand. Hydrol. Earth Syst. Sci., Vol. 15(6), p. 1785-1794.

Koita, M., Jourde, H., Koffi, K.J.P., Da Silveira, K.S., Biaou, A., 2013. Characterization of weathering profile in granites and volcanosedimentary rocks in West Africa under

humid tropical climate conditions. Case of the Dimbokro Catchment (Ivory Coast). J. Earth Syst. Sci. 122, 841–854. https://doi.org/10.1007/s12040-013-0290-2.

Konate, M., 1996. Evolution tectono-sédimentaire du bassin paléozoïque de Kandi (Nord Bénin, Sud Niger). Un témoin de l'extension post-orogénique de la chaîne panafricaine = Tectono-sedimentary evolution of Kandi Basin (North Benin, South Niger). A witness of post-orogenic extension of panafrican chain [WWW Document]. URL http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=177073 (accessed 5.7.17).

König, C., 2016. L'importance de l'eau pour l'homme et les êtres vivants, 21 octobre 2016, [en ligne] https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-eau-elle-encore-bleue-618/page/7/ (consulté le 09 juillet 2019).

Koussoubé, Y., Nakolendoussé, S., Bazié, P., Savadogo, A.N., 2003. Typologie des courbes de sondages électriques verticaux pour la reconnaissance des formations superficielles et leur incidence en hydrogéologie de socle cristallin du Burkina Faso. Sud Sci. Technol. 10, 26–32.

Kunetz, G., 1966. Principles of direct current resistivity prospecting, Gebrûder Bomtraeger, Berlin -Nilkolassee.

Lachassagne, P., Wyns, R., Bérard, P., Bruel, T., Chéry, L., Coutand, T., Desprats, J.-F., Le Strat, P., 2001. Exploitation of high-yields in hard-rock aquifers: downscaling methodology combining gis and multicriteria analysis to delineate field prospecting zones. Ground Water 39, 568–581.

Lachassagne, P., Wyns, R., Dewandel, B., 2011. The fracture permeability of Hard Rock Aquifers is due neither to tectonics, nor to unloading, but to weathering processes. Terra Nova 23, 145–161. https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2011.00998.x.

Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2014. Le modèle conceptuel des aquifères de roche dure altérée et ses applications pratiques. Fract. Rock Hydrogeol. N°20 Int. Assoc. Hydrogeol. Sel. Pap. Ed. J M Sharp Jr CRC Press Taylor Francis Group Pp 13-46.

Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2017. Review of the hydrogeology of weathered crystalline/hard rock aquifers - Operational applications for their survey and management. Geological Society of London Special Publication, in press.

Le Lay, M., Galle, S., 2005. Variabilités interannuelle et intra-saisonnière des pluies aux échelles hydrologiques. La mousson ouest-africaine en climat soudanien / Seasonal cycle and interannual variability of rainfall at hydrological scales. The West African monsoon in a Sudanese climate. Hydrol. Sci. J. 50, 509–524. https://doi.org/10.1623/hysj.50.3.509.65029.

Lloyd, J.W., 1999. Water resources of hard rock aquifers in arid and semi-arid zones. Unesco Publishing.

Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. Geophys. Prospect., 44: 499-523.

Loke, M.H., 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. Tech. Note Geotomo Softw. Available on line at http://www.geoelectrical.com.

Louvet, S., Fontaine, B., Roucou, P., 2003. Active phases and pauses during the installation of the West African monsoon through 5-day CMAP rainfall data (1979-2001): WEST AFRICAN MONSOON/CMAP RAINFALL DATA. Geophys. Res. Lett. 30. https://doi.org/10.1029/2003GL018058.

Mabee, S.B., Curry, P.J., Hardcastle, K.C., 2002. Correlation of Lineaments to Ground Water Inflows in a Bedrock Tunnel. Ground Water 40, 37–43. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2002.tb02489.x.

MacDonald, A.M., Bonsor, H.C., Dochartaigh, B.É.Ó., Taylor, R.G., 2012. Quantitative maps of groundwater resources in Africa. Environ. Res. Lett. 7, 024009.

Magnan, J.P., Youssefian, G., 1989. Essai au bleu deméthyì ene et classification géotechnique des sols, Bull. Liaison Labo P. et Ch, vol.159, pp.93-104, 1989.

Maignien, R., 1958. Le cuirassement des sols en Guinée : Afrique occidentale. ORSTOM, Paris. Available at: http://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:10817.

Mandl, G., 2005. Rock Joints. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg. https://doi.org/10.1007/b137623.

Maréchal, J.C., Dewandel, B., Subrahmanyam, K., 2004. Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a

hard rock aquifer. Water Resour. Res. 40, W11508. https://doi.org/10.1029/2004WR003137.

McCandless, D., 2014. Courrier international N° 1258 du 11 au 17 décembre 2014, la planète bleue, comment l'eau se répartit-elle sur la Terre ? Quelle part est contenue dans les organismes vivants ?, 2014, [en ligne], http://zone-ebook.com/magazines/11090-lien-direct-courrier-international-n-1258-du-11-au-17-dcembre-2014.html (consulté le 15 novembre 2015).

McFarlane, M.J., 1992. Groundwater movement and water chemistry associated with weathering profiles of the African surface in parts of Malawi. Geol. Soc. Lond. Spec. Publ. 66, 101–129. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1992.066.01.06.

McNeill, D.J., 1980. Electrical conductivity of soils and rocks. GEONICS, Technical Note TN-5.

Meyer de Stadelhofen, C., 1991. Applications de la géophysique aux recherches d'eau. Techniques & Doc.

Ministère de l'Energie de l'Eau et des Mines - République du Bénin, 2017. Stratégie nationale d'approvisionnement en eau potable en milieu rural 2017 – 2030, Mai 2017, [en ligne] http://documents.worldbank.org/curated/en/717341540991067886/pdf/National-Strategy-for-Rural-Water-Supply-2017-2030.pdf (consulté le 01 juillet 2019).

Mufti, I.R., 1976. Finite difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two dimensional structures. GEOPHYSICS 41, 62–78. https://doi.org/10.1190/1.1440608.

Mukherji, A., 2008. Spatio-temporal analysis of markets for groundwater irrigation services in India: 1976–1977 to 1997–1998. Hydrogeol. J. 16, 1077–1087. https://doi.org/10.1007/s10040-008-0287-0.

Office Béninois des Mines, 1984a. Carte géologique du Bénin / République populaire du Bénin, levés effectués entre 1977 et 1980 par MM. P. Affaton, A. Houessou (Obemines), J.L. Lasserre (BRGM)... [et al.] ; coordination P.L. Vincent et G. Hotin (BRGM)... / Cotonou.

Office Béninois des Mines, 1984b. Notice explicative de la carte géologique à 1/200 000 (Feuille Djougou-Parakou-Nikki).

Olayinka, A.I., 1992. Geophysical siting of boreholes in crystalline basement areas of Africa. J. Afr. Earth Sci. Middle East 14, 197–207. https://doi.org/10.1016/0899-5362(92)90097-V.

Oliva, P., Viers, J., Dupre, B., 2003. Chemical weathering in granitic environments. Chem Geol 202 225– 256.

Ollier, C.D., 1988. The regolith in Australia. Earth-Sci Rev 25 355–361.

Olorunfemi, M.O., Fasuyi, S.A., 1993. Aquifer types and the geoelectric/hydrogeologic characteristics of part of the central basement terrain of Nigeria (Niger State). J. Afr. Earth Sci. Middle East 16, 309–317. https://doi.org/10.1016/0899-5362(93)90051-Q.

ONU (Organisation des Nations Unies), 2015. ODD 6 - Garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau, septembre 2015, [en ligne], https://www.agenda-2030.fr/odd/odd-6-garantir-lacces-de-tous-leau-et-lassainissement-et-assurer-une-gestion-durable-deshttps://www.scribbr.fr/normes-apa/citer-sources-internet/ (consulté le 02 février 2019).

Owen, R., Maziti, A., Dahlin, T., 2007. The relationship between regional stress field, fracture orientation and depth of weathering and implications for groundwater prospecting in crystalline rocks. Hydrogeol. J. 15, 1231–1238. https://doi.org/10.1007/s10040-007-0224-7.

Pelton, W.H., Ward, S.H., Hallof, P.G., Sill, W.R., Nelson, P.H., 1978. Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency ip. GEOPHYSICS 43, 588–609. https://doi.org/10.1190/1.1440839.

Razack, M., Lasm, T., 2006. Geostatistical estimation of the transmissivity in a highly fractured metamorphic and crystalline aquifer (Man-Danane Region, Western Ivory Coast). J. Hydrol. 325, 164–178. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.014.

Razafindratsima, S., Lataste, J.-F., 2014. Estimation of the error made in Pole–Dipole Electrical Resistivity Tomography depending on the location of the remote electrode:

Modeling and field study. J. Appl. Geophys. 100, 44–57. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.10.008.

Renard, M., Lagabrielle, Y., Martin, E., Rafélis Saint Sauveur, M. de, 2018. Éléments de géologie.

Revil, A., Florsch, N., Mao, D., 2015. Induced polarization response of porous media with metallic particles - Part 1 : A theory for disseminated semiconductors. Geophysics, Vol. 80(5), p. D525-D538.

RFI, 2019. Radio France Internationale. Les catastrophes naturelles ont accentué les déplacements des populations, 10 mai 2019, [en ligne], http://www.rfi.fr/afrique/20190510-catastrophes-naturelles-deplacements-populations (consulté le 12 juin 2019).

Rhén, I., Thunehed, H., Triumf, C.-A., Follin, S., Hartley, L., Hermansson, J., Wahlgren, C.-H., 2007. Development of a hydrogeological model description of intrusive rock at different investigation scales: an example from south-eastern Sweden. Hydrogeol. J. 15, 47–69. https://doi.org/10.1007/s10040-006-0124-2.

Rubin, Y., Hubbard, S.S., 2006. Hydrogeophysics. Springer Science & Business Media.

Sander, P., 1997. Water-Well Siting in Hard-Rock Areas: Identifying Promising Targets Using a Probabilistic Approach. Hydrogeol. J. 5, 32–43. https://doi.org/10.1007/s100400050109.

Scott, J.B.T., Barker, R.D., 2003. Determining pore-throat size in Permo-Triassic sandstones from low-frequency electrical spectroscopy. Geophysical Reasearch Letters, Vol. 30(9), p. 1450.

Seaton, W.J., Burbey, T.J., 2002. Evaluation of two-dimensional resistivity methods in a fractured crystalline-rock terrane. J. Appl. Geophys. 51, 21–41.

Séguis, L., Kamagaté, B., Favreau, G., Descloitres, M., Seidel, J.L., Galle, S., Peugeot, C., Gosset, M., Le Barbé, L., Malinur, F., others, 2011. Originsof streamflow in a crystalline basement catchment in a sub-humidSudanian zone: the Donga basin (Benin, West Africa): inter-annualvariability of water budget. J Hydrol 402:1–13.

Seigel, H., 1959. Mathematical formulation and type curves for induced polarization. Geophysics, Vol. 24(3), p. 547-565.

Seigel, H., Nabighian, M., Parasnis, D., Vozoff, K., 2007. The early history of the induced polarization method. The Leading Edge, Vol. 26(3), p. 312-321.

Serna, F., Lagneau, J., Carpentier, J.-M., 2014. La diffraction des rayons X : une technique puissante pour résoudre certains problèmes industriels et technologiques. Centre de Recherches de l'Industrie Belge de la Céramique, Avenue du Gouverneur Emile Cornez, 4, 7000 MONS info@bcrc.be.

Shaw, R., 1997. Variations in sub-tropical deep weathering profiles over the Kowloon Granite, Hong Kong. J. Geol. Soc. 154, 1077–1085. https://doi.org/10.1144/gsjgs.154.6.1077.

Shevnin, V., Delgado-Rodríguez, O., Mousatov, A., Ryjov, A., 2006. Estimation of soil hydraulic conductivity on clay content, determined from resistivity data. Presented at the 19th EEGS Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems.

Simandoux, P., 1963. Mesures diélectriques en milieux poreux. Applications à la mesure des saturations en eau. Etude du comportement des massifs argileux. Rev. de l'Institut Français du Pétrole.

Slater, L., Lesmes, D., 2002. IP interpretation in environmental investigations. Geophysics, Vol. 67 (1), p. 77-88.

SONEB (Société Nationale des Eaux du Bénin), 2014. Les sources d'eau alimentant les stations de pompage et de traitement de la SONEB, 2014, [en ligne] https://www.soneb.bj/soneb15/pg-captage (consulté le 15 février 2019).

Soro, D.D., Koita, M., Biaou, C.A., Outoumbe, E., Vouillamoz, J.-M., Yacouba, H., Guerin, R., 2017. Geophysical demonstration of the absence of correlation between lineaments and hydrogeologically usefull fractures: case study of the Sanon hard rock aquifer (central northern Burkina Faso). J. Afr. Earth Sci. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.02.025.

Taylor, G., Eggleton, R.A., 2001. Regolith geology and geomorphology. J. Wiley, Chichester ; New York.

Taylor, R., Howard, K., 2000. A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: Evidence from Uganda. Hydrogeol. J. 8, 279–294. https://doi.org/10.1007/s100400000069.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., Keys, D.A., 1976. Prospection géophysique. E. R. G, Maurecourt, France.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. Applied Geophysics. Cambridge University Press.

Titov, K., Tarasov, A., Ilyin, Y., Seleznev, N., Boyd, A., 2010. Relationships between induced polarization relaxation time and hydraulic properties of sandstone. Geophysical Journal International, Vol 180(3), p. 1095-1106.

Tran, N.L., 1980. L'essai au bleu de méthylène. Un progrès dans la mesure et le contrôle de la propreté des granulats. Bull. liaison Labo. P. et Ch. - 107 - mai-juin 1980 - Réf. 2455.

Trompette, R., 1994. Geology of Western Gondwana (2000–500 Ma). Pan-African-Brasiliano Aggregation of South America and Africa. Balkema Rotterdam 350p.

Twidale, C.R., 1982. Granite landforms. Elsevier Scientific Pub. Co, Amsterdam ; New York.

Vouillamoz, J.-M., Descloitres, M., Bernard, J., Fourcassier, P., Romagny, L., 2002. Application of integrated magnetic resonance sounding and resistivity methods for borehole implementation. A case study in Cambodia. J. Appl. Geophys., Surface Nuclear Magnetic Resonance: What is Possible? 50, 67–81. https://doi.org/10.1016/S0926-9851(02)00130-1.

Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2014. The use of magnetic resonance sounding for quantifying specific yield and transmissivity in hard rock aquifers: The example of Benin. J. Appl. Geophys. 107, 16–24. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.05.012.

Vouillamoz, J.M., Tossa, A.Y.A., Chatenoux, B., Kpegli, K.A.R., 2015a. Propriétés des aquifères de socle du Bénin: analyse multi-variables et multi-échelles des paramètres

de contrôle (Properties of Benin hard rock aquifers: multivariables and multiscale analysis of controlling parameters). Aquifères Socle Point Sur Concepts Appl. Opérationnelles» Roche-Sur-Yon.

Vouillamoz, J. M., Lawson, F.M.A., Yalo, N., Descloitres, M., 2015b. Groundwater in hard rocks of Benin: Regional storage and buffer capacity in the face of change. J. Hydrol. 520, 379–386. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.024

Ward, S.H., 1990. Resistivity and induced polarisation methods. In geotechnical and environmental geophysics, vol. 1, Ward, S.H., Editor, Society of Exploration Geophysicists.

Wright, E.P., Burgess, W.G., 1992. The hydrogeology of crystalline basement aquifers in Africa. Geol. Soc. special publication, 262.

Wubda, M., Descloitres, M., Yalo, N., Ribolzi, O., Vouillamoz, J.M., Boukari, M., Hector, B., Séguis, L., 2017. Time-lapse electrical surveys to locate infiltration zones in weathered hard rock tropical areas. J. Appl. Geophys. 142, 23–37. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.01.027.

Wyns, R., Courry, J.C., Baltassat, J.M., Lebert, F., 1999. Caractérisation multi-paramètres des horizons de subsurface (0-100m) en contexte de socle altéré. 2e Colloq. GEOFCAN.

Wyns, R., Lacquement, F., Corbier, P., Vairon, J., 2002. Cartographie de la réserve en eau souterraine du massif granitique de la Roche sur Yon. Rapp. BRGM/ RP-51633 / FR BRGM Orléans 26 Pp.

Wyns, R., Guillocheau, F., Lacquement, F., 2003. Major weathering in France related to lithospheric deformation. Géol Fr 2003 79–87.

Wyns, R., Baltassat, J.-M., Lachassagne, P., Legchenko, A., Vairon, J., Mathieu, F., 2004. Application of proton magnetic resonance soundings to groundwater reserve mapping in weathered basement rocks (Brittany, France). Bull. Société Géologique Fr. 175, 21–34. https://doi.org/10.2113/175.1.21.

Wyns, R., Dewandel, B., Lachassagne, P., 2015. Origine de la fracturation des aquifères de socle : quels sont les facteurs qui contrôlent les propriétés de l'horizon fissuré ?

Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-Sur-Yon, juin 2015.

Yalo, N., Descloitres, M., Alle, C., 2013a. TDEM Study of variation of freshwater lens morphology between rainy and dry season in the coastal shallow aquifer of south Benin. International Journal of Current Reasearch Vol.5(11) pp. 3547 – 3553; ISSN 0975-833X.

Yalo, N., Descloitres, M., Vouillamoz, J.M., Alle, C., 2013b. Delimitation of the Salt Water Wedge in the Shallow Coastal Aquifer by TDEM Method at Togbin (South Benin). International Journal of Science and Advanced Technology Volume 3 N° 3.pp 21 – 29. ISSN 2221-8386.

Publications

Les résultats obtenus au cours de cette thèse ont fait l'objet, sur le plan national, sous régional et international, d'articles et de communications suivantes :

Articles

Alle, **I.C.,** Descloitres, M., Vouillamoz, J. M., Yalo, N., Lawson, F. M. A., Adihou, A. C., **2018**. Why 1D electrical resistivity techniques can result in inaccurate siting of boreholes in hard rock aquifers and why electrical resistivity tomography must be preferred: the example of Benin, West Africa, **Journal of African Earth Science**, vol. 139 p. 341 353, janv. 2018. doi.10.1016/j.jafrearsci.2017.12.00.

Legchenko, A., Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., **Alle, C.**, Descloitres, M., Boucher, M., **2015**. Interpretation of magnetic resonance measurements in the varying Earth's magnetic field. **Geophysics**, 81(4), WB23-WB31. doi. 10.1190/geo2015-0474.1.

Galle, S., Grippa, M., Peugeot C., and 87 co-authors including **Alle**. **I.C.**, **2018**. AMMA-CATCH, a critical zone observatory in West Africa monitoring a region in transition. **Vadose Zone J**. 17:180062. doi:10.2136/vzj2018.03.0062.

Legchenko, A., Texier, B., Girard, J.F., Vouillamoz, J.M., Lawson, F.M.A., Alle, I.C., Baltassat, J.M., Pierrat, G., Boucher, M., 2020. Feasibility study of a surface-borehole NMR method. Journal of Applied Geophysics, vol. 177 doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104039

Journal of African Earth Sciences 139 (2018) 341–353

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of African Earth Sciences

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jafrearsci

Why 1D electrical resistivity techniques can result in inaccurate siting of boreholes in hard rock aquifers and why electrical resistivity tomography must be preferred: the example of Benin, West Africa

Iboukoun Christian Alle [a, b, *], Marc Descloitres [c], Jean-Michel Vouillamoz [c], Nicaise Yalo [b], Fabrice Messan Amen Lawson [a, b], Akonfa Consolas Adihou [d]

[a] International Chair in Mathematical Physics and Applications (ICMPA - UNESCO CHAIR) 072 BP 50 Cotonou, Benin
[b] Laboratory of Applied Hydrology, Water National Institute, University of Abomey-Calavi, 01 BP 4521, Cotonou, Benin
[c] Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, IGE, 38000 Grenoble, France
[d] National Directorate of Water, Ministry of Water, 04 BP 1412, Cotonou, Benin

ARTICLE INFO

Article history:
Available online 28 December 2017

Keywords:
Hard rock aquifers
Borehole siting
1D electrical resistivity techniques
2D electrical resistivity tomography
Benin
West Africa

ABSTRACT

Hard rock aquifers are of particular importance for supplying people with drinking water in Africa and in the world. Although the common use of one-dimensional (1D) electrical resistivity techniques to locate drilling site, the failure rate of boreholes is usually high. For instance, about 40% of boreholes drilled in hard rock aquifers in Benin are unsuccessful. This study investigates why the current use of 1D techniques (e.g. electrical profiling and electrical sounding) can result in inaccurate siting of boreholes, and checks the interest and the limitations of the use of two-dimensional (2D) Electrical Resistivity Tomography (ERT). Geophysical numerical modeling and comprehensive 1D and 2D resistivity surveys were carried out in hard rock aquifers in Benin. The experiments carried out at 7 sites located in different hard rock groups confirmed the results of the numerical modeling: the current use of 1D techniques can frequently leads to inaccurate siting, and ERT better reveals hydrogeological targets such as thick weathered zone (e.g. stratiform fractured layer and preferential weathering associated with subvertical fractured zone). Moreover, a cost analysis demonstrates that the use of ERT can save money at the scale of a drilling programme if ERT improves the success rate by only 5% as compared to the success rate obtained with 1D techniques. Finally, this study demonstrates, using the example of Benin, that the use of electrical resistivity profiling and sounding for siting boreholes in weathered hard rocks of western Africa should be discarded and replaced by the use of ERT technique, more efficient.

© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Groundwater in hard rocks is the main water source for many human communities in Africa (Calow et al., 2010; Mukherji, 2008). Forty percent of the continent's surface area is constituted by metamorphic and plutonic hard rocks (MacDonald et al., 2012). Yields of boreholes drilled in hard rock aquifers are usually low, i.e. few hundreds to few thousands liters per hour (Gnamba et al., 2014; Louan et al., 2015; MacDonald et al., 2012; Vouillamoz et al., 2015a). Boreholes, which produce less than 700 l/h, (i.e. the minimum usually required for supplying a hand pump), are considered as negative. The resulting "failure rate" of boreholes commonly ranges in-between 10 and 50% (Wright and Burgess, 1992): in Benin and Burkina Faso for example, recent studies indicate that 30–40% of the thousands of boreholes drilled in hard rocks are negatives and then abandoned (Courtois et al., 2010; Vouillamoz et al., 2014). Such high rates of unsuccessful borehole drillings cause substantial financial losses, slowdown drilling campaigns and access to drinking water for the population.

The borehole failure in hard rock aquifers of western Africa is usually high although the boreholes siting is quite automatically systematically based on a comprehensive procedure which includes the systematic use of electrical profiling and sounding (i.e.

* Corresponding author. International Chair in Mathematical Physics and Applications (ICMPA - UNESCO CHAIR) 072 BP 50 Cotonou, Benin.
E-mail addresses: christian.alle@ird.fr (I.C. Alle), marc.descloitres@ird.fr (M. Descloitres), jean-michel.vouillamoz@ird.fr (J.-M. Vouillamoz), yalonicaise@yahoo.fr (N. Yalo), messan.lawson@ird.fr (F.M.A. Lawson), aaconsolas@gmail.fr (A.C. Adihou).

https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.12.007
1464-343X/© 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

GEOPHYSICS, VOL. 81, NO. 4 (JULY-AUGUST 2016); P. WB23–WB31, 13 FIGS.
10.1190/GEO2015-0474.1

Downloaded 07/22/16 to 132.66.231.114. Redistribution subject to SEG license or copyright; see Terms of Use at http://library.seg.org/

Interpretation of magnetic resonance measurements in the varying earth's magnetic field

Anatoly Legchenko[1], Jean-Michel Vouillamoz[1], Fabrice Messan Amene Lawson[2], Christian Alle[2], Marc Descloitres[1], and Marie Boucher[1]

ABSTRACT

At the scale of a magnetic resonance sounding (MRS) field setup, the earth's magnetic field in the subsurface may vary laterally with depth and over time. These variations can be caused by different natural factors and generally cannot be compensated for by accurate tuning of the measuring device. The varying geomagnetic field (GMF) causes nonresonance conditions of excitation that affect the amplitude and phase of the MRS signal. Usually, variations of the GMF do not exceed a few hertz and their effect on the amplitude is relatively small, permitting us to assume near-resonance conditions for inversion. However, in some cases, the results may be erroneous if a varying GMF is not taken into account. Motivated by possible improvements in MRS inversion, we have developed a procedure for measuring and interpreting MRS data that considers a varying GMF. Our results showed that it is relatively easy to take a time-varying GMF into account. As a demonstration, we have developed the inversion of MRS data measured in Benin (West Africa). A depth-varying GMF is a more complex problem, and to consider this, we have developed an algorithm of nonlinear inversion. We have tested this approach on synthetic data, which resulted in an improved inversion. Field validation of this procedure awaits the discovery of a suitable test site with known variations of the earth's magnetic field in the subsurface.

INTRODUCTION

Magnetic resonance sounding (MRS) measurements are performed in the earth's magnetic field, which acts as a static magnetic field and is usually assumed to be constant for a given area. A constant geomagnetic field (GMF) allows setting a frequency of the excitation pulse close to the resonance frequency of protons in the GMF (Larmor frequency), thus carrying out MRS measurements under near-resonance conditions. In practice, the excitation frequency may be set a few hertz off resonance for creating an off-resonance excitation. An offset of a few hertz between the excitation and the Larmor frequencies is commonly considered as being of relatively small importance, and in most cases, the frequency offset is either neglected, or a constant frequency offset is used. These assumptions may be justified for amplitude inversion, but the MRS signal phase is more sensitive to frequency offset. Thus, neglecting the off-resonance excitation is less easily justified for the inversion of complex signals that require accurate measuring and forward modeling of the MRS response (Legchenko, 2004; Walbrecker et al., 2011).

Meanwhile, it was reported that inversion of complex signals could help in the interpretation of MRS data: The inversion of complex signals for water content provides a better resolution (Weichman et al., 2002; Braun et al., 2005) and can give better results in the inversion for resistivity distribution (Braun and Yaramanci, 2008). Accurate tuning of the MRS system to the Larmor frequency is not always possible because GMF values are not always constant. Depending on the magnetic properties of surrounding rocks, the GMF may be perturbed locally at the pore-size scale (Roy et al., 2008), or it can gradually change its intensity laterally and with depth (Legchenko et al., 2010). The earth's magnetic field may also vary during measuring time (Vouillamoz et al., 2008). GMF variations modify the Larmor frequency, creating off-resonance excitation

Manuscript received by the Editor 4 September 2015; revised manuscript received 2 January 2016; published online 13 May 2016.
[1]IRD/UJF-Grenoble 1/CNRS/G-INP, LTHE UMR 5564, Grenoble, France. E-mail: Anatoli.Legtchenko@ird.fr; jean-michel.vouillamoz@ird.fr; marc.descloitres@ird.fr; Marie.Boucher@ird.fr.
[2]University of Abomey Calavi, Cotonou, Bénin. E-mail: lawson.amen@yahoo.fr; christian.alle@ird.fr.
© 2016 Society of Exploration Geophysicists. All rights reserved.

Published online August 23, 2018

Special Section: Hydrological Observatories

AMMA-CATCH, a Critical Zone Observatory in West Africa Monitoring a Region in Transition

S. Galle,* M. Grippa, C. Peugeot, I. Bouzou Moussa, B. Cappelaere, J. Demarty, E. Mougin, G. Panthou, P. Adjomayi, E.K. Agbossou, A. Ba, M. Boucher, J.-M. Cohard, M. Descloitres, L. Descroix, M. Diawara, M. Dossou, G. Favreau, F. Gangneron, M. Gosset, B. Hector, P. Hiernaux, B.-A. Issoufou, L. Kergoat, E. Lawin, T. Lebel, A. Legchenko, M. Malam Abdou, O. Malam-Issa, O. Mamadou, Y. Nazoumou, T. Pellarin, G. Quantin, B. Sambou, J. Seghieri, L. Séguis, J.-P. Vandervaere, T. Vischel, J.-M. Vouillamoz, A. Zannou, S. Afouda, A. Alhassane, M. Arjounin, H. Barral, R. Biron, F. Cazenave, V. Chaffard, J.-P. Chazarin, H. Guyard, A. Koné, I. Mainassara, A. Mamane, M. Oi, T. Ouani, N. Soumaguel, M. Wubda, E.E. Ago, I.C. Alle, A. Allies, F. Arpin-Pont, B. Awessou, C. Cassé, G. Charvet, C. Dardel, A. Depeyre, F.B. Diallo, T. Do, C. Fatras, F. Frappart, L. Gal, T. Gascon, F. Gibon, I. Guiro, A. Ingatan, J. Kempf, D.O.V. Kotchoni, F.M.A. Lawson, C. Leauthaud, S. Louvet, E. Mason, C.C. Nguyen, B. Perrimond, C. Pierre, A. Richard, E. Robert, C. Román-Cascón, C. Velluet, and C. Wilcox

S. Galle, G. Panthou, M. Boucher, J.-M. Cohard, M. Descloitres, G. Favreau, B. Hector, T. Lebel, A. Legchenko, T. Pellarin, G. Quantin, J.-P. Vandervaere, T. Vischel, J.-M. Vouillamoz, S. Afouda, A. Alhassane, M. Arjounin, R. Biron, F. Cazenave, V. Chaffard, H. Guyard, A. Koné, T. Ouani, M. Wubda, I.C. Alle, A. Depeyre, T. Do, T. Gascon, F. Gibon, A. Ingatan, J. Kempf, D.O.V. Kotchoni, F.M.A. Lawson, S. Louvet, E. Mason, B. Perrimond, A. Richard, C. Román-Cascón, and C. Wilcox, Univ. Grenoble Alpes, CNRS, IRD, Grenoble INP, UMR IGE, Grenoble, France; M. Grippa, E. Mougin, F. Gangneron, M. Gosset, P. Hiernaux, L. Kergoat, C. Cassé, C. Dardel, C. Fatras, F. Frappart, L. Gal, C.C. Nguyen, C. Pierre, and E. Robert, Géosciences Environnement Toulouse (GET), CNRS, IRD, UPS, Toulouse, France; C. Peugeot, B. Cappelaere, J. Demarty, G. Favreau, J. Seghieri, L. Séguis, H. Barral, J.-P. Chazarin, I. Mainassara, M. Oi, A. Allies, F. Arpin-Pont, B. Awessou, G. Charvet, C. Leauthaud, and C. Velluet, Hydrosciences Montpellier (HSM), IRD, CNRS, Univ. Montpellier, Montpellier, France ; I. Bouzou Moussa, and Y. Nazoumou, Univ. Abdou Moumouni (UAM), Niamey, Niger; P. Adjomayi, M. Dossou, and A. Zannou, Direction Générale de l'Eau (DG-Eau), Cotonou, Bénin; E.K. Agbossou, E. Lawin, O. Mamadou, E.E. Ago, I.C. Alle, B. Awessou, D.O.V. Kotchoni, and F.M.A. Lawson, Univ. of Abomey-Calavi, Cotonou, Benin; A. Ba and M. Diawara, Univ. des Sciences des Techniques et des Technologies de Bamako (USTTB), Mali; M. Malam Abdou, Univ. Zinder (UZ), Zinder, Niger; B.-A. Issoufou, Univ. Maradi (UM), Maradi, Niger; S. Afouda, M. Arjounin, T. Ouani, and M. Wubda, IRD Representation, Cotonou, Bénin; O. Malam-Issa, A. Alhassane, A. Koné, I. Mainassara, and A. Mamane, IRD Representation, Niamey, Niger; N. Soumaguel, IRD Representation, Bamako, Mali; L. Descroix, UMR PALOC, IRD, MNHN, Dakar, Sénégal; B. Sambou and I. Guiro, Univ. Cheikh Anta Diop (UCAD), Dakar, Sénégal; C. Pierre, UMR iEES-Paris, Sorbonne Univ., UPMC Univ. Paris 06, CNRS, IRD, INRA, Paris, France; F.B. Diallo, UMR Lab. de Météorologie Dynamique (LMD), IPSL, UPMC Univ. Paris 06, Sorbonne Univ., CNRS, Paris, France; I.C. Alle, D.O.V. Kotchoni, and F.M.A. Lawson, International Chair in Mathematical Physics and Applications (ICMPA), UNESCO Chair, Cotonou, Benin; C. Leauthaud, UMR G-EAU, AgroParisTech, Cirad, IRD, IRSTEA, MontpellierSupAgro, Univ. Montpellier, Montpellier, France. *Corresponding author (sylvie.galle@ird.fr).

Received 31 Mar. 2018.
Accepted 5 June 2018.

Citation: Galle, S., M. Grippa, C. Peugeot, I. Bouzou Moussa, B. Cappelaere, J. Demarty, E. Mougin, G. Panthou, P. Adjomayi, E.K. Agbossou, A. Ba, M. Boucher, J.-M. Cohard, M. Descloitres, L. Descroix, M. Diawara, M. Dossou, G. Favreau, F. Gangneron, M. Gosset, B. Hector, P. Hiernaux, B.-A. Issoufou, L. Kergoat, E. Lawin, T. Lebel, A. Legchenko, M. Malam Abdou, O. Malam-Issa, O. Mamadou, Y. Nazoumou, T. Pellarin, G. Quantin, B. Sambou, J. Seghieri, L. Séguis, J.-P. Vandervaere, T. Vischel, J.-M. Vouillamoz, A. Zannou, S. Afouda, A. Alhassane, M. Arjounin, H. Barral, R. Biron, F. Cazenave, V. Chaffard, J.-P. Chazarin, H. Guyard, A. Koné, I. Mainassara, A. Mamane, M. Oi, T. Ouani, N. Soumaguel, M. Wubda, E.E. Ago, I.C. Alle, A. Allies, F. Arpin-Pont, B. Awessou, C. Cassé, G. Charvet, C. Dardel, A. Depeyre, F.B. Diallo, T. Do, C. Fatras, F. Frappart, L. Gal, T. Gascon, F. Gibon, I. Guiro, A. Ingatan, J. Kempf, D.O.V. Kotchoni, F.M.A. Lawson, C. Leauthaud, S. Louvet, E. Mason, C.C. Nguyen, B. Perrimond, C. Pierre, A. Richard, E. Robert, C. Román-Cascón, C. Velluet, and C. Wilcox. 2018. AMMA-CATCH, a critical zone observatory in West Africa monitoring a region in transition. Vadose Zone J. 17:180062. doi:10.2136/vzj2018.03.0062

© Soil Science Society of America.
This is an open access article distributed under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

West Africa is a region in fast transition from climate, demography, and land use perspectives. In this context, the African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA)–Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle eco-Hydrologique (CATCH) long-term regional observatory was developed to monitor the impacts of global change on the critical zone of West Africa and to better understand its current and future dynamics. The observatory is organized into three thematic axes, which drive the observation and instrumentation strategy: (i) analyze the long-term evolution of eco-hydrosystems from a regional perspective; (ii) better understand critical zone processes and their variability; and (iii) meet socioeconomic and development needs. To achieve these goals, the observatory has gathered data since 1990 from four densely instrumented mesoscale sites ($\sim 10^4$ km^2 each), located at different latitudes (Benin, Niger, Mali, and Senegal) so as to sample the sharp eco-climatic gradient that is characteristic of the region. Simultaneous monitoring of the vegetation cover and of various components of the water balance at these four sites has provided new insights into the seemingly paradoxical eco-hydrological changes observed in the Sahel during the last decades: groundwater recharge and/or runoff intensification despite rainfall deficit and subsequent re-greening with still increasing runoff. Hydrological processes and the role of certain key landscape features are highlighted, as well as the importance of an appropriate description of soil and subsoil characteristics. Applications of these scientific results for sustainable development issues are proposed. Finally, detecting and attributing eco-hydrological changes and identifying possible regime shifts in the hydrologic cycle are the next challenges that need to be faced.

Abbreviations: ALMIP, AMMA Land Surface Model Intercomparison Project; AMMA, African Monsoon Multidisciplinary Analysis; AMMA-CATCH, AMMA-Couplage de l'Atmosphère Tropicale et du Cycle eco-Hydrologique (Coupling the Tropical Atmosphere and the Eco-Hydrological Cycle); Cal/Val, calibration/validation; ERT, electrical resistivity tomography; HAPEX-Sahel, Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel; IDF, intensity–duration–frequency; MRS, magnetic resonance sounding.

Core Ideas

- AMMA-CATCH is a long-term critical zone observatory in West Africa.
- Four sites sample the sharp ecoclimatic gradient characteristic of this region.
- Combined measurements of meteorology, water, and vegetation dynamics began in 1990.
- Intensification of rainfall and hydrological cycles is observed.
- The strong overall re-greening may hide contrasted changes.

Journal of Applied Geophysics 177 (2020) 104039

Contents lists available at ScienceDirect

Journal of Applied Geophysics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/jappgeo

Feasibility study of a surface-borehole NMR method

Anatoly Legchenko [a,*], Benoît Texier [b], Jean-François Girard [c], Jean-Michel Vouillamoz [a], Fabrice Messan Amene Lawson [d], Iboukoun Christian Alle [d], Jean-Michel Baltassat [e], Ghislain Pierrat [b], Marie Boucher [a]

[a] Univ. Grenoble Alps, Institute of Research for Development, IGE, France
[b] IRIS Instruments, Orléans, France
[c] IPGS/EOST, Strasbourg University, France
[d] University of Abomey-Calavi, Bénin
[e] BRGM, Orléans, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 9 July 2019
Received in revised form 26 March 2020
Accepted 22 April 2020
Available online 24 April 2020

Keywords:
MRS
SNMR
Surface-borehole
Water content
SBNMR

ABSTRACT

We present results of a feasibility study of a borehole induction-coil sensor for surface-borehole NMR (SBNMR) investigations. This sensor of 7 cm diameter and 180 cm length is connected to a standard MRS (Magnetic Resonance Sounding) instrument. Thus, SBNMR is a cost-effective extension of the MRS method. Using a downhole sensor increases the depth of investigation and the resolution of MRS. In the near-horizontal Earth's magnetic field, the sensitive area of the sensor is represented by a cylinder of a few meters in diameter. A blind zone of 0.5 to 1 m around the borehole is due to the disturbance of the Earth's magnetic field by the magnetic core of the sensor. The relatively large volume investigated with SBNMR and the blind zone around borehole may represent an advantage of SBNMR over the NMR (nuclear magnetic resonance) borehole tool investigating a narrow zone around the borehole. However, using the Earth's magnetic field renders the SBNMR performance site dependent with an inherently low signal-to-noise ratio. Our first results show a good correspondence between SBNMR, MRS and borehole data.

© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Selective sensitivity to groundwater is a major advantage of geophysical methods based on the phenomenon of nuclear magnetic resonance (NMR) compared to other geophysical techniques. NMR-based methods can be applied in a borehole or from surface. Downhole, NMR is mainly used in petroleum exploration and production (Dunn et al., 2002); as these tools were initially developed for deep large-diameter boreholes, they are rarely applied to groundwater investigations. However, recent advances in NMR have allowed developing NMR tools adapted to the small-diameter boreholes typical of hydrogeology (Walsh et al., 2013).

Surface NMR (SNMR), also known as Magnetic Resonance Sounding (MRS), is a non-invasive geophysical method (Legchenko and Valla, 2002; Hertrich, 2008; Legchenko, 2013; Behroozmand et al., 2015). MRS and borehole NMR are based on the same physical phenomenon and have many common features, but these methods are not interchangeable (e.g. Müller-Petke et al., 2011). The maximum depth of investigation with MRS is site dependent and rarely exceeds 100 m (Legchenko et al., 1997). The resolution is also variable and progressively decreases with increasing depth (e.g. Girard et al., 2007; Müller-Petke and Yaramanci, 2008; Hertrich et al., 2009; Chevalier et al., 2014; Parsekian and Grombacher, 2015). A limited investigation depth and relatively poor resolution are the properties of MRS (Legchenko and Pierrat, 2014).

Stoeffl (2001) proposed to improve MRS by combining surface and borehole NMR methods. Using a transmitting loop on the surface and a magnetic-field sensor downhole, we obtain surface-borehole NMR (SBNMR). The possibility of using with MRS a small magnetic-field sensor instead of a large loop was demonstrated by Davis et al. (2014) using a SQUID sensor. However, the use of a SQUID sensor for SBNMR is not absolutely necessary and we developed a more traditional induction-coil sensor. Hereafter, we report the first experimental results.

2. Surface-borehole NMR

Practical implementation of the SBNMR method can be done with a standard MRS instrument equipped with an additional induction-coil sensor in the borehole. Fig. 1 shows the measuring setup consisting of a transmitting loop (Tx) on the surface and a sensor in the borehole (Rx).

For measuring, a pulse of alternative current oscillating with the Larmor frequency is generated in the transmitting loop, producing the excitation magnetic field H_{Tx}. The pulse is characterized by a pulse

* Corresponding author.
E-mail address: anatoli.legtchenko@ird.fr (A. Legchenko).

https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104039
0926-9851/© 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

Communications orales et posters

Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, JM., Yalo N., Lawson, F., Adihou, C., **2016**. Borehole siting in deeply weathered hard rock aquifers using electrical resistivity: the example of Benin. **43rd IAH congress, Montpellier.**

Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, J.M., Yalo, N., Lawson, F.M.A., Legchenko, A., **2016**. Specific yield estimation using resistivity and chargeability in deeply weathered hard rock aquifers: experimental relationship in Benin, West Africa. **43rd IAH congress, Montpellier.**

Alle, C., Descloitres, M., Campoy, A., Yalo, N., Vouillamoz, J.M., Lawson, M., Adihou, C., **2016**. Un lien entre résistivité, chargeabilité et porosité de drainage dans les aquifères de socle tropicaux ? **Réunion CRITEX, Rennes**, 21 et 22 janvier 2016.

Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, JM., Yalo, N., Lawson, F., Adihou, C., **2015**. Pratique de l'implantation des forages en zone de socle par la résistivité électrique : perspective d'une amélioration au Bénin. **4ème Journée Scientifique Ressources en eau au Bénin**. Résultats des projets GRIBA, JEAI et associés, août 2015, **Cotonou.**

Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, JM., Yalo, N., Campoy, A., Lawson, F., Adihou, C., Azonwadé, F., **2015**. Propriétés de polarisation électrique des altérites de socle : un complément à la résistivité ? **4ème Journée Scientifique Ressources en eau au Bénin**. Résultats des projets GRIBA, JEAI et associés, août 2015, **Cotonou.**

Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, J.M., Yalo, N., Lawson, M., Adihou, C., **2015**. Caractérisation des aquifères de socle par la résistivité électrique : vers une amélioration de l'implantation des forages au Bénin. **Vingtièmes journées techniques du Comité Français d'Hydrogéologie de l'Association Internationale des Hydrogéologues.** « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » **La Roche-sur-Yon**, juin 2015.

Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, JM., Yalo, N., Campoy, A., Lawson, F., Adihou, C., **2014**. Résistivité et polarisation électrique des aquifères de socle au Bénin. **9ème colloque Geofcan** -13/14 Novembre 2014 – **Orsay.**

Alle, C., Descloitres, M., Vouillamoz, JM., Yalo, N., Campoy, A., Lawson, F., Adihou, C., **2014**. Contribution de la polarisation provoquée a la caractérisation des aquifères de socle au Bénin (Premiers résultats). **3ème Journée scientifique Ressources en eau souterraine** Résultats des projets GRIBA, JEAI, juin 2014, **Cotonou.**

Alle, C., Yalo, N.; Vouillamoz, J-M., Descloitres, M., Lawson, M., Kpégli, R., Adihou, C., **2013**. Projet GRIBA : Premiers résultats au Bénin. **7ème édition des journées scientifiques de 2iE**, **Ouagadougou** du 1er au 05 avril 2013.

Table des matières

Sommaire viii
Liste des figures x
Liste des tableaux xiii
Introduction générale 1
Chapitre 1 : Aquifères de socle et définition de la cible hydrogéologique à privilégier pour un forage productif 10
Introduction 10
1.1. Zone de socle du Bénin 10
1.1.1. Cadre géographique 10
1.1.2. Origine et géologie 12
1.1.3. Formations géologiques 13
1.2. Aquifères de socle du Bénin 15
1.2.1. Définitions 15
1.2.2. Mise en place des aquifères de socle : le processus d'altération 19
1.3. Modèle conceptuel hydrogéologique des roches de socle 23
1.3.1. Profil d'altération des roches de socle dans le monde 23
1.3.2. Modèle conceptuel hydrogéologique des roches de socle en milieu tropical : exemple du Bénin 24
1.4. Cible hydrogéologique pour un forage productif 25
1.4.1. Méthodologie mise en œuvre pour la définition de la cible 26
1.4.2. Résultats conduisant à la définition de la cible 28
1.4.3. Cible hydrogéologique 35
1.5. Quelques questions posées en général au géophysicien par l'hydrogéologue pour l'implantation d'un forage 36
Conclusion partielle 37
Chapitre 2 : Résistivité et chargeabilité électrique : Définitions et mesures par la méthode électrique 38
Introduction 38
2.1. Résistivité électrique 38
2.1.1. Définition et intérêt pour l'hydrogéologie 38
2.1.2. Facteurs influant sur la valeur de la résistivité électrique 39
2.1.3. Relations avec la porosité : loi d'Archie modifiée dite « de saturation » 41
2.1.4. Exemple de valeur de résistivité 43
2.2. Mesure de la résistivité avec la méthode électrique à courant continu 44
2.2.1. Bref historique de la méthode électrique 44
2.2.2. Principe de la méthode électrique à courant continu 45

2.2.3. Techniques traditionnelles 1D de mesure depuis la surface : profil et sondage 49
2.2.4. Technique plus élaborée 2D de mesure depuis la surface : tomographie de résistivité électrique 54
2.2.5. Technique de mesure en forage : diagraphie de résistivité électrique 57
2.3. Chargeabilité électrique 59
2.3.1. Polarisation Provoquée (PP) 59
2.3.2. Définition de la chargeabilité 62
2.4. Mesure de la chargeabilité totale et des paramètres Cole-Cole dérivés de la courbe de décharge 63
2.4.1. Chargeabilité totale 63
2.4.2. Paramètres Cole-Cole 65
Conclusion partielle 66
Chapitre 3 : Evaluation de la sensibilité de la résistivité et de la chargeabilité à la cible hydrogéologique 68
Introduction 68
3.1. Méthodologie mise en œuvre 69
3.2. Sites d'étude sélectionnés 69
3.2.1. Choix et présentation des sites 69
3.2.2. Equipement des sites 71
3.3. Acquisition et traitement des données de diagraphie 72
3.3.1. Protocole commun à l'acquisition des données des deux paramètres 72
3.3.2. Précautions pour l'acquisition des données de chargeabilité 75
3.3.3. Traitement des données de résistivité 76
3.3.4. Traitement des données de chargeabilité 78
3.4. Lithologie des forages et les informations du foreur 81
3.4.1. Lithologie des forages 81
3.4.2. Informations du foreur 83
3.5. Evaluation de la sensibilité des paramètres électriques 83
3.5.1. Logs des paramètres électriques Vs lithologie et informations du foreur 83
3.5.2. Gammes des paramètres électriques par compartiment et par site 86
3.6. Relation entre la résistivité et la chargeabilité de la ZA 88
Conclusion partielle 90
Chapitre 4 : Relations entre paramètres géophysiques électriques, paramètres hydrodynamiques et les argiles 91
Introduction 91
4.1. Méthodologie mise en œuvre 92
4.2. Diffractométrie de rayons X 92
4.2.1. Analyse au diffractomètre à rayons X 93

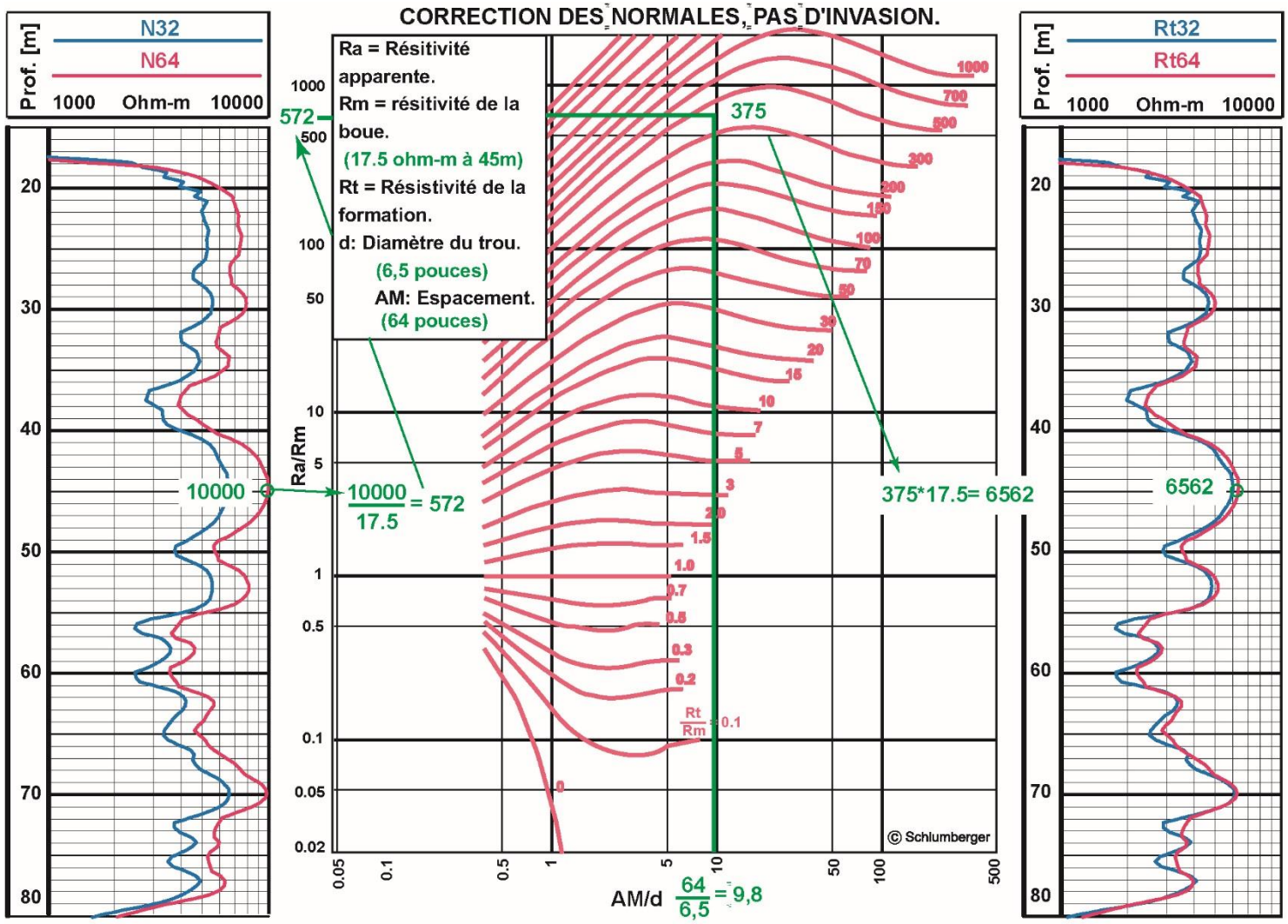
4.2.2. Détermination du type d'argile en présence et sa proportion dans l'échantillon ... 95
4.2.3. Echantillonnage et résultats des analyses au diffractomètre à rayons X ... 97
4.3. Test de bleu de méthylène ... 101
4.3.1. Définition du test de bleu de méthylène ... 101
4.3.2. Détermination de la teneur en argile et la limite du test de bleu ... 102
4.3.3. Échantillonnage et résultats des tests de bleu de méthylène ... 102
4.4. Autres paramètres utilisés : porosité de drainage et conductivité hydraulique ... 104
4.5. Présentation des relations obtenues ... 105
4.5.1. Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et, d'une part la porosité de drainage, d'autre part la conductivité hydraulique ... 105
4.5.2. Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et la présence d'argile partant des résultats de diffractométrie de rayons X ... 108
4.5.3. Relations obtenues entre les paramètres géophysiques et les valeurs de bleu sols (V_{BS}) ... 111
Conclusion partielle ... 113
Chapitre 5 : Comparaison des techniques de prospection électrique par modélisation numérique ... 114
Introduction ... 114
5.1. Méthodologie mise en œuvre ... 115
5.2. Construction des modèles numériques 2D ... 116
5.2.1. Modèles de base : Géométries 1D ... 116
5.2.2. Modèles complexes représentant les structures du sous-sol en zone de socle en milieu tropical : géométries 2D ... 117
5.3. Génération et traitement des données ... 119
5.3.1. Génération des données ... 119
5.3.2. Analyse et traitement des données ... 120
5.4. Résultats et inter-comparaisons ... 122
5.4.1. Profils électriques (PE) ... 122
6.4.2. Sondages électriques (SE) ... 125
6.4.3. Tomographie de Résistivité Electrique (ERT) ... 127
Conclusion partielle ... 129
Chapitre 6 : Validation in-situ de la technique ERT pour l'implantation géophysique des forages ... 131
Introduction ... 131
6.1. Méthodologie mise en œuvre ... 131
6.2. Mise en œuvre de l'ERT et des autres techniques in situ ... 132
6.2.1. Études préalables ... 132
6.2.2. Matériel d'acquisition ... 134
6.2.3. Acquisition des données ... 134

6.3. Traitement des données 136
6.3.1. Analyse de la qualité des données 136
6.3.2. Inversion des données 136
6.4. Résultats 138
6.4.1. Sites expérimentaux : FD19, FD30 et F68 139
6.4.2. Site test démonstrateur : SARE 143
6.5. Discussions : doit-on faire évoluer nos pratiques de la méthode électrique pour l'implantation ? 146
6.5.1. Pratique du PE et du SE 146
6.5.2. Pratique de l'ERT 147
6.5.3. Utilisation de l'ERT et de la RMP pour enrichir la corrélation entre résistivité ZA et porosité de drainage 148
6.5.4. Estimation du coût de l'ERT et son impact 152
Conclusion partielle 154
Conclusion générale 156
Références 162
Publications 179
Table des matières 186
Annexes I

Annexes

Annexe 1 – Abaque Schlumberger de correction de l'effet du trou, dispositif pôle-pôle (Beck *and* Girardet, 2002). II
Annexe 2 – Script Cole-Cole pour le calcul de *c*, *m* et τ dans R. III
Annexe 3 – Positionnements des forages et des lignes d'acquisition ERT sur les cartes de résistivité EM34 (20 m d'espacement entre les bobines verticales EM34). V
Annexe 4 – Synthèses des mesures en forage : Diagraphies de résistivités et de chargeabilités totales face aux lithologies. VIII
Annexe 5 – Synthèses des mesures en surface : ERTs, profils et sondages sur les sites expérimentaux et le site test. XI
Annexe 6 – Diagrammes issus des analyses au diffractomètre à rayons X. XVIII
Annexe 7 – Lithologies et caractéristiques des forages LETS (Ouest => Est)..... XXIII

Annexe 1 – Abaque Schlumberger de correction de l'effet du trou, dispositif pôle-pôle (Beck *and* Girardet, 2002).



Annexe 2 – Script Cole-Cole pour le calcul de *c*, *m* et τ dans R.

Lecture des données

execut.R* | lecture.R* | smp2.csv* | execut.R* | execut.R

Source on Save | Run | Source

```r
#Lecture des donnees brutes
#donnee=read.table(file="exemple_modifie_2.txt",header=TRUE)
donnee=t(matrix(scan(file="exemple_modifie.txt",skip=1),nrow=59))
entete=scan(file="exemple_modifie.txt",nlines=1,what="character")
coldeb=c(1:length(entete))[entete=="M1"]
colfin=c(1:length(entete))[entete=="M20"]
#récupération des valeures
donneeM=donnee[,coldeb:colfin]
#Definition des fenetres pour Time=1000ms
fM=c(20,10,20,20,20,20,20,30,30,30,40,40,40,50,50,50,60,60,70,80,90)
#calcule des temps correspondants (ms)
tM=fM[1:(length(fM)-1)]
tM[1]=fM[1]+fM[2]/2
for (i in 2:length(tM)) tM[i]=tM[i-1]+(fM[i]+fM[i+1])/2

#On efface ce qui est inutile pour la suite
suppressWarnings(rm(donnee,coldeb,colfin,entete,i))
```

Exécution du code

execut.R* | lecture.R* | smp2.csv* | execut.R* | execut.R

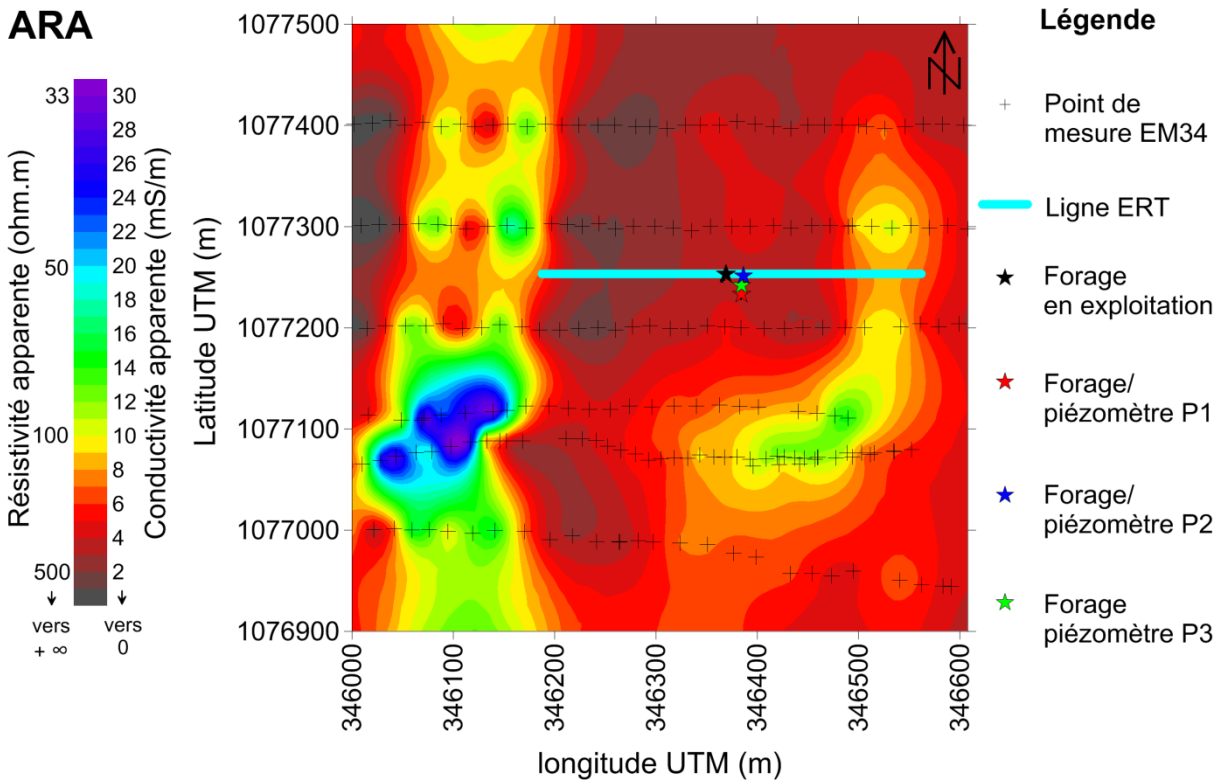
Source on Save | Run | Source

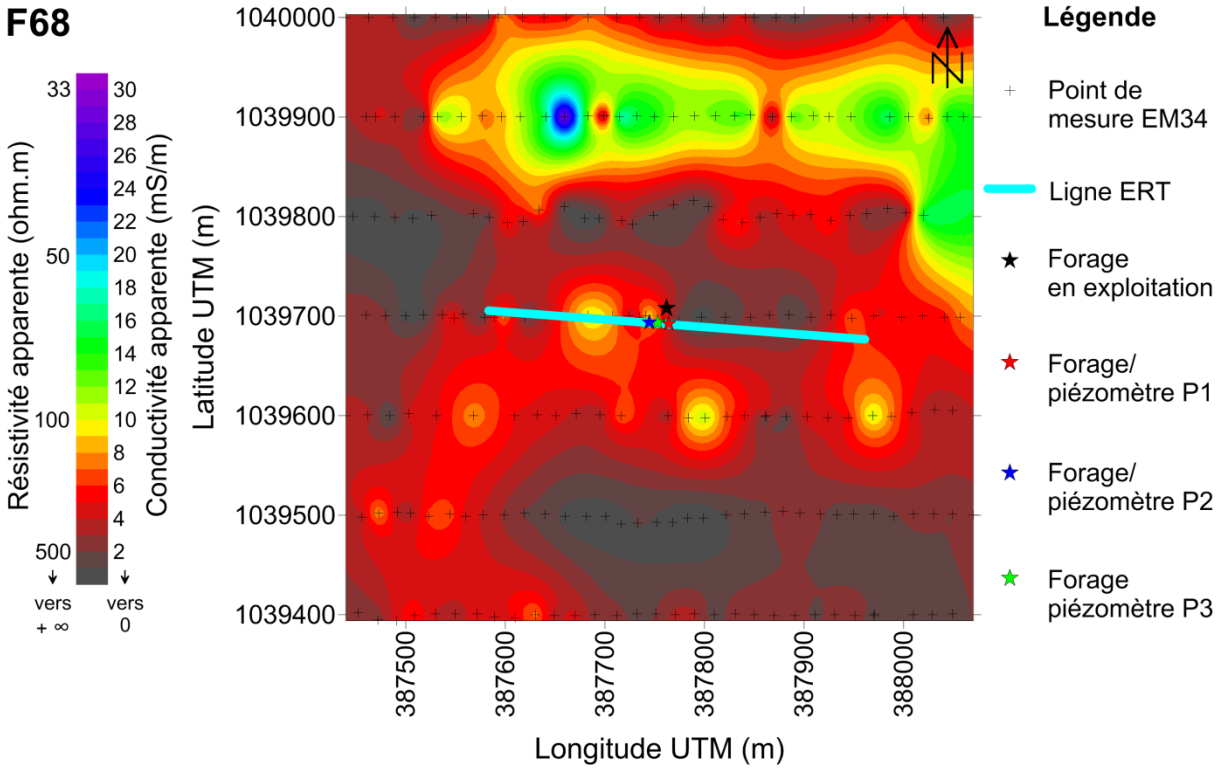
```r
#Efface toute les données stockées dans la mémoire vive
rm(list=ls())

#1###################
#DONNEES

#Lecture des donnees
source("lecture.R")

#Choix de la mesure a caler (numero de ligne dans le fichier de mesure)
#   interactif sur la mesure si mesure=0
#   interactif sur la periode à caler si deb=0
#mesure=46;deb=3;fin=17
mesure=0;deb=3;fin=20
source("choixMesure.R")


#2###################
#MODELE
#Fonction d'integration du model Cole-Cole sur les fenetres de mesures
source("colecoleFenetre.R")
#  Precision du calcul des termes (valeur min => STOP)
epsilon=10**-6
#  Validite du calcul des termes (valeur max => WARNING)
validite=10**6

#3###################
#ETAT INITIAL

#Choix des parametres initiaux du modèle Cole-Cole
#   interactif si m=0
#c=0;m=0.05;tau=0.1
#c=0.8;m=0.05;tau=0.1
c=0;m=0;tau=0.05
```

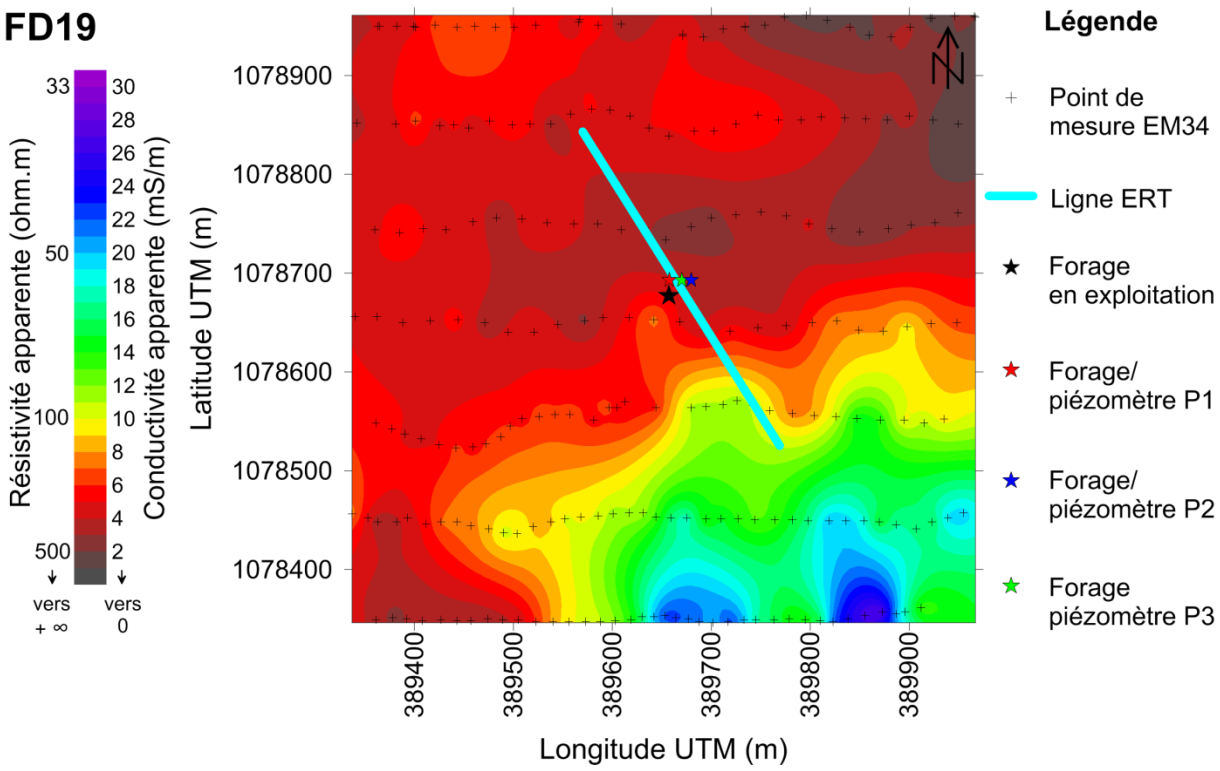
```
source("choixParamColecole.R")

#4###################
#CALAGE
#On attend l'utilisateur
cat("Appuyez sur entrer pour lancer le calage.\n");tmp=scan(quiet=TRUE)

#Les parametres initiaux du calage
Deltat_c=0.01;Deltat_m=0.01;Deltat_tau=0.01
#Degres de precision du calage et ordre de grandeur
precis=5;ordre=2

#Iteractions de calage
for (p in 1:precis) source("calage.R")
```

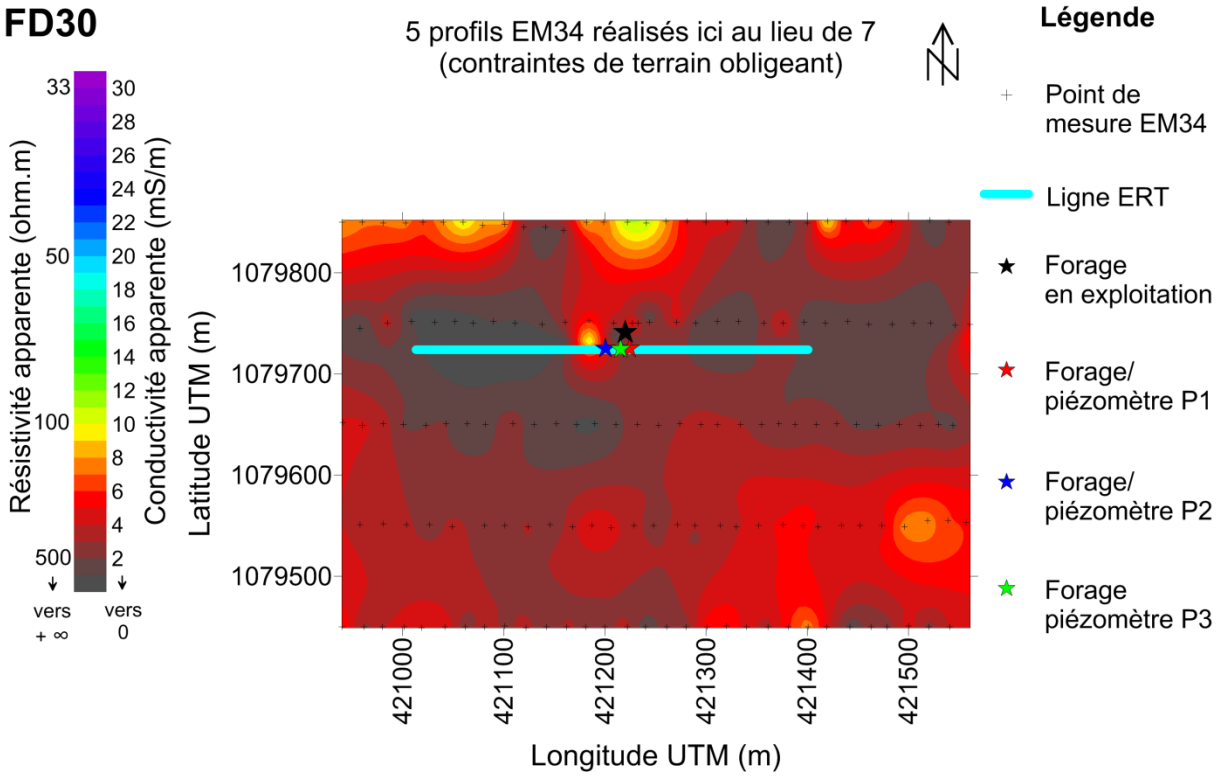
51:1 4 R Script

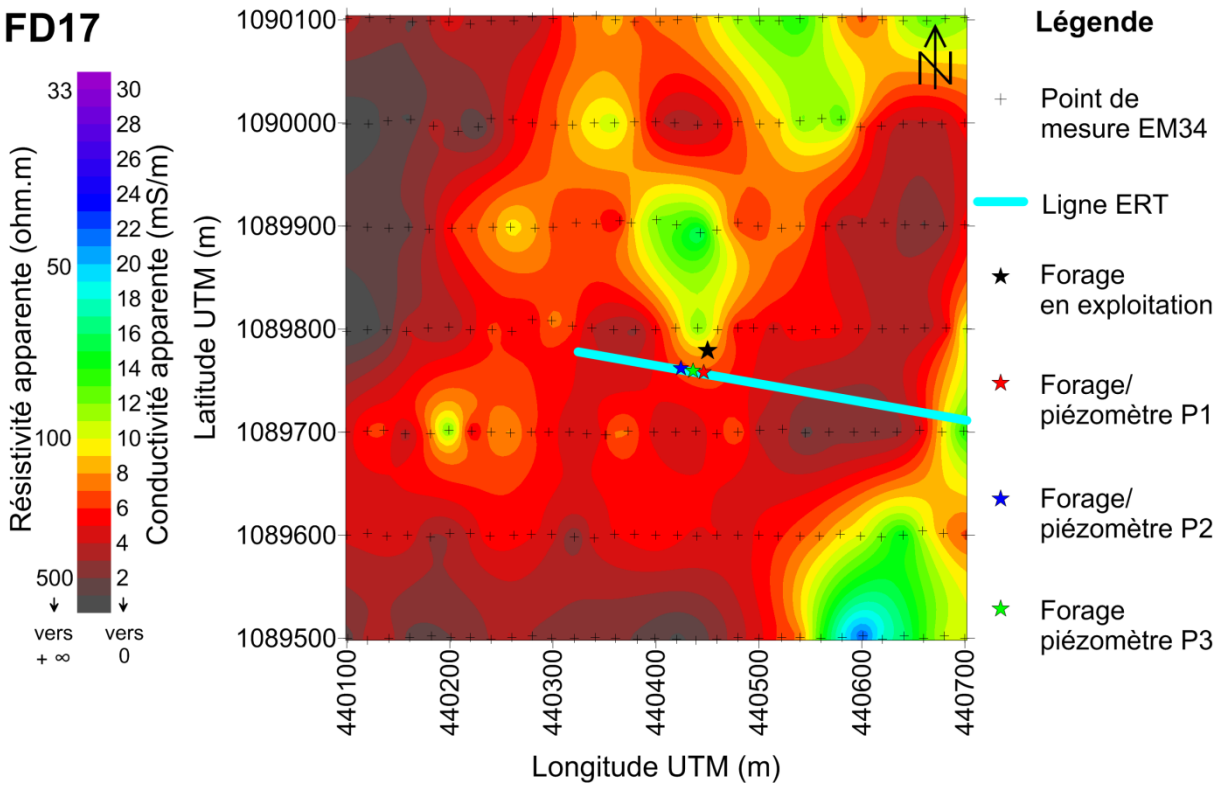
Annexe 3 – Positionnements des forages et des lignes d'acquisition ERT sur les cartes de résistivité EM34 (20 m d'espacement entre les bobines verticales EM34).

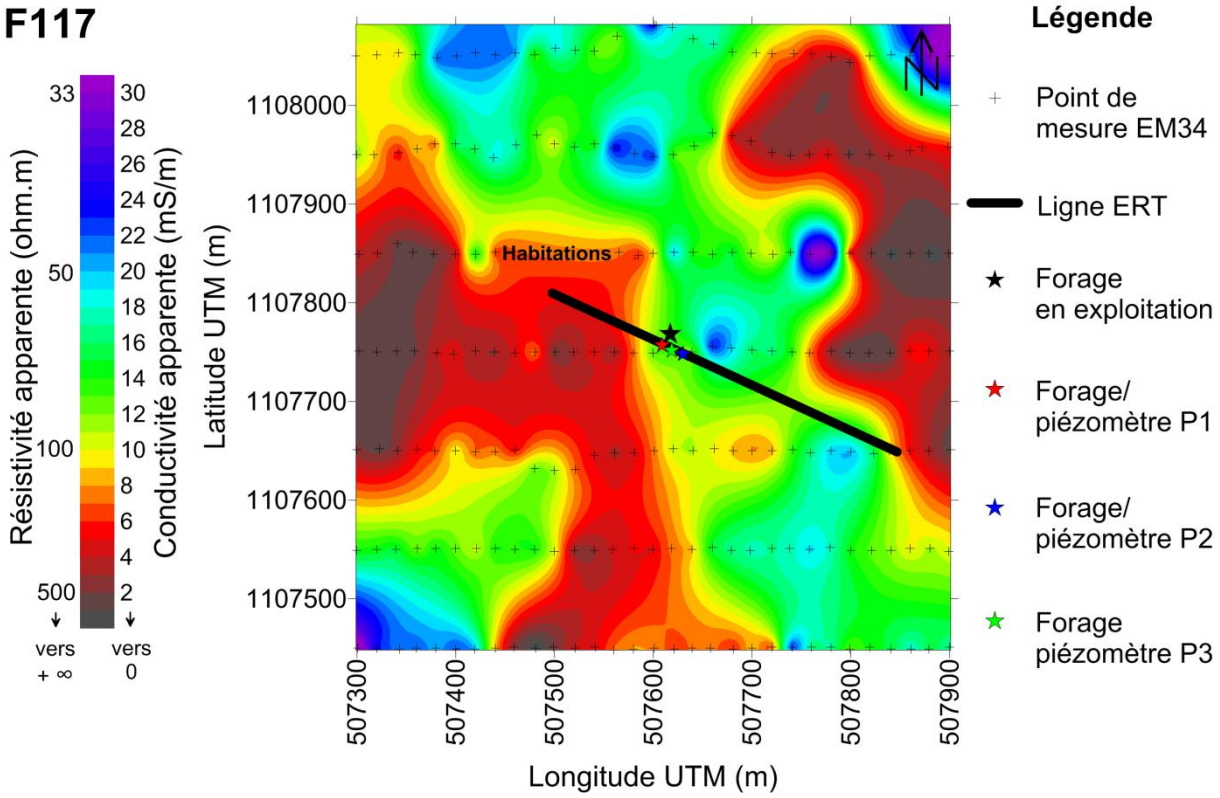




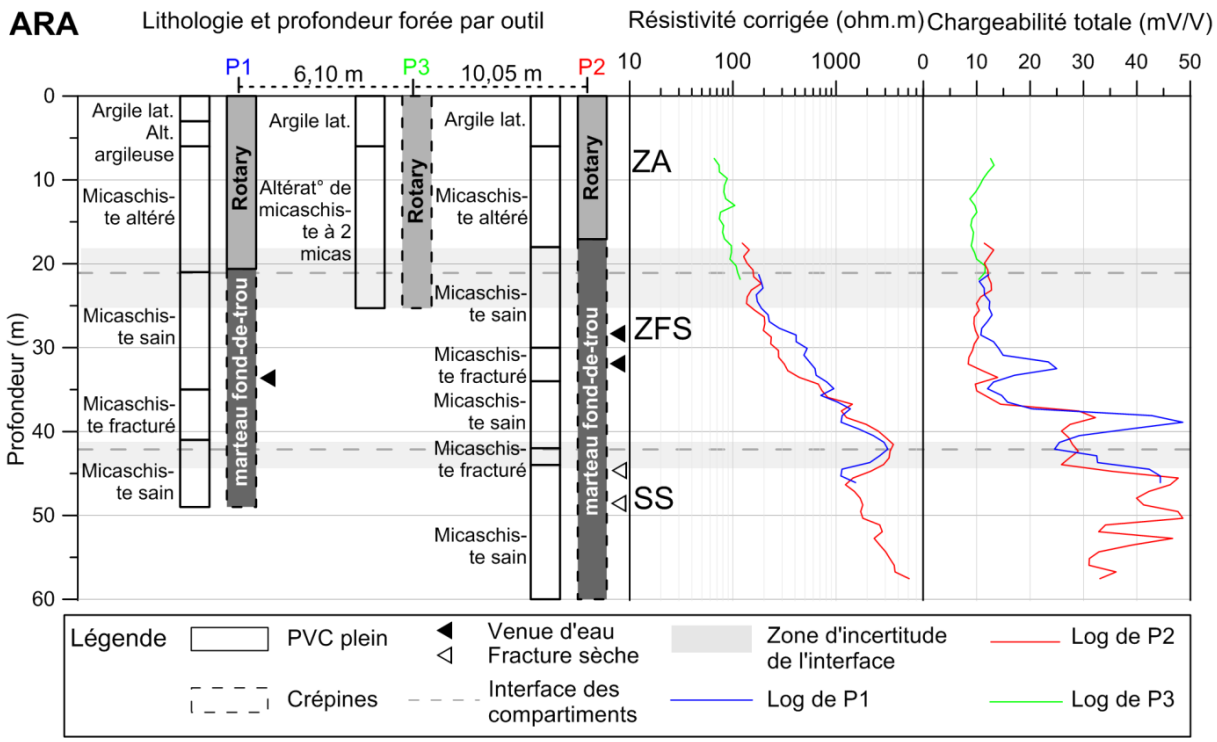

FD19
Résistivité apparente (ohm.m)
Conductivité apparente (mS/m)
33
50
100
500
vers + ∞
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
vers 0
Latitude UTM (m)
1078900
1078800
1078700
1078600
1078500
1078400
389400
389500
389600
389700
389800
389900
Longitude UTM (m)
Légende
Point de mesure EM34
Ligne ERT
Forage en exploitation
Forage/ piézomètre P1
Forage/ piézomètre P2
Forage piézomètre P3

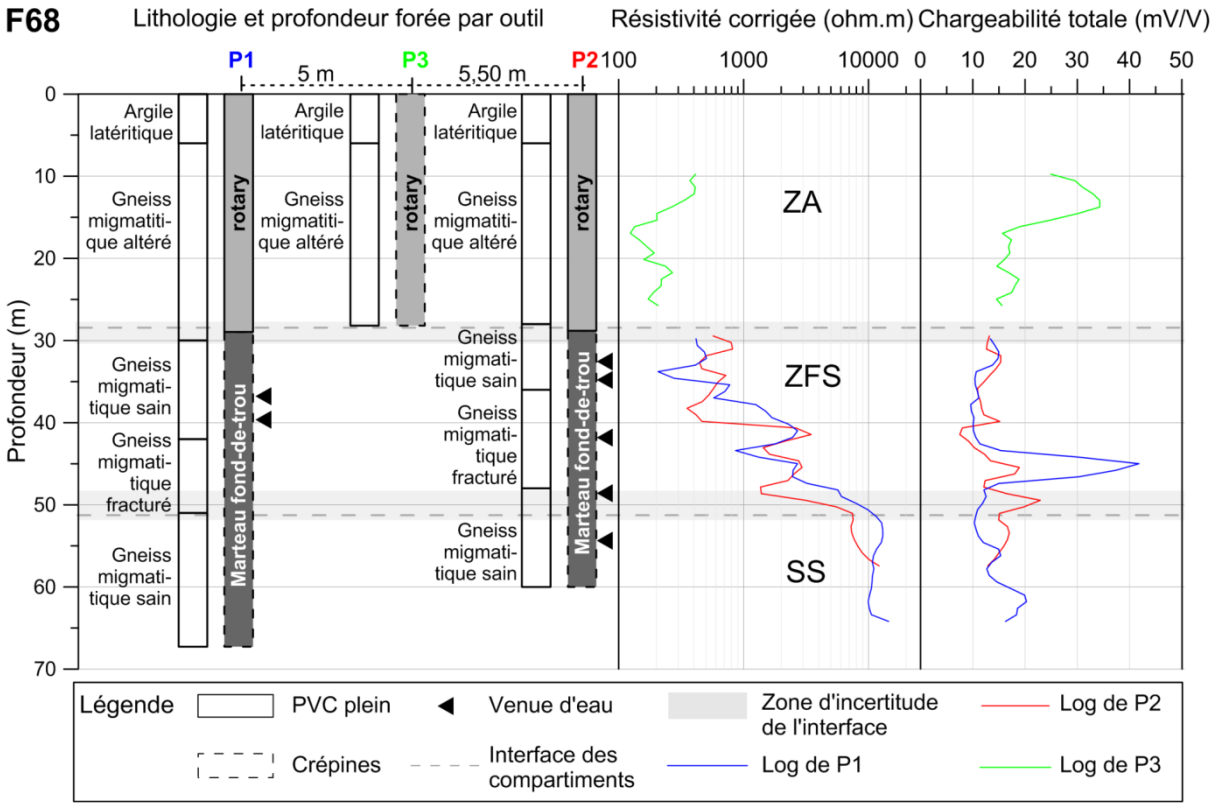

FD30
5 profils EM34 réalisés ici au lieu de 7
(contraintes de terrain obligeant)
Résistivité apparente (ohm.m)
Conductivité apparente (mS/m)
33
50
100
500
vers + ∞
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
vers 0
Latitude UTM (m)
1079800
1079700
1079600
1079500
421000
421100
421200
421300
421400
421500
Longitude UTM (m)
Légende
Point de mesure EM34
Ligne ERT
Forage en exploitation
Forage/ piézomètre P1
Forage/ piézomètre P2
Forage piézomètre P3

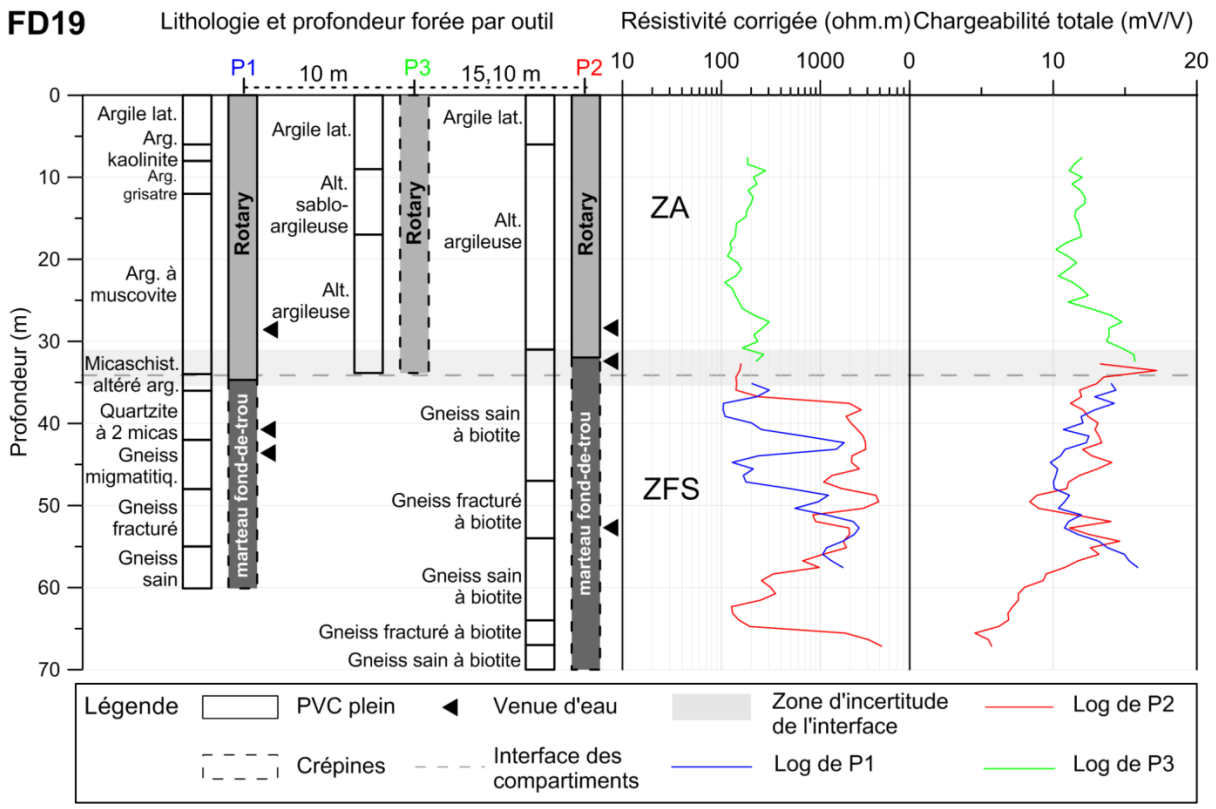

FD17
Résistivité apparente (ohm.m)
Conductivité apparente (mS/m)
33
50
100
500
vers + ∞
vers 0
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
Latitude UTM (m)
1090100
1090000
1089900
1089800
1089700
1089600
1089500
Longitude UTM (m)
440100
440200
440300
440400
440500
440600
440700
N
Légende
Point de mesure EM34
Ligne ERT
Forage en exploitation
Forage/ piézomètre P1
Forage/ piézomètre P2
Forage piézomètre P3

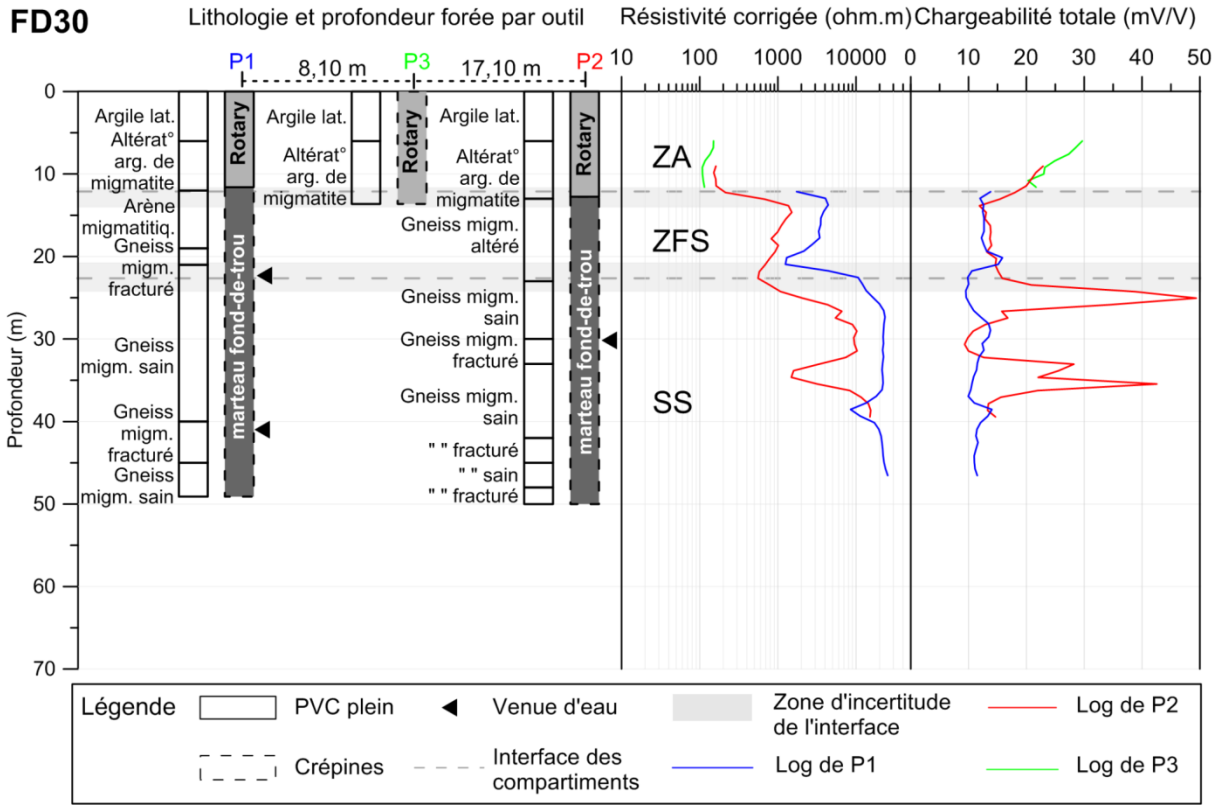

F117
Résistivité apparente (ohm.m)
Conductivité apparente (mS/m)
33
50
100
500
vers + ∞
vers 0
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
Latitude UTM (m)
1108000
1107900
1107800
1107700
1107600
1107500
Habitations
Longitude UTM (m)
507300
507400
507500
507600
507700
507800
507900
N
Légende
Point de mesure EM34
Ligne ERT
Forage en exploitation
Forage/ piézomètre P1
Forage/ piézomètre P2
Forage piézomètre P3

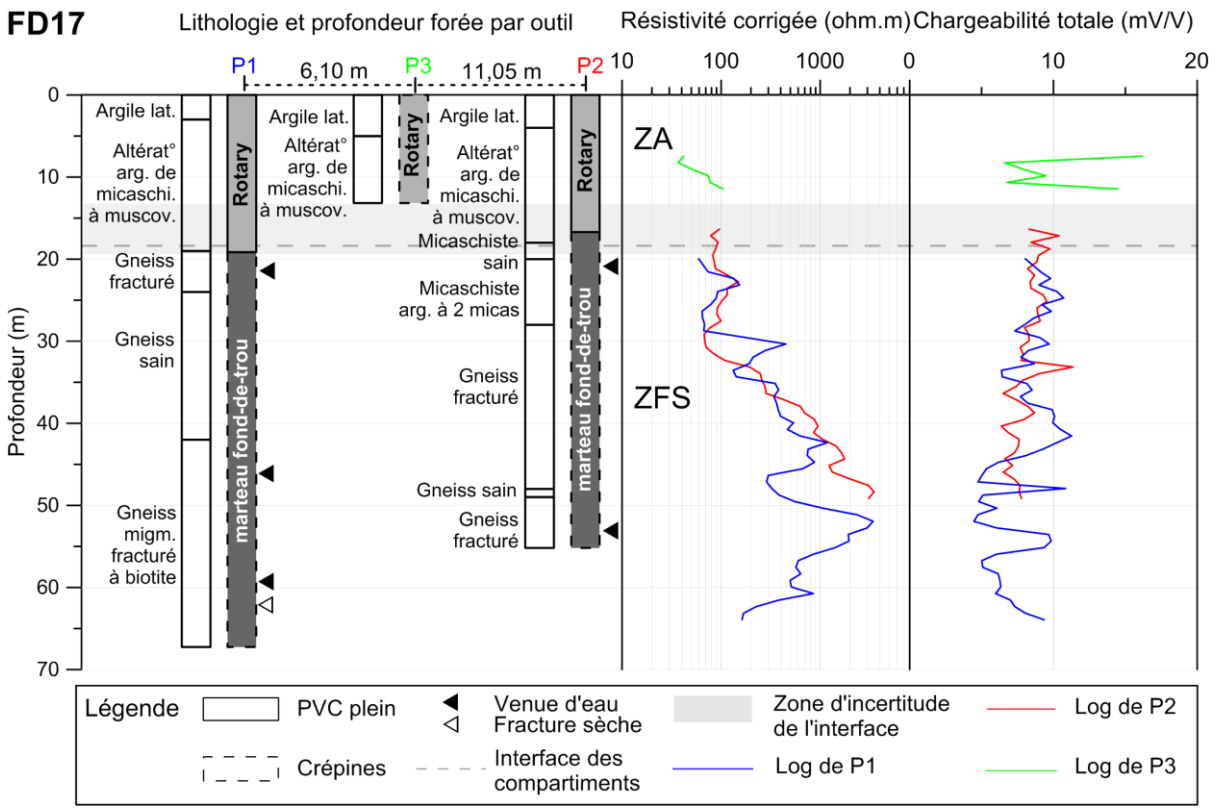
Annexe 4 – Synthèses des mesures en forage : Diagraphies de résistivités et de chargeabilités totales face aux lithologies.

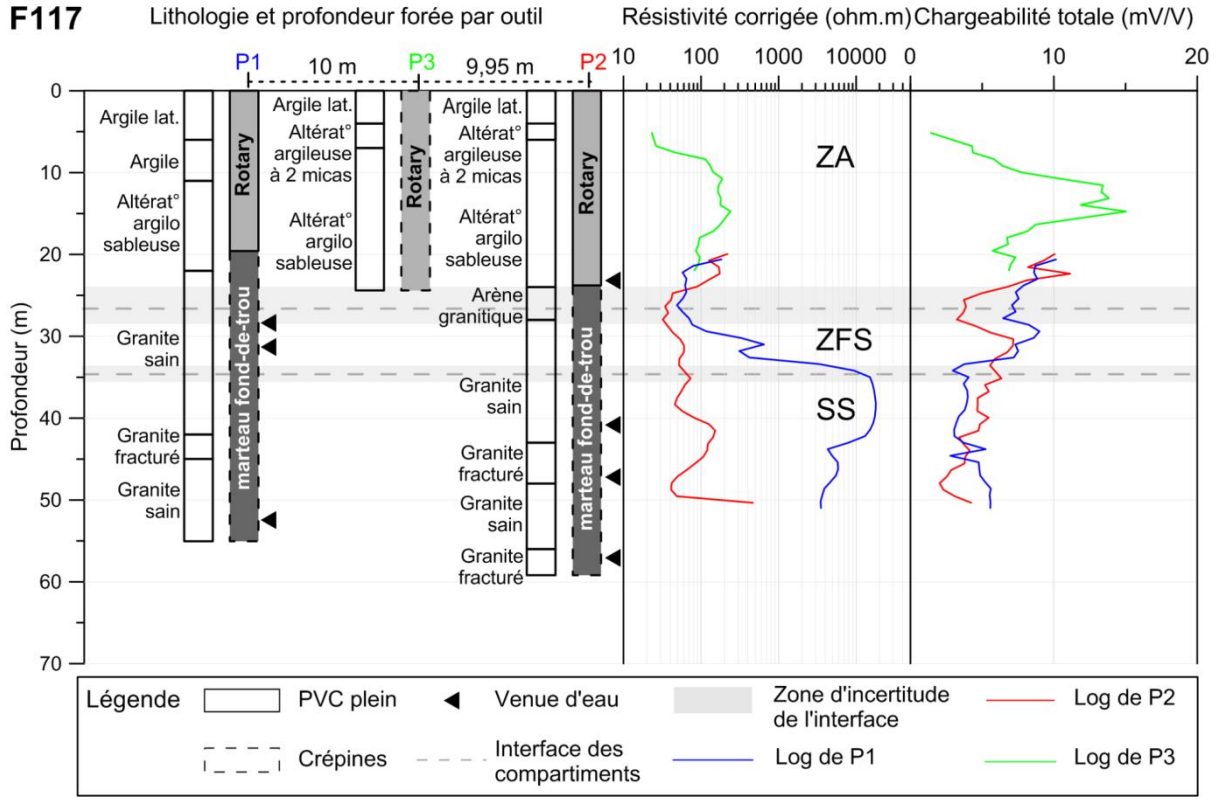




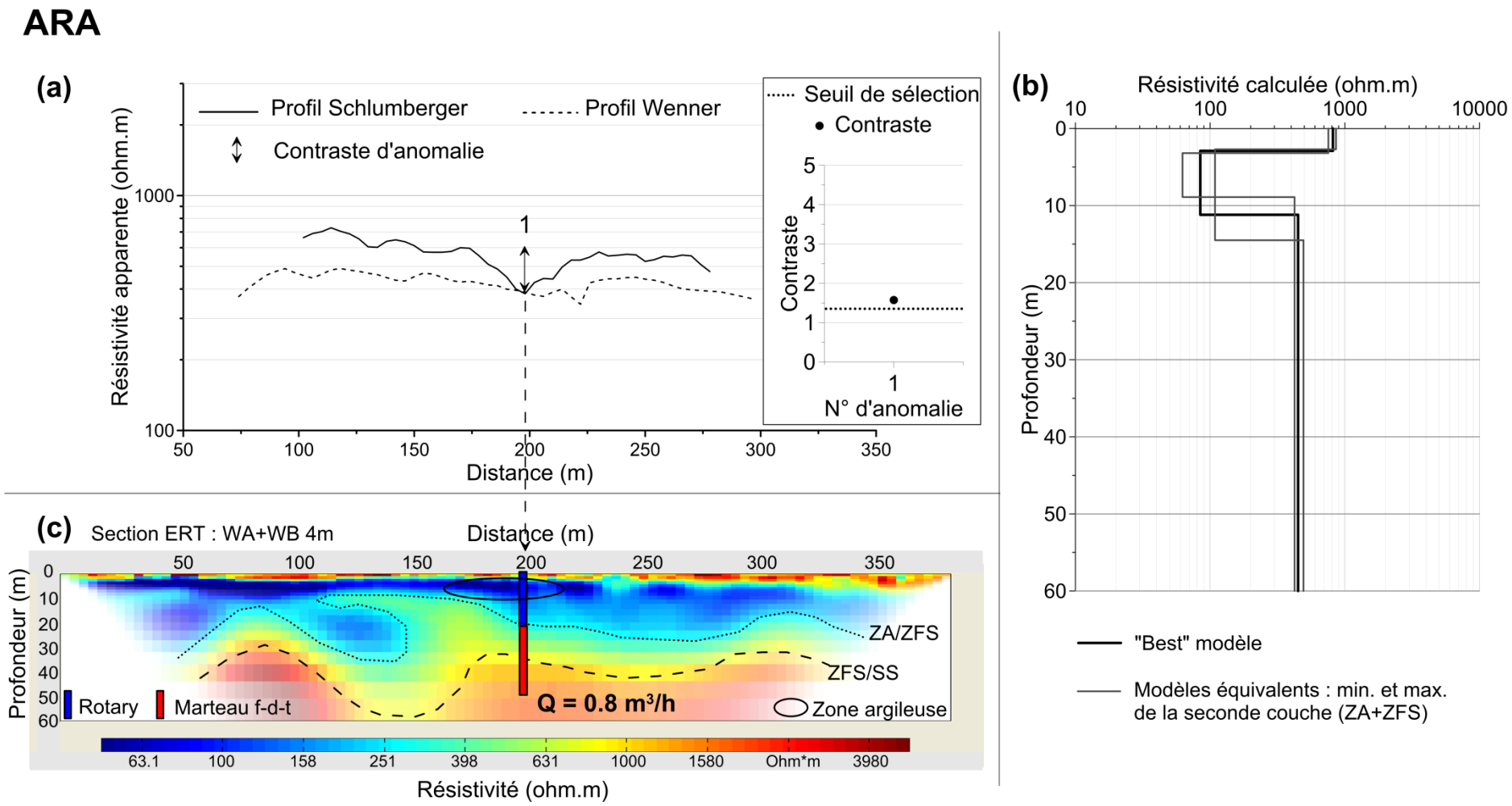

FD19
Lithologie et profondeur forée par outil
Résistivité corrigée (ohm.m)
Chargeabilité totale (mV/V)
P1
10 m
P3
15,10 m
P2
Profondeur (m)
Argile lat.
Arg. kaolinite
Arg. grisatre
Arg. à muscovite
Micaschist. altéré arg.
Quartzite à 2 micas
Gneiss migmatitiq.
Gneiss fracturé
Gneiss sain
Argile lat.
Alt. sablo-argileuse
Alt. argileuse
Argile lat.
Alt. argileuse
Gneiss sain à biotite
Gneiss fracturé à biotite
Gneiss sain à biotite
Gneiss fracturé à biotite
Gneiss sain à biotite
Rotary
marteau fond-de-trou
ZA
ZFS
Légende
PVC plein
Crépines
Venue d'eau
Interface des compartiments
Zone d'incertitude de l'interface
Log de P1
Log de P2
Log de P3


FD30
Lithologie et profondeur forée par outil
Résistivité corrigée (ohm.m)
Chargeabilité totale (mV/V)
P1
8,10 m
P3
17,10 m
P2
Profondeur (m)
Argile lat.
Altérat° arg. de migmatite
Arène migmatitiq.
Gneiss migm. fracturé
Gneiss migm. sain
Gneiss migm. fracturé
Gneiss migm. sain
Argile lat.
Altérat° arg. de migmatite
Argile lat.
Altérat° arg. de migmatite
Gneiss migm. altéré
Gneiss migm. sain
Gneiss migm. fracturé
Gneiss migm. sain
" " fracturé
" " sain
" " fracturé
Rotary
marteau fond-de-trou
ZA
ZFS
SS
Légende
PVC plein
Crépines
Venue d'eau
Interface des compartiments
Zone d'incertitude de l'interface
Log de P1
Log de P2
Log de P3


FD17
Lithologie et profondeur forée par outil
Résistivité corrigée (ohm.m)
Chargeabilité totale (mV/V)
P1
6,10 m
P3
11,05 m
P2
Profondeur (m)
Argile lat.
Altérat° arg. de micaschi. à muscov.
Gneiss fracturé
Gneiss sain
Gneiss migm. fracturé à biotite
Micaschiste sain
Micaschiste arg. à 2 micas
Gneiss fracturé
Gneiss sain
Gneiss fracturé
Rotary
marteau fond-de-trou
ZA
ZFS
Légende
PVC plein
Crépines
Venue d'eau
Fracture sèche
Interface des compartiments
Zone d'incertitude de l'interface
Log de P1
Log de P2
Log de P3


F117
Lithologie et profondeur forée par outil
Résistivité corrigée (ohm.m)
Chargeabilité totale (mV/V)
P1
10 m
P3
9,95 m
P2
Profondeur (m)
Argile lat.
Argile
Altérat° argilo sableuse
Granite sain
Granite fracturé
Granite sain
Altérat° argileuse à 2 micas
Arène granitique
Granite fracturé
Rotary
marteau fond-de-trou
ZA
ZFS
SS
Légende
PVC plein
Crépines
Venue d'eau
Interface des compartiments
Zone d'incertitude de l'interface
Log de P1
Log de P2
Log de P3

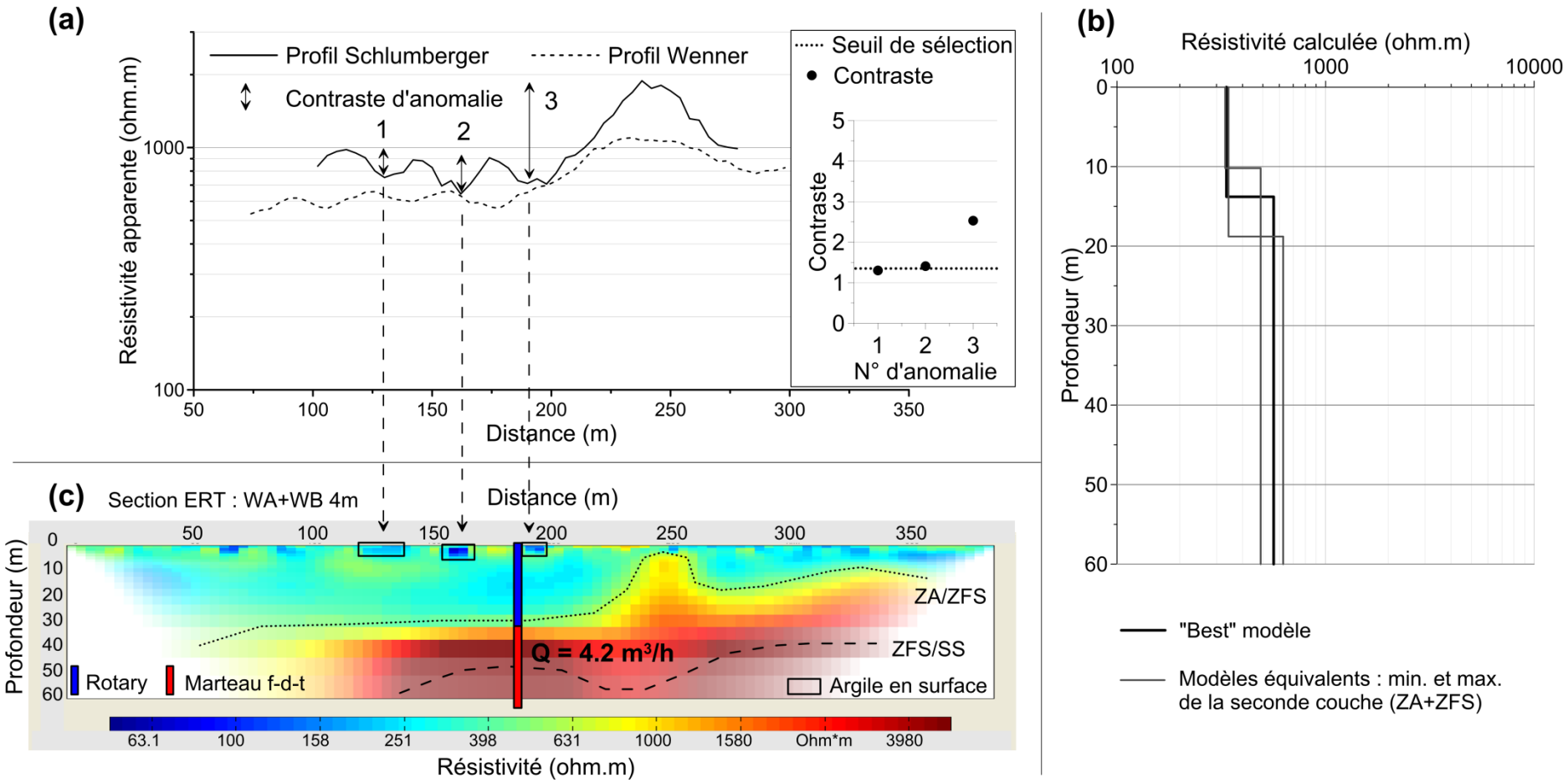
Annexe 5 – Synthèses des mesures en surface : ERTs, profils et sondages sur les sites expérimentaux et le site test.



a) PE Schlumberger et Wenner alpha ; b) SE Schlumberger sur l'anomalie **N°1** du PE Schlumberger ; c) ERT avec Wenner alpha + beta.

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

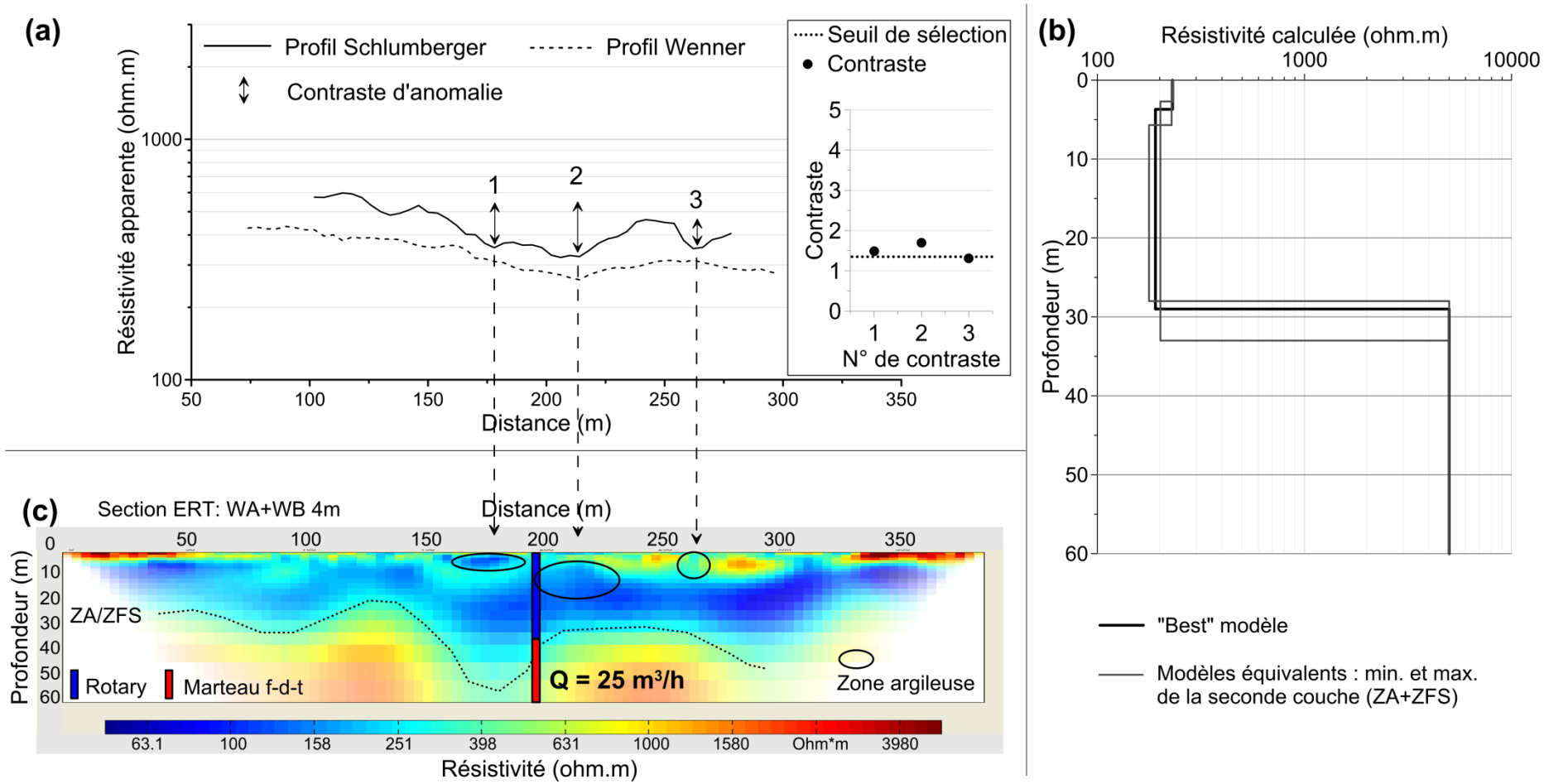
F68



a) PE Schlumberger et Wenner alpha ; b) SE Schlumberger sur l'anomalie **N°3** du PE Schlumberger ; c) ERT avec Wenner alpha + beta.

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

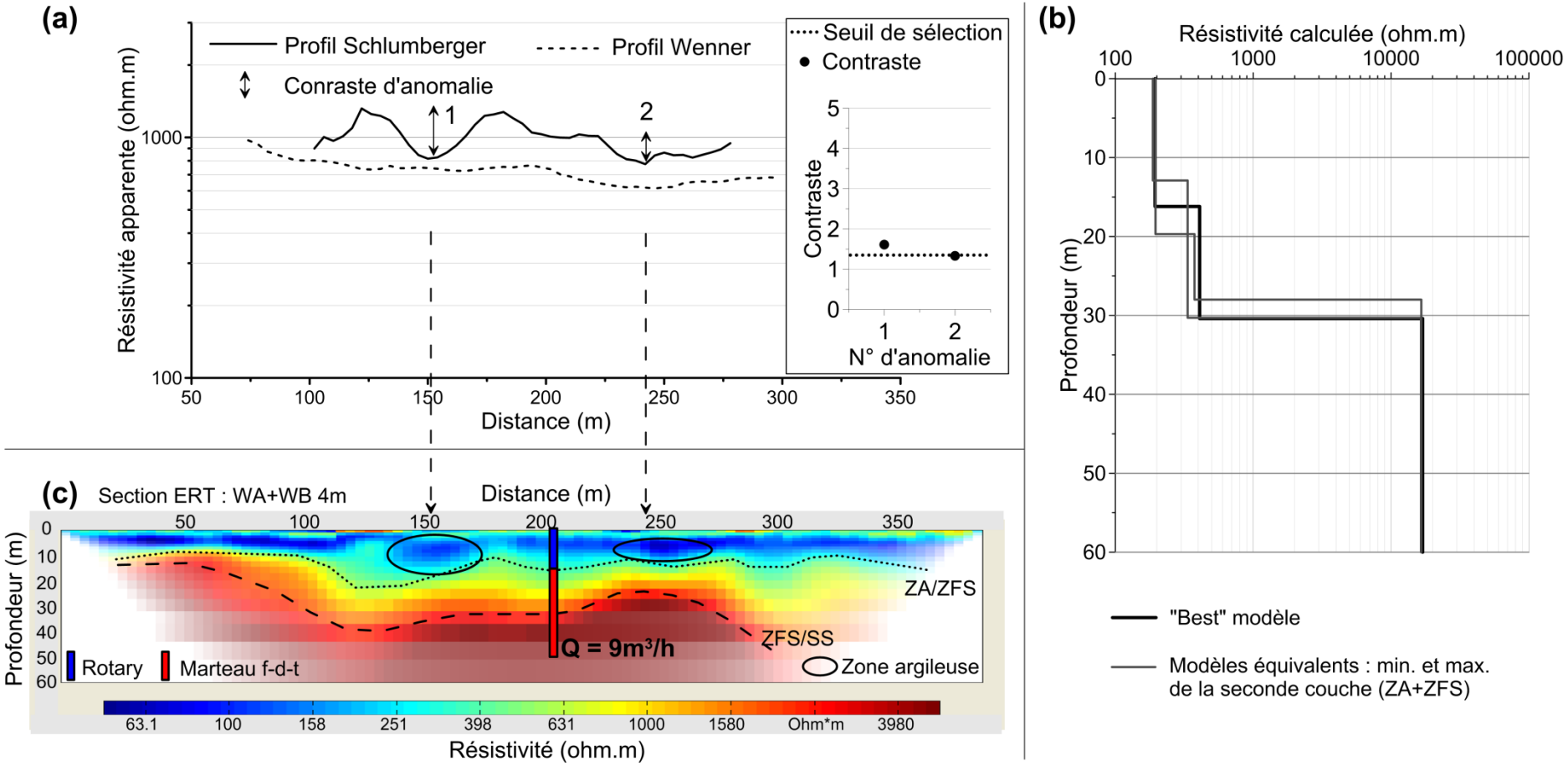
FD19



a) PE Schlumberger et Wenner alpha ; b) SE Schlumberger sur l'anomalie **N°2** du PE Schlumberger ; c) ERT avec Wenner alpha + beta.

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

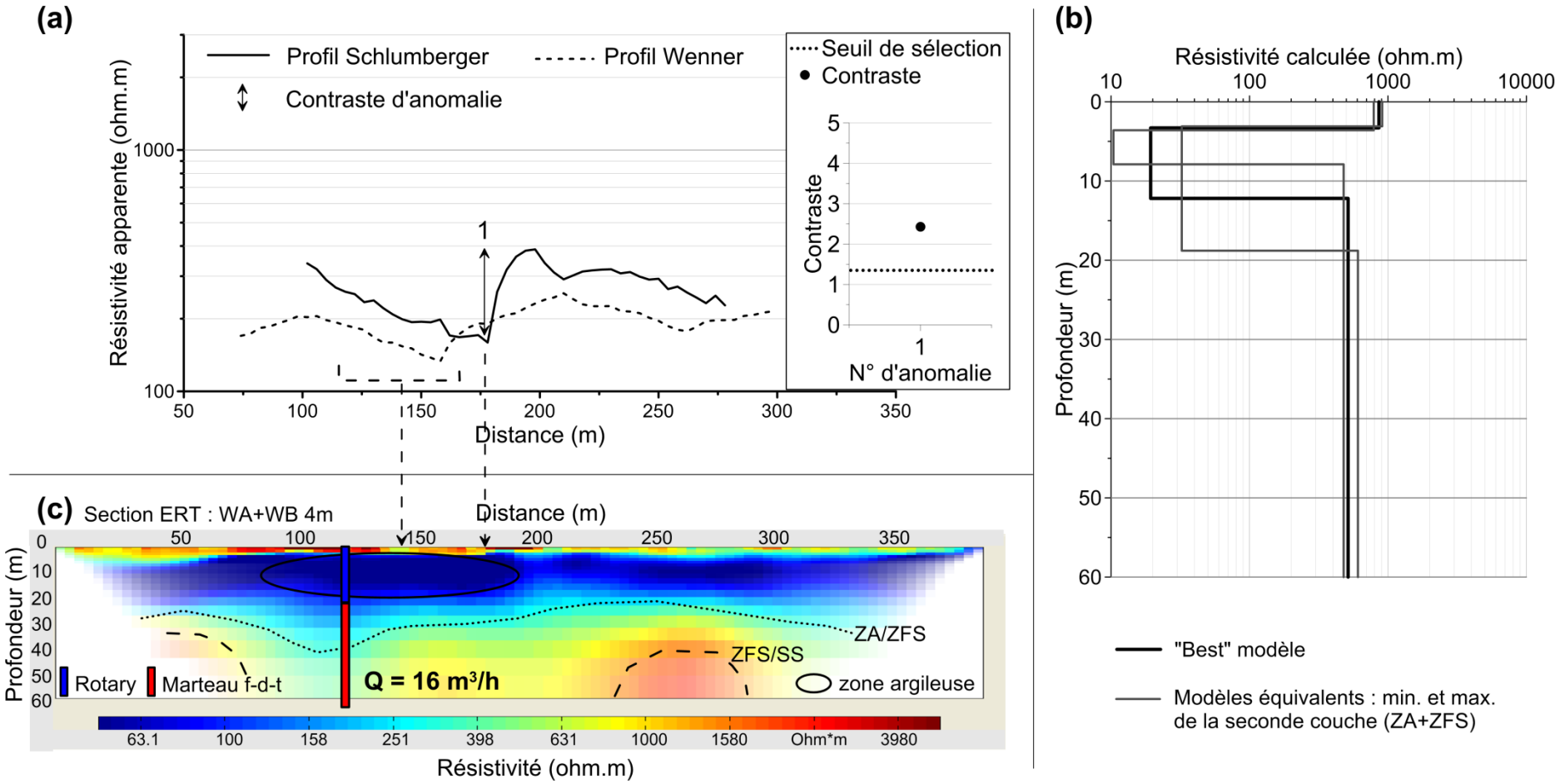
FD30



a) PE Schlumberger et Wenner alpha ; b) SE Schlumberger sur l'anomalie **N°1** du PE Schlumberger ; c) ERT avec Wenner alpha + beta.

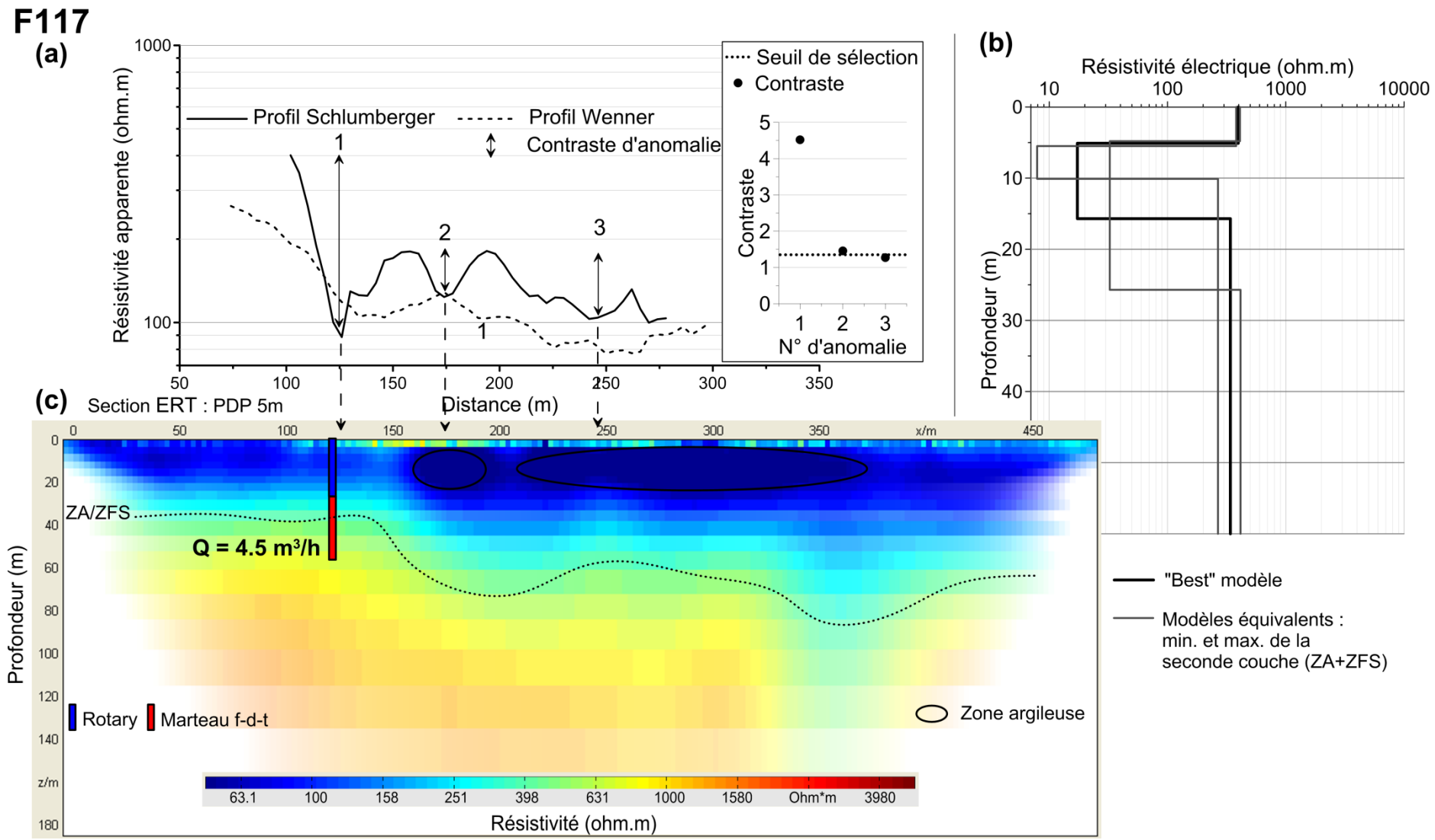
I. C. ALLE ©CIPMA 2019

FD17



a) PE Schlumberger et Wenner alpha ; b) SE Schlumberger sur l'anomalie **N°1** du PE Schlumberger ; c) ERT avec Wenner alpha + beta.

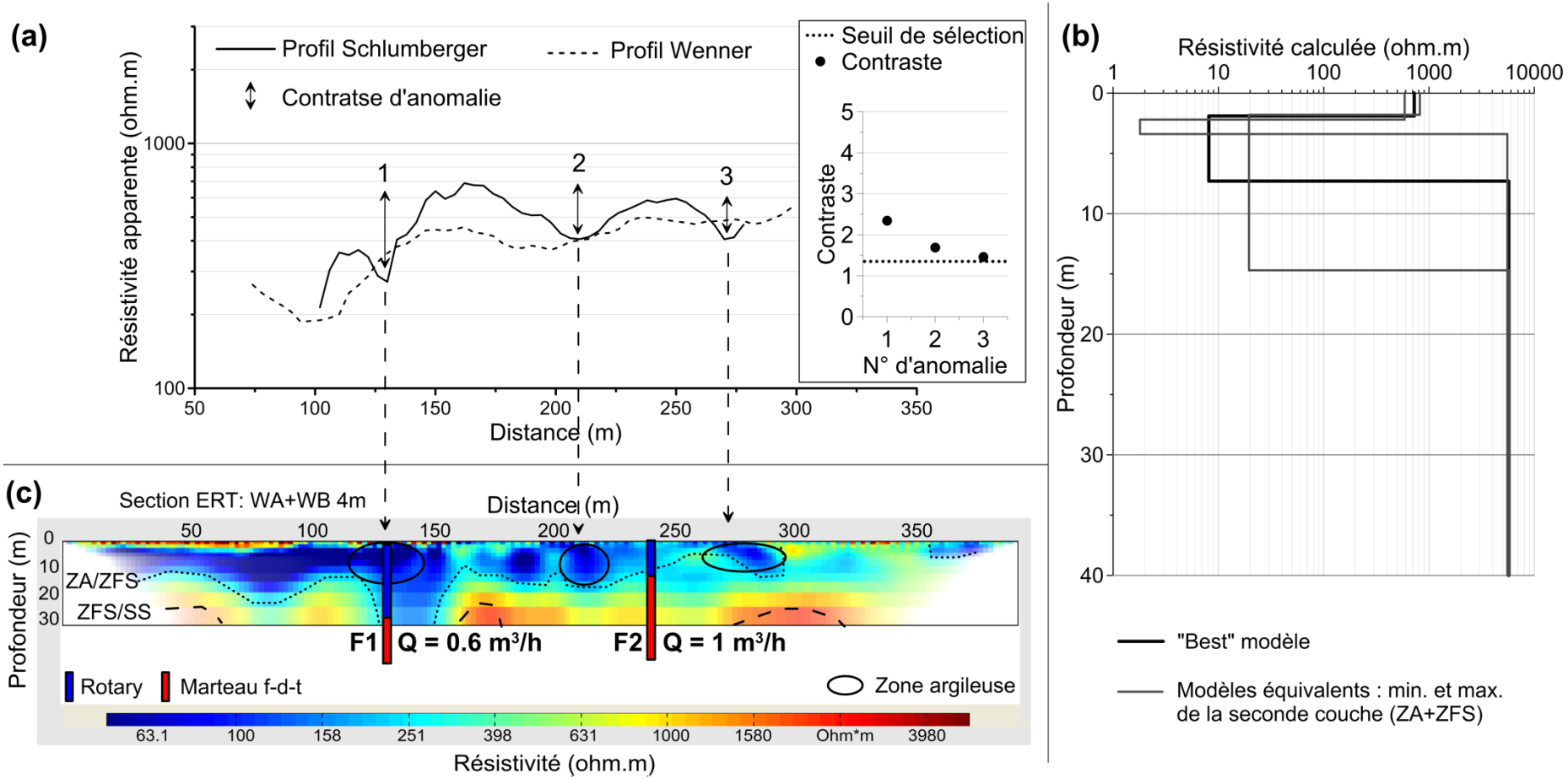
I. C. ALLE ©CIPMA 2019



a) PE Schlumberger et Wenner alpha ; b) SE Schlumberger sur l'anomalie **N°1** du PE Schlumberger ; c) ERT avec Wenner alpha + beta.

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

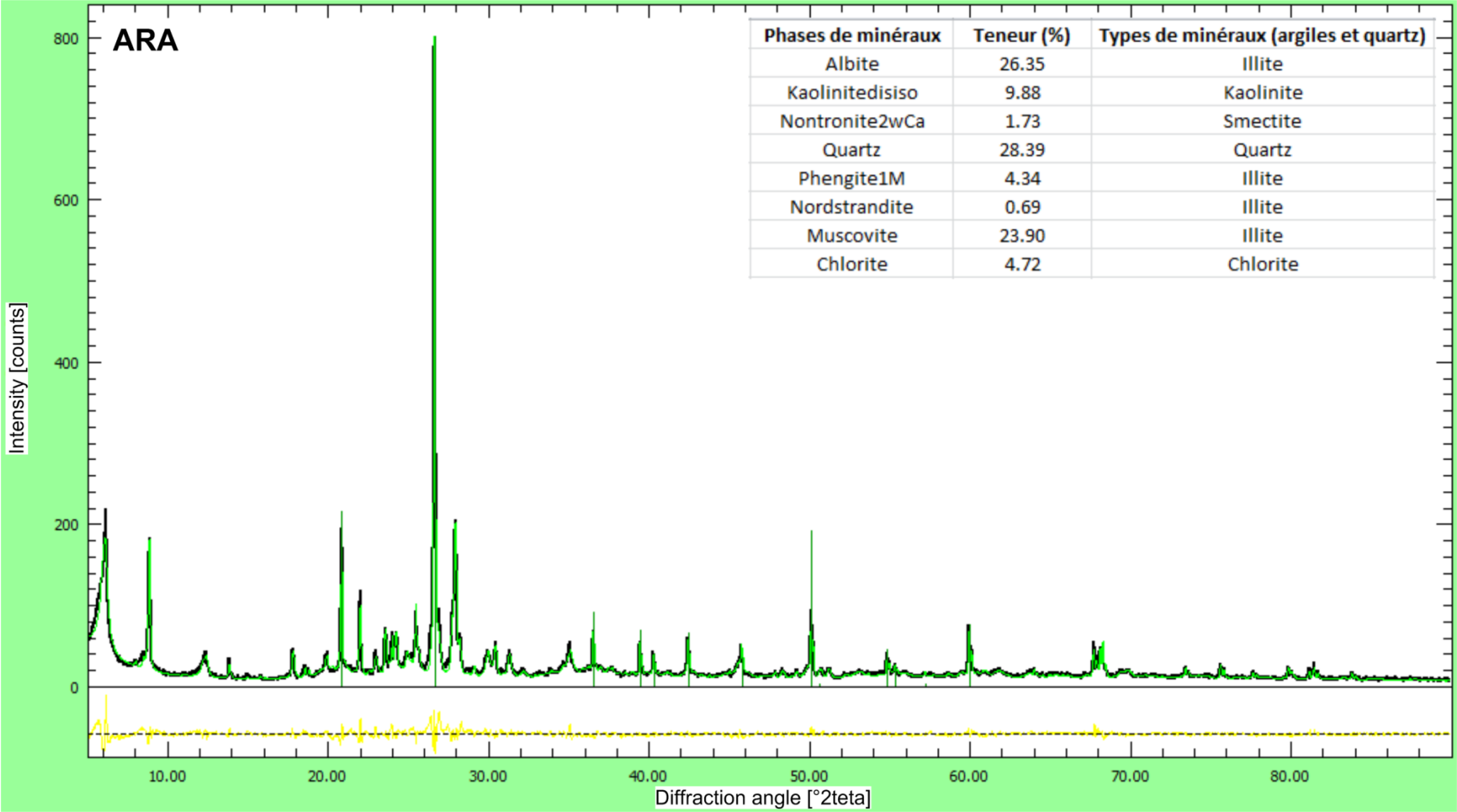
SARE (site test)



a) PE Schlumberger et Wenner alpha ; b) SE Schlumberger sur l'anomalie **N°1** du PE Schlumberger ; c) ERT avec Wenner alpha + beta.

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

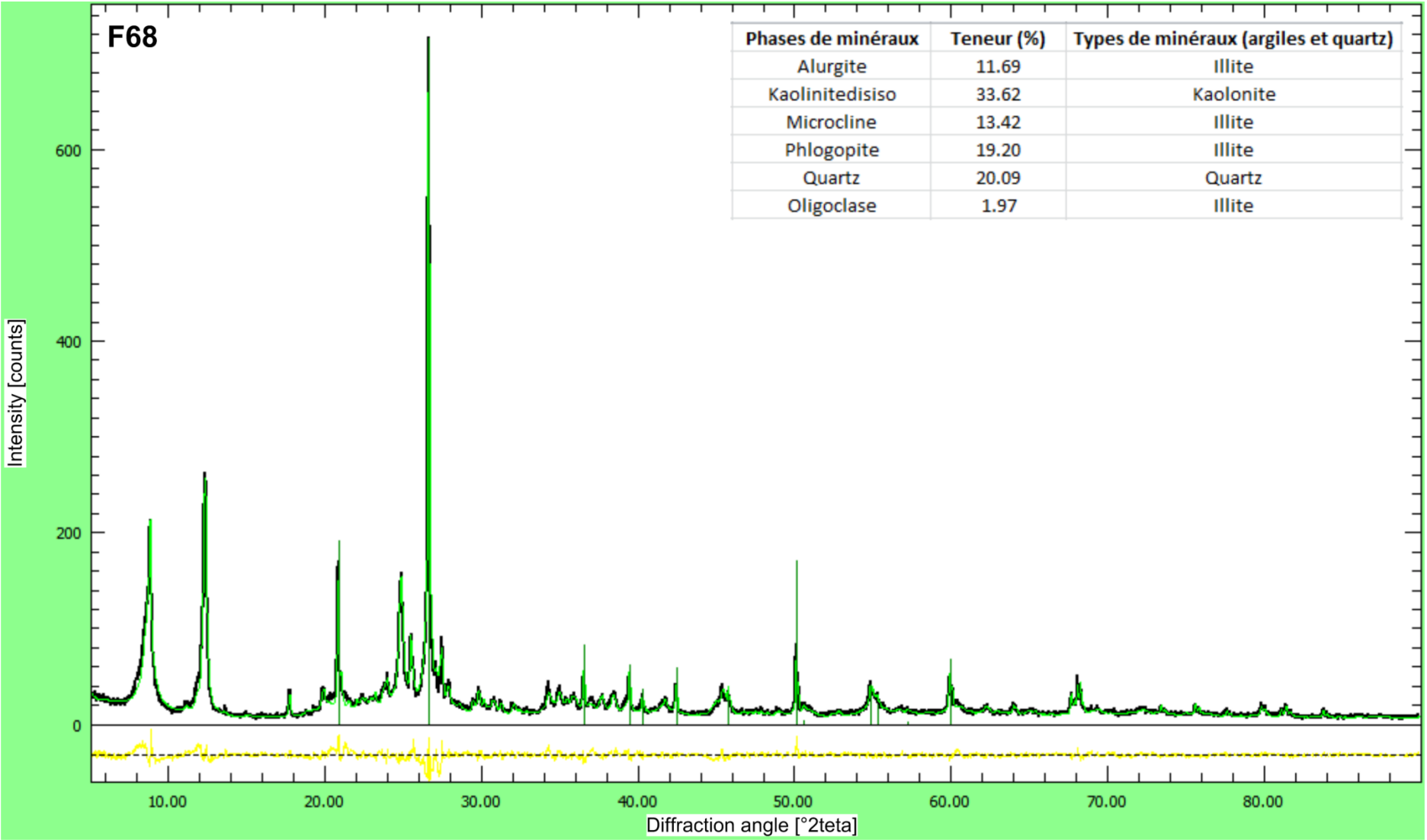
Annexe 6 – Diagrammes issus des analyses au diffractomètre à rayons X.



Phases de minéraux	Teneur (%)	Types de minéraux (argiles et quartz)
Albite	26.35	Illite
Kaolinitedisiso	9.88	Kaolinite
Nontronite2wCa	1.73	Smectite
Quartz	28.39	Quartz
Phengite1M	4.34	Illite
Nordstrandite	0.69	Illite
Muscovite	23.90	Illite
Chlorite	4.72	Chlorite

Diagramme expérimental (noir), modèle résultant des phases de minéraux modélisées (vert) et différence entre ces deux derniers (jaune).

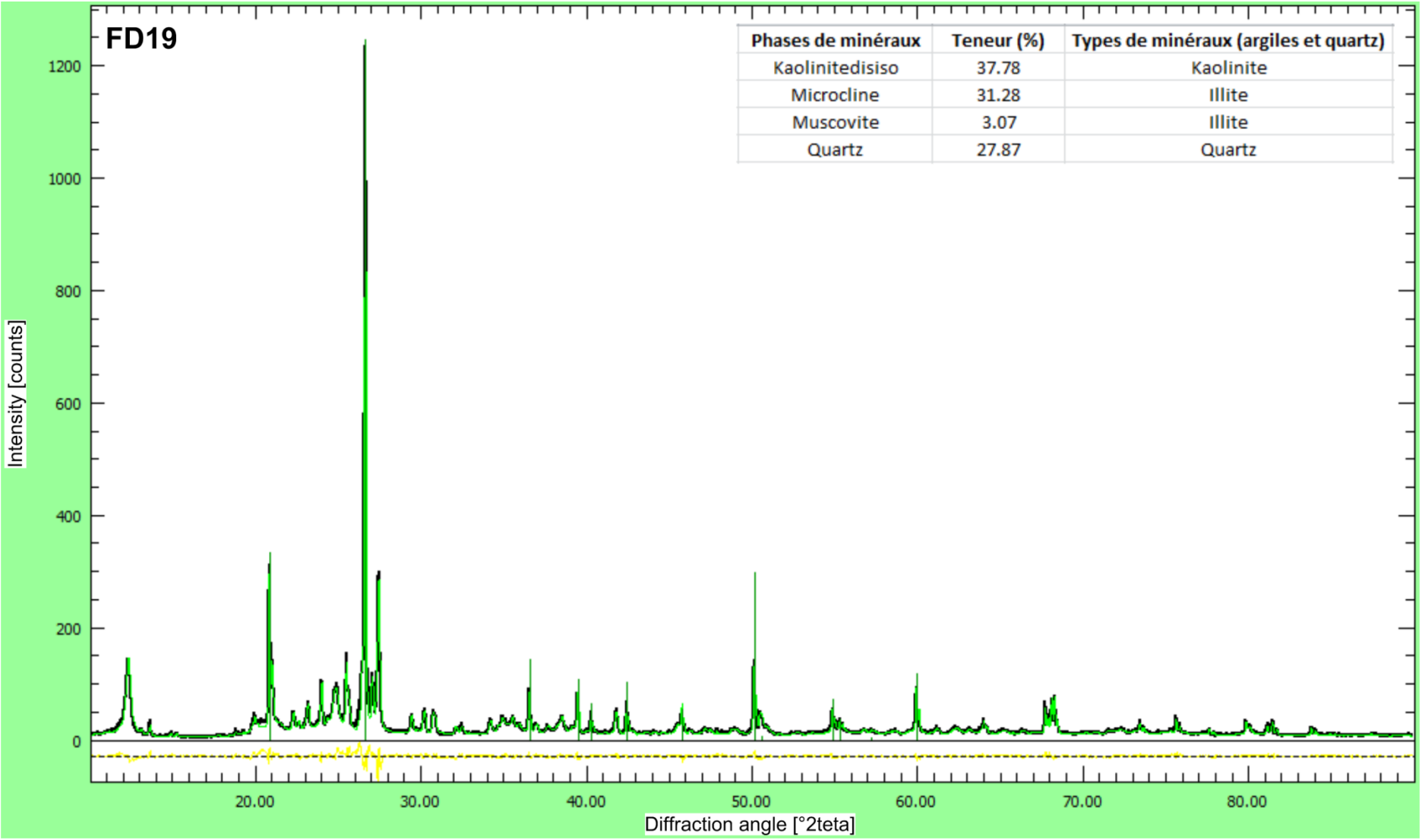
I. C. ALLE ©CIPMA 2019



Phases de minéraux	Teneur (%)	Types de minéraux (argiles et quartz)
Alurgite	11.69	Illite
Kaolinitedisiso	33.62	Kaolonite
Microcline	13.42	Illite
Phlogopite	19.20	Illite
Quartz	20.09	Quartz
Oligoclase	1.97	Illite

Diagramme expérimental (noir), modèle résultant des phases de minéraux modélisées (vert) et différence entre ces deux derniers (jaune).

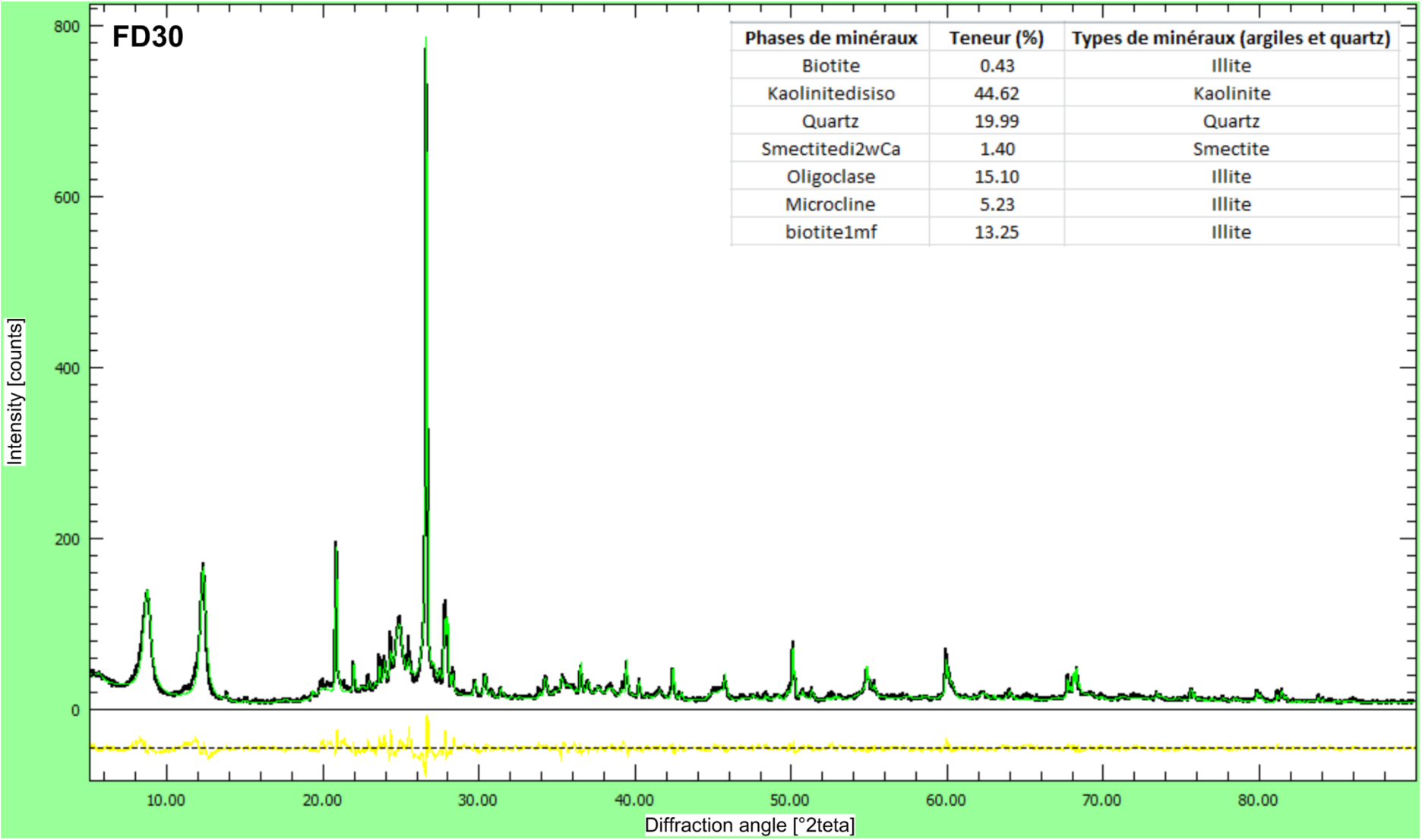
I. C. ALLE ©CIPMA 2019



Phases de minéraux	Teneur (%)	Types de minéraux (argiles et quartz)
Kaolinitedisiso	37.78	Kaolinite
Microcline	31.28	Illite
Muscovite	3.07	Illite
Quartz	27.87	Quartz

Diagramme expérimental (noir), modèle résultant des phases de minéraux modélisées (vert) et différence entre ces deux derniers (jaune).

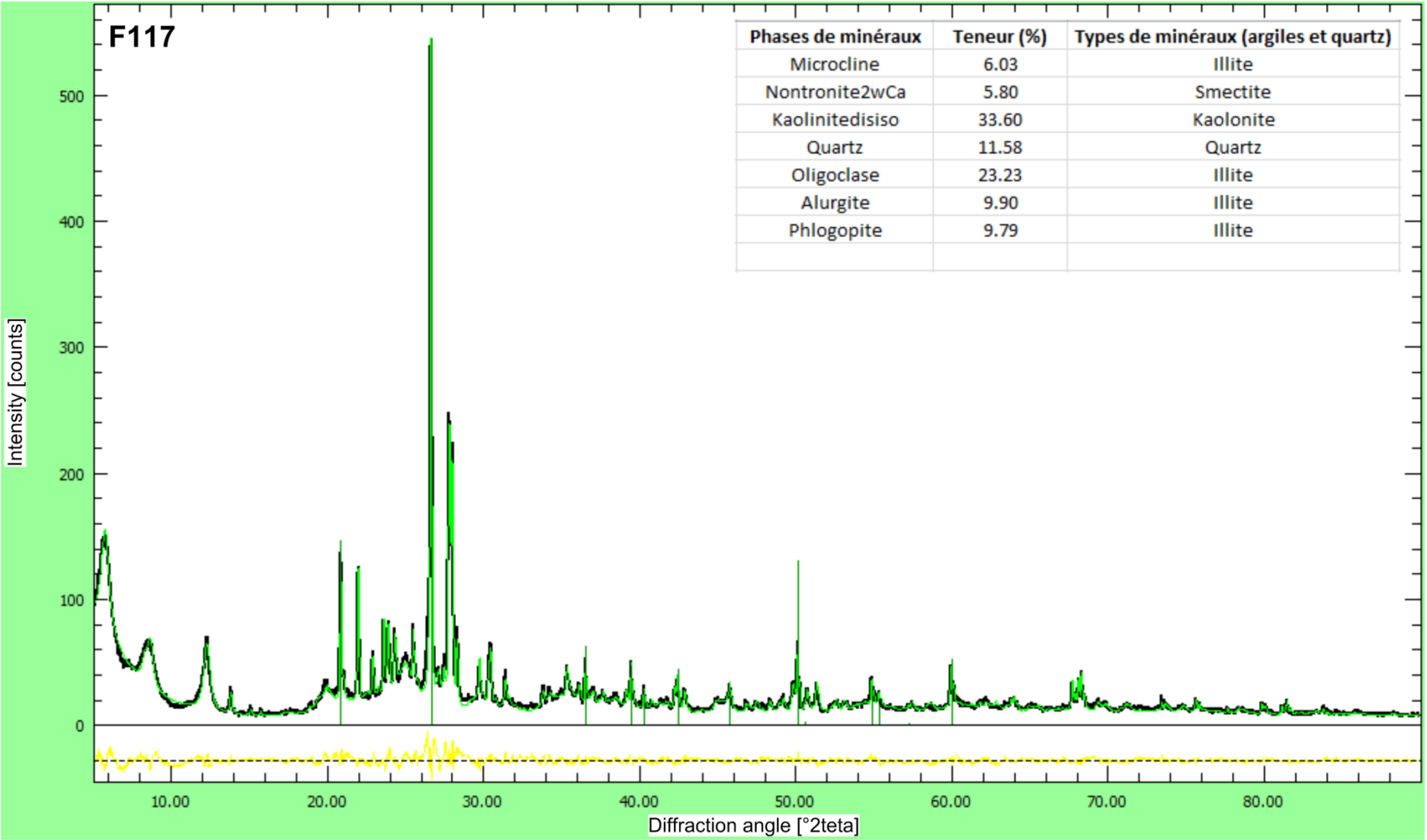
I. C. ALLE ©CIPMA 2019



Phases de minéraux	Teneur (%)	Types de minéraux (argiles et quartz)
Biotite	0.43	Illite
Kaolinitedisiso	44.62	Kaolinite
Quartz	19.99	Quartz
Smectitedi2wCa	1.40	Smectite
Oligoclase	15.10	Illite
Microcline	5.23	Illite
biotite1mf	13.25	Illite

Diagramme expérimental (noir), modèle résultant des phases de minéraux modélisées (vert) et différence entre ces deux derniers (jaune).

I. C. ALLE ©CIPMA 2019



Phases de minéraux	Teneur (%)	Types de minéraux (argiles et quartz)
Microcline	6.03	Illite
Nontronite2wCa	5.80	Smectite
Kaolinitedisiso	33.60	Kaolonite
Quartz	11.58	Quartz
Oligoclase	23.23	Illite
Alurgite	9.90	Illite
Phlogopite	9.79	Illite

Diagramme expérimental (noir), modèle résultant des phases de minéraux modélisées (vert) et différence entre ces deux derniers (jaune).

I. C. ALLE ©CIPMA 2019

Annexe 7 – Lithologies et caractéristiques des forages LETS (Ouest => Est).

Les vitesses d'avancement ne sont pas prises en compte car elles sont affectées par la puissance de la foreuse qui varie selon la conduite du foreur au cours de la foration.

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Ara
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Nalohou
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Djougou II
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Donga / Djougou

FORAGE No. **ARA-P1**

Coordonnées (UTM)

X:	346386	N
Y:	1077251	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	49.0	m
Equip. Prof.	49.0	m
Ø 9" 7/8	- 21	m
Ø 6" 1/2	- 28	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	20.6	m	PVC	140
Crépines	25.9	m	PVC	140
Ouverture	1	mm		
Décanteur	2.5	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h 00	
Débit:	0.8	m^3/h
N.S:	3.35	m/sol
Date:	23/04/2013	

Essai de Pompage

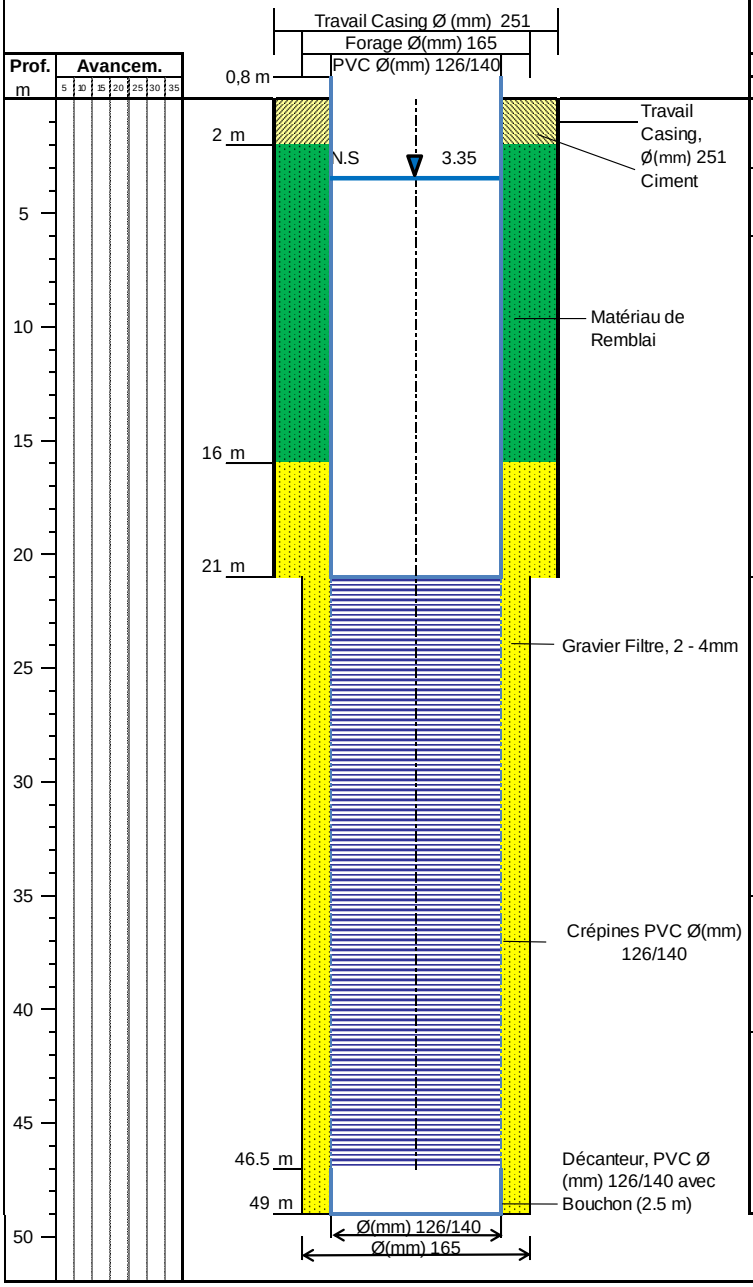
Durée:	-	h	N.D:	-	m/sol.
Débit:	-	m^3/h	Prof. Inst.:	-	m
N.S:	-	m/sol	Date:	-	

Dates Forage:

Début:	22/04/2013	Fin:	23/04/2013

Equipment

Remarque



LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Description
0 - 3 m			Argile latéritique
3 - 6 m			Altération argileuse
6 - 21 m			Micaschiste altéré
21-35 m	$0.9\ m^3/h$ 34		Micaschiste sain
35-41 m			Micaschiste fracturé
41- 49 m			Micaschiste sain

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité : Ara	FORAGE No. ARA-P2
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village : Nalohou	Coordonnées (UTM)
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement: Djougou II	X: 346383 N
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune: Donga / Djougou	Y: 1077230 W
			Z: - m

Forage

Prof. foréee	60.0	m
Equip. Prof.	60.0	m
Ø 9" 7/8	- 17	m
Ø 6" 1/2	- 31	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	17.1	m	PVC	140
Crépines	39.9	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	2.3	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h30	
Débit:	0.923	m^3/h
N.S:	-	m/sol
Date:	25/04/2013	

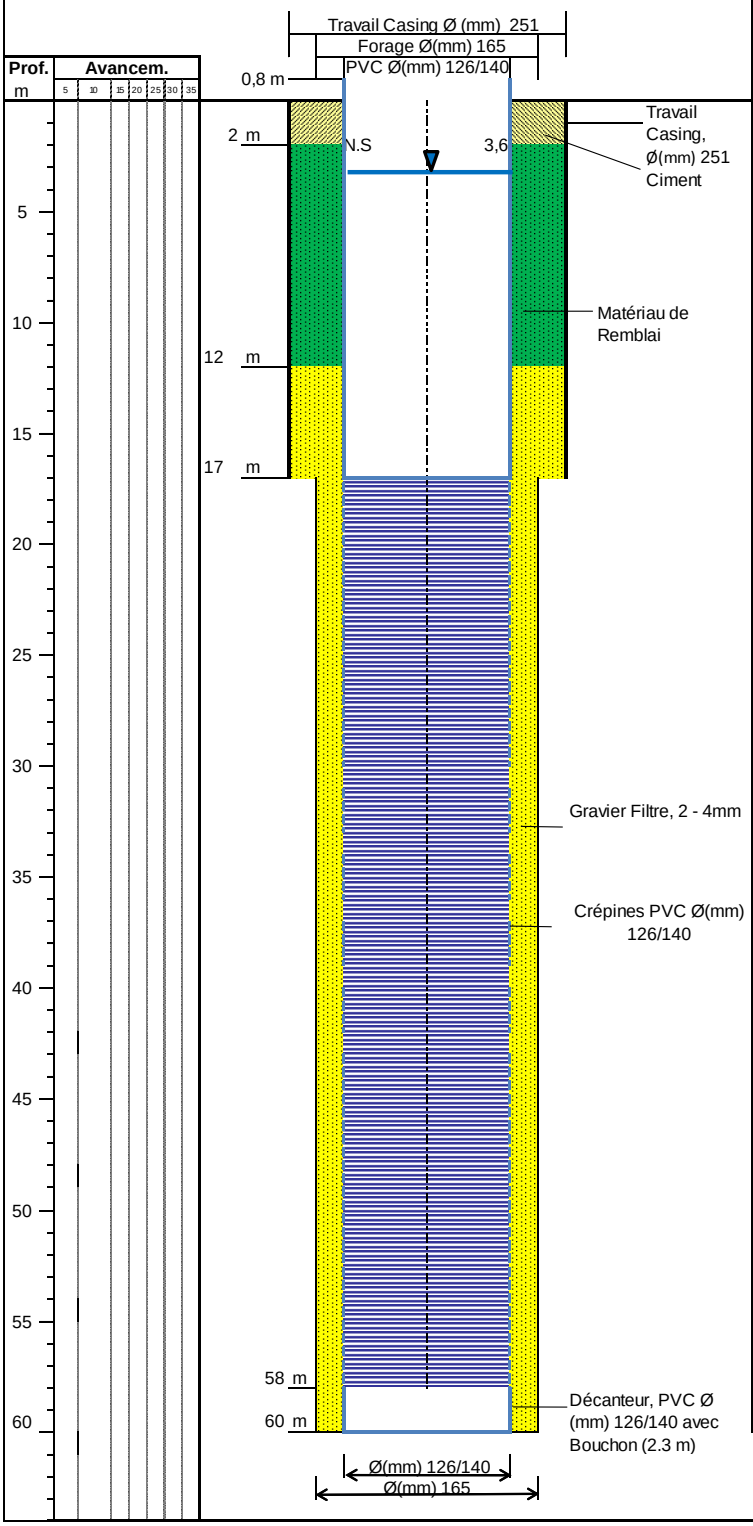
Essai de Pompage

Durée:	- h	N.D:	- m/sol
Débit:	- m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	- msol	Date:	-

Dates Forage:

Début: 25/04/2013 Fin: 25/04/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Description
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 18 m			Micaschiste altéré
18-30 m	28,5m 0,97 m^3/h		Micaschiste sain
30- 34 m	32 m 1,33 m^3/h		Micaschiste fracturé
34-42			Micaschiste sain
42- 44 m	43 m 1 m^3/h		Micaschiste fracturé
44- 60m	48 m 0,878m^3/h		Micaschiste sain

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Ara
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Nalohou
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Djougou II
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Departement/Commune:	Donga/ Djougou

FORAGE No. ARA-P3

Coordonnées (UTM)

X:	346383	N
Y:	1077240	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	25.3 m	
Equip. Prof.	25.3 m	
Ø	9" 7/8	25.3 m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	6.3	m	PVC	140
Crépines	17.5	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	1.5	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h 35	
Débit:	0.54	m^3/h
N.S:	3.9	m/sol
Date:	24/04/2013	

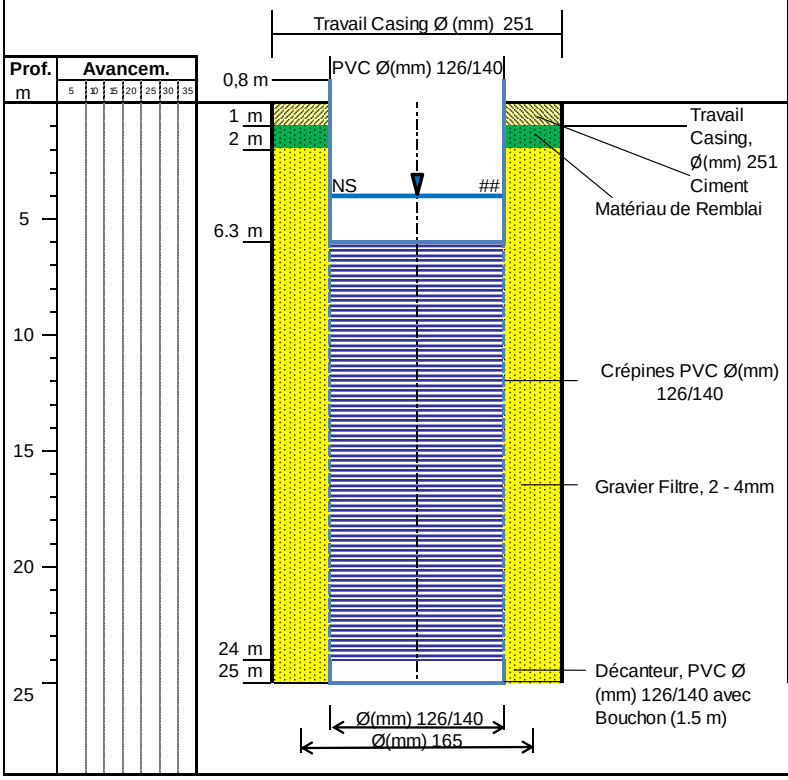
Essai de Pompage

Durée:	- h	N.D:	-	m/sol
Débit:	- m^3/h	Prof. Inst.:	-	m
N.S:	- m/sol	Date:	-	

Dates Forage:

Début:	24/04/2013	Fin:	24/04/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	rrivée d'ea	Profile	Déscriptio
0 - 3 m			Argile Lateritique
3- 25 m			Altération de micaschiste à deux micas

Projet	GRIBA	**FICHE DE FORAGE**	FORAGE No. **F68-P1**
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Localité : **Adjandjahoun** Village : **Onklou** Arrondissement: **Onklou** Département/Commune: **Donga / Djougou**	**Coordonnées (UTM)** X: 387756 N Y: 1039698 W Z: - m
Entreprise:	FORAG SA		
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND		

Forage

Prof. foréee	67.3	m
Equip. Prof.	67.3	m
Ø 9" 7/8	- 29	m
Ø 6" 1/2	- 38.3	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	29.0	m	PVC	140
Crépines	35.7	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	2.6	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h 00	
Débit:	4.2	m^3/h
N.S:	8.20	m/sol
Date:	16/05/2013	

Essai de Pompage

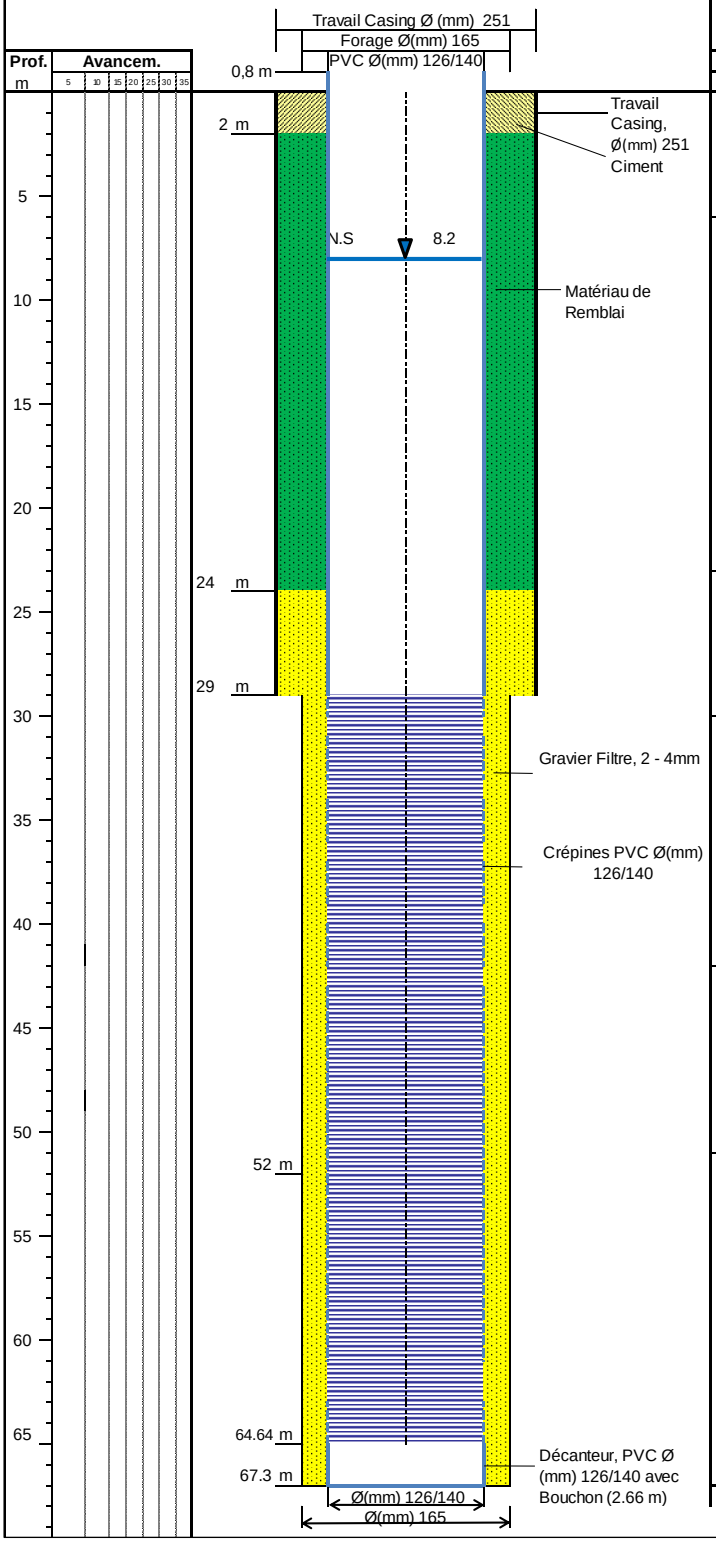
Durée:	4 h	N.D:	22.45	m/sol
Débit:	4.5 m^3/h	. Inst.:	40	m
N.S:	8.15 m/sol	Date:	30/05/2013	

Dates Forage:

Début:	16/05/2013	Fin:	17/05/2013

Remarque

Equipment



LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Description
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 23 m			Altération argileuse de micaschiste
23-30 m			Arène de micaschiste
30- 42 m	37 0.4 m^3/h 40 4.8 m^3/h		Gneiss migmatitique sain à muscovite et biotite
43-51 m			Gneiss migmatitique à biotite fracturée
51-67m			Gneiss migmatique sain à biotite

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Adjandjahoun
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Onklou
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Onklou
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Donga / Djougou

FORAGE No. **F68-P2**

Coordonnées (UTM)

X:	387766	N
Y:	1039700	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	60.0	m
Equip. Prof.	60.0	m
Ø 9" 7/8	- 29	m
Ø 6" 1/2	- 31	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	28.8	m	PVC	140
Crépines	29.1	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	2.1	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h 00	
Débit:	5.5	m^3/h
N.S:	7.20	m/sol
Date:	30/04/2013	

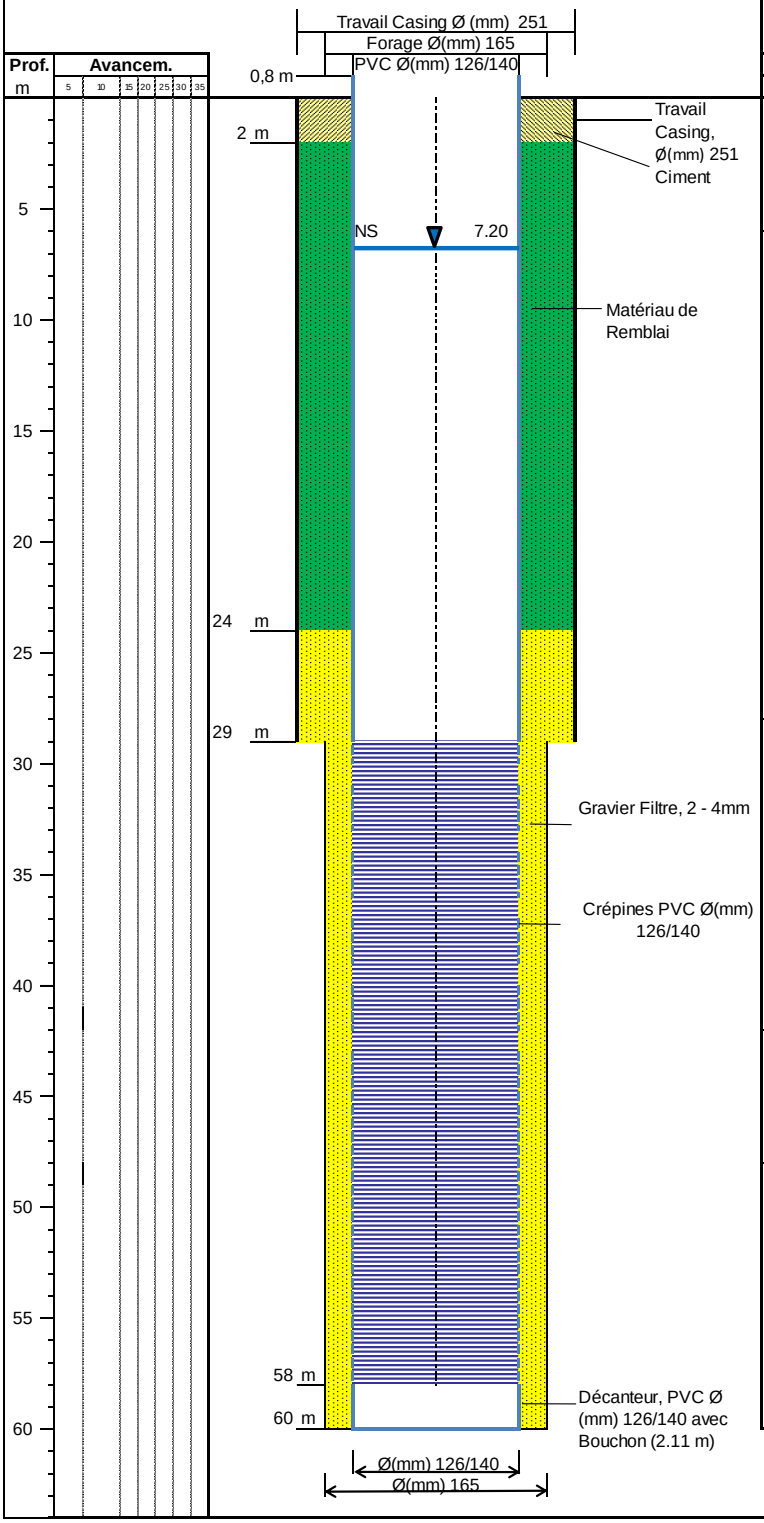
Essai de Pompage

Durée:	4	h	N.D:	15.92	m/sol.
Débit:	4.5	m^3/h	Prof. Inst.:	-	m
N.S:	8.06	m/sol	Date:	30/05/2013	

Dates Forage:

Début:	26/04/2013	Fin:	30/04/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Description
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 28 m			Altération argileuse de micashiste
28- 42m	37 — 1.6 m^3/h		Gneiss migmatitique sain
42-48 m	43 — 4.5m^3/h		Gneiss migmatitique à biotite fracturée
48-60m	49 — 6.2 m^3/h; 55 — 9 m^3/h		Gneiss migmatique sain à biotite

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Adjandjahoun
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Onklou
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Onklou
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Donga/ Djougou

FORAGE No. F68-P3

Coordonnées (UTM)

X:	387758	N
Y:	1039699	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	28.2	m
Equip. Prof.	28.2	m
Ø 9" 7/8	- 28.2	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø(mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	6.4	m	PVC	140
Crépines	20.8	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	1	m	PVC	140

Développement

Durée:	1	h
Débit:	3.08	m^3/h
N.S:	7.5	m/sol
Date:	17/05/2013	

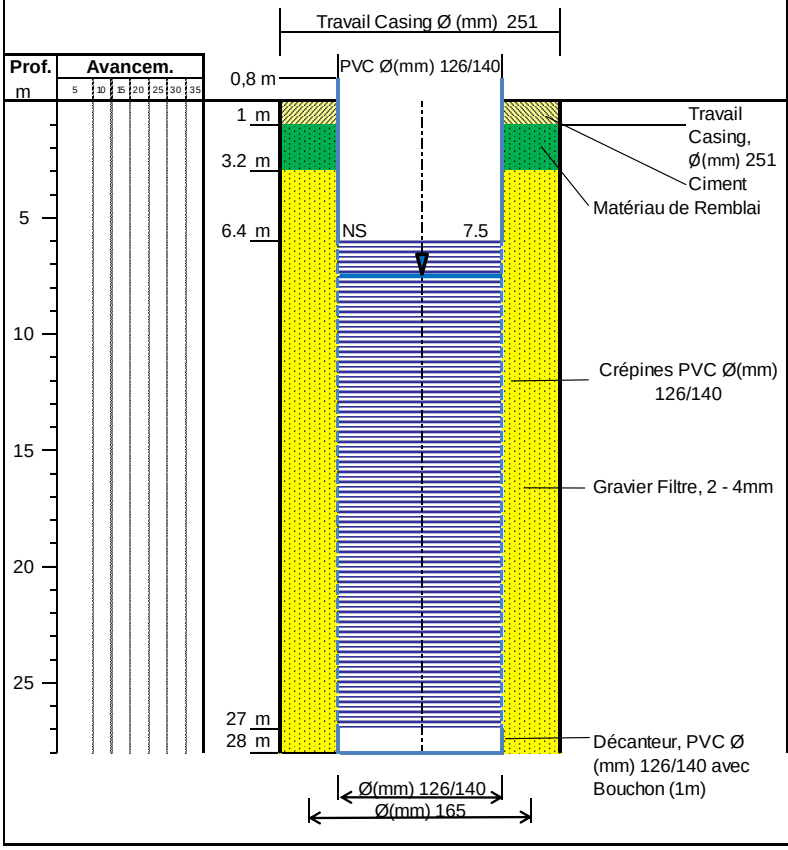
Essai de Pompage

Durée:	4 h	N.D:	8.37	m/sol
Débit:	4.5 m^3/h	Prof. Inst.:	-	m
N.S:	7.56 m/sol	Date:	30/05/2013	

Dates Forage:

Début:	17/05/2013	Fin:	17/05/2013

Equipement



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	rrivée d'ea	Profile	Déscription
0 - 6 m			Argile Lateritique
6 - 28,2 m			Altération argileuse de micaschiste

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité : **Potokou II**	FORAGE No. **FD19-P1**
Client:	**IRD-PROJET GRIBA**	Village : **Gouaga**	**Coordonnées (UTM)**
Entreprise:	**FORAG SA**	Arrondissement: **Bariénou**	X: 389650 N
Foreur: SORHGO	Foreuse: **INGERSOL RAND**	Département/Commune: **Donga / Djougou**	Y: 1078694 W
			Z: - m

Forage

Prof. foréee	60.1	m
Equip. Prof.	60.1	m
Ø 9" 7/8	- 35	m
Ø 6" 1/2	- 25	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	35.0	m	PVC	140
Crépines	22.4	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	2.1	m	PVC	140

Développement

Duréee:	1	h
Débit:	25	m^3/h
N.S:	6.5	m/sol
Date:	23/04/2013	

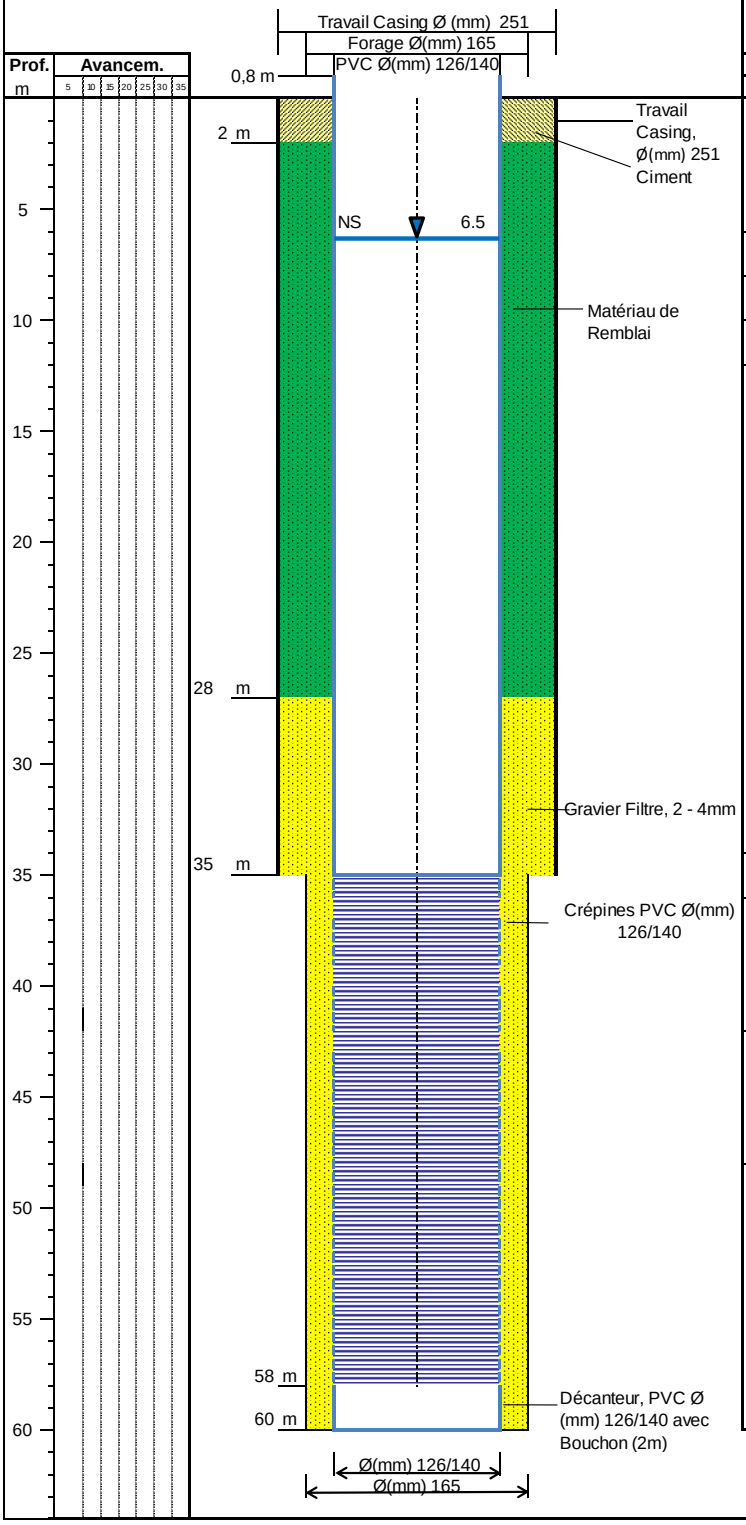
Essai de Pompage

Duréee:	4 h	N.D:	10.98 m/sol
Débit:	12 m^3/h	Prof. Inst.:	40 m
N.S:	6.17 m/sol	Date:	29/05/2013

Dates Forage:

Début:	22/04/2013	Fin:	23/04/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Déscription
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 8m			Argile latéritique à kaolinite
8-10 m			Argile grisâtre
10- 12 m			Argile à muscovite
12- 34 m	28 m 0.4 m^3/h		Micaschiste altéré argileuse
34 -36 m			Quartizite très grenu à muscovite et à
36 -42 m	41 1,3 m^3/h		Gneiss sain
42-48 m	43 29.8m^3/h		Gneiss fracturé
48-60 m			Gneiss sain

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Potokou II
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Gouaga
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Bariénou
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Départment/Commune:	Donga / Djougou

FORAGE No. **FD19-P2**

Coordonnées (UTM)

X:	389680	N
Y:	1078697	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee		70.0 m
Equip. Prof.		70.0 m
Ø	9" 7/8	- 32 m
Ø	6" 1/2	- 38.1 m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	32.0	m	PVC	140
Crépines	35.7	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	2.4	m	PVC	140

Développement

Duréee:	1 h	
Débit:	51.4	m^3/h
N.S:	6.30	m/sol
Date:	13/05/2013	

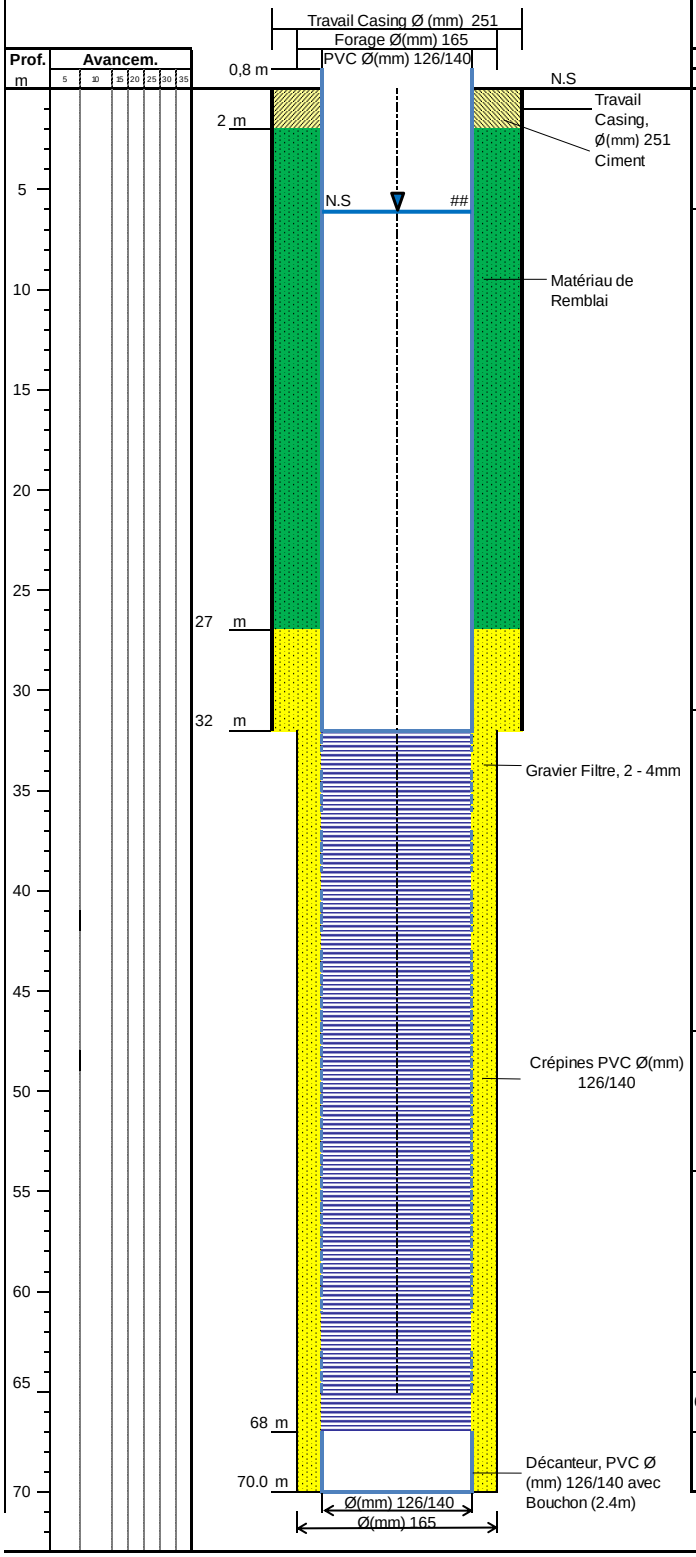
Essai de Pompage

Duréee:	4 h	N.D:	8.08 m/sol
Débit:	12 m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	6.2 m/sol	Date:	29/05/2013

Dates Forage:

Début:	12/05/2013	Fin:	13/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Déscription
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 31m	28 m, 0.4 m^3/h		Altérites argileuses
31-47 m	32 m, 0.6 m^3/h		Gneiss sain à biotite
47- 54m	53m, 1 m^3/h		Gneiss à biotite fracturé
54- 64 m			Gneiss sain à biotite
64 - 67 m			Gneiss à biotite fracturé
67- 70 m			Gneiss sain à biotite

Projet	GRIBA	**FICHE DE FORAGE**	FORAGE No.	**FD19-P3**
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Localité : **Potokou II**	Coordonnées (UTM)	
		Village : **Gaouga**	X: 389665	N
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement: **Bariénou**	Y: 1078691	W
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune: **Donga / Djougou**	Z: -	m

Forage

Prof. foréee	33.9	m
Equip. Prof.	33.9	m
Ø 9" 7/8	- 33.9	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	2.4	m	PVC	140
Crépines	29.6	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	1	m	PVC	140

Développement

Duréee:	2	h
Débit:	3.3	m^3/h
N.S:	6.50	m/sol
Date:	11/05/2013	

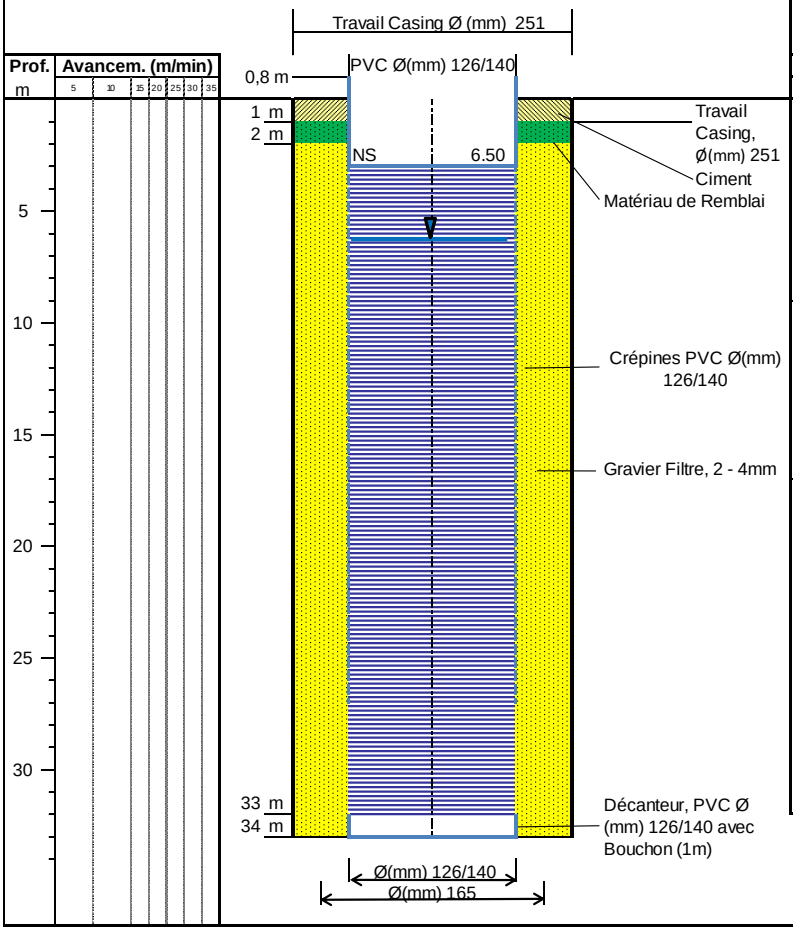
Essai de Pompage

Duréee:	4	h	N.D:	6.83 m/sol
Débit:	12	m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	6.37	m/sol	Date:	29/05/2013

Dates Forage:

Début:	11/05/2013	Fin:	11/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	rrivée d'ea	Profile	Description
0 - 9 m			Argile Lateritique
9-17 m			Altérites sablo argileux
17-33			Altérites argileuses

Projet	GRIBA	**FICHE DE FORAGE**	FORAGE No. **FD30-P1**
Client:	**IRD-PROJET GRIBA**	Localité : **EPP Sonoumon**	**Coordonnées (UTM)**
		Village : **Sonoumon**	X: 421240 N
Entreprise:	**FORAG SA**	Arrondissement: **Bori**	Y: 1079728 W
Foreur: SORHGO	Foreuse: **INGERSOL RAND**	Département/Commune: **Borgou /N'dali**	Z: - m

Forage

Prof. foréee	49.1	m
Equip. Prof.	49.1	m
Ø 9" 7/8	- 12	m
Ø 6" 1/2	- 38	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	12.0	m	PVC	140
Crépines	34.8	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	2.1	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h 10	
Débit:	9	m^3/h
N.S:	7.60	m/sol
Date:	01/05/2013	

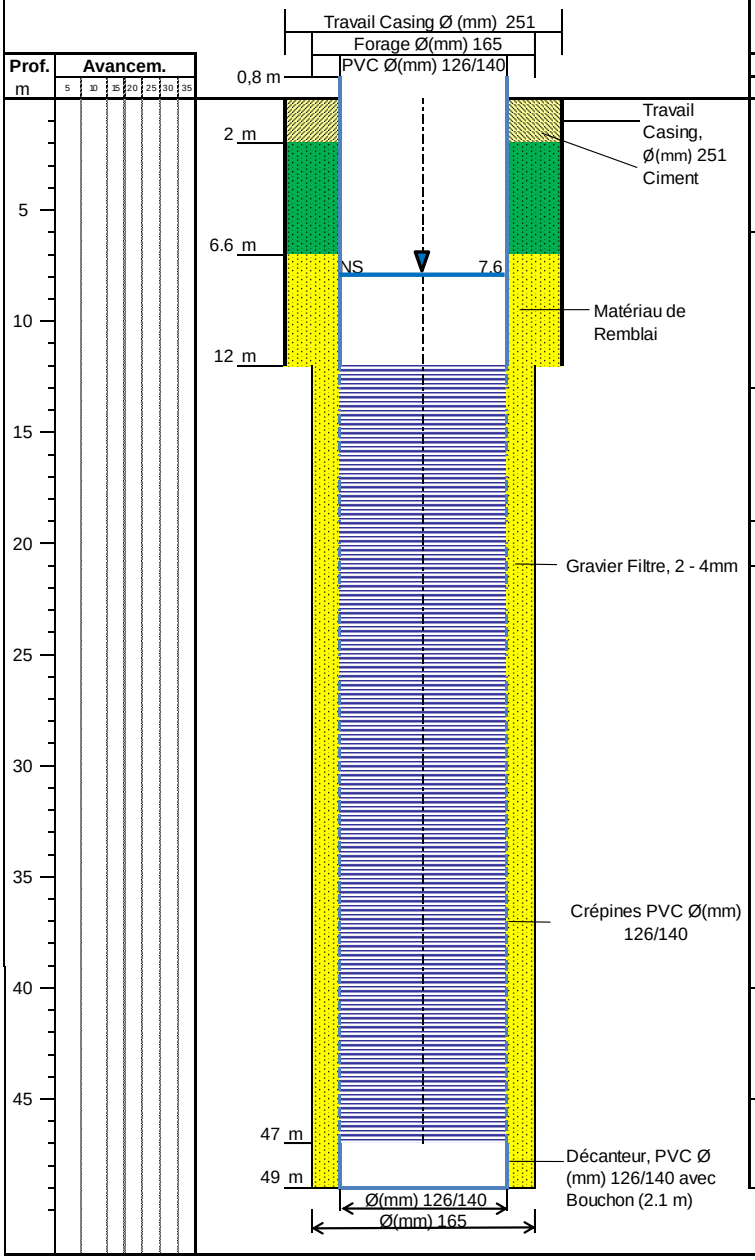
Essai de Pompage

Durée:	4 h	N.D:	16.98 m/sol
Débit:	7.2 m^3/h	Prof. Inst.:	35 m
N.S:	7.37 m/sol	Date:	10/06/2013

Dates Forage:

Début:	01/05/2013	Fin:	01/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Déscription
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 12 m			Altération argileuse de migmatite
12-19 m			Arène migmatitique
19-21 m			Gneiss migmatitique fracturée
21-40 m	23 / 9 m^3/h		Gneiss migmatitique sain
40-45 m	41 / 20 m^3/h		Gneiss migmatitique fracturée
45-49 m			Gneiss migmatitique sain

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	EPP Sonoumon
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Sonoumon
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Bori
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Borgou /N'dali

FORAGE No. FD30-P2

Coordonnées (UTM)

X:	421213	N
Y:	1079726	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	50.0	m
Equip. Prof.	50.0	m
Ø 9" 7/8	- 13	m
Ø 6" 1/2	- 37	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	12.8	m	PVC	140
Crépines	35.6	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	1.6	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h	
Débit:	0.96	m^3/h
N.S:	5.60	m/sol
Date:	14/05/2013	

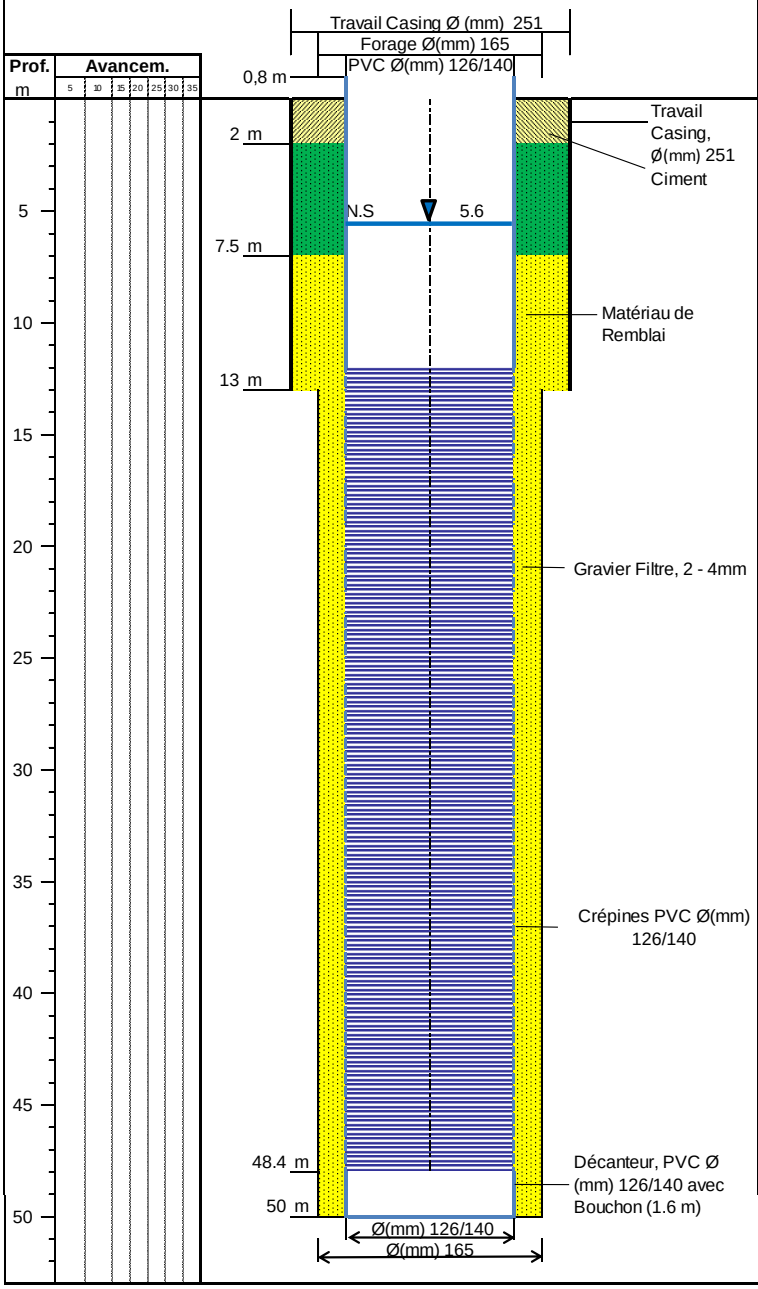
Essai de Pompage

Durée:	4 h	N.D:	5.42 m/sol.
Débit:	7.2 m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	5.45 m/sol	Date:	10/06/2013

Dates Forage:

Début:	14/05/2013	Fin:	14/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Déscription
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 13 m			Altération argileuse de migmatite
13-23 m			Arène migmatitique
23-30m			Gneiss migmatitique sain
30-33 m	30 / 0.18 m^3/h		Gneiss migmatitique fracturée
33-42 m			Gneiss migmatitique sain
42- 45 m			Gneiss migmatitique fracturée
45-49 m			Gneiss migmatitique sain

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	EPP Sonoumon
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Sonoumon
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Bori
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Borgou / N'dali

FORAGE No. FD30-P3

Coordonnées (UTM)

X:	421230	N
Y:	1079725	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	13.6 m		
Equip. Prof.	13.6 m		
Ø	9" 7/8	-	13.6 m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	4	m	PVC	140
Crépines	8.8	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	0.8	m	PVC	140

Développement

Durée:	1	h
Débit:	0.34	m^3/h
N.S:	4.50	m/sol
Date:	13/05/2013	

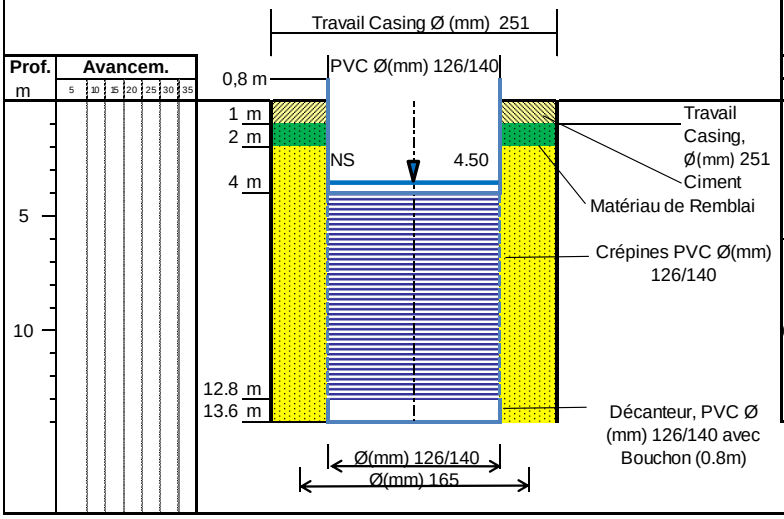
Essai de Pompage

Durée:	4 h	N.D:	6.92 m/sol
Débit:	7.2 m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	4.96 m/sol	Date:	10/06/2013

Dates Forage:

Début:	13/05/2013	Fin:	13/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	rrivée d'ea	Profile	Déscription
0 - 6 m			Argile Lateritique
6 - 13,6 m			Altération argileuse de migmatite

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Wassian'kparou
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Témé
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Bori
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Borgou / N'dali

FORAGE No. **FD17-P1**

Coordonnées (UTM)

X:	4440441	N
Y:	1089767	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee		67.3 m	
Equip. Prof.		67.3 m	
Ø	9" 7/8	- 19 m	
Ø	6" 1/2	- 48.1 m	

Equip.	Long.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	29.0	m	PVC	140
Crépines	42.8	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	3.6	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h 00	
Débit:	16.4	m^3/h
N.S:	7.25	m/sol
Date:	15/05/2013	

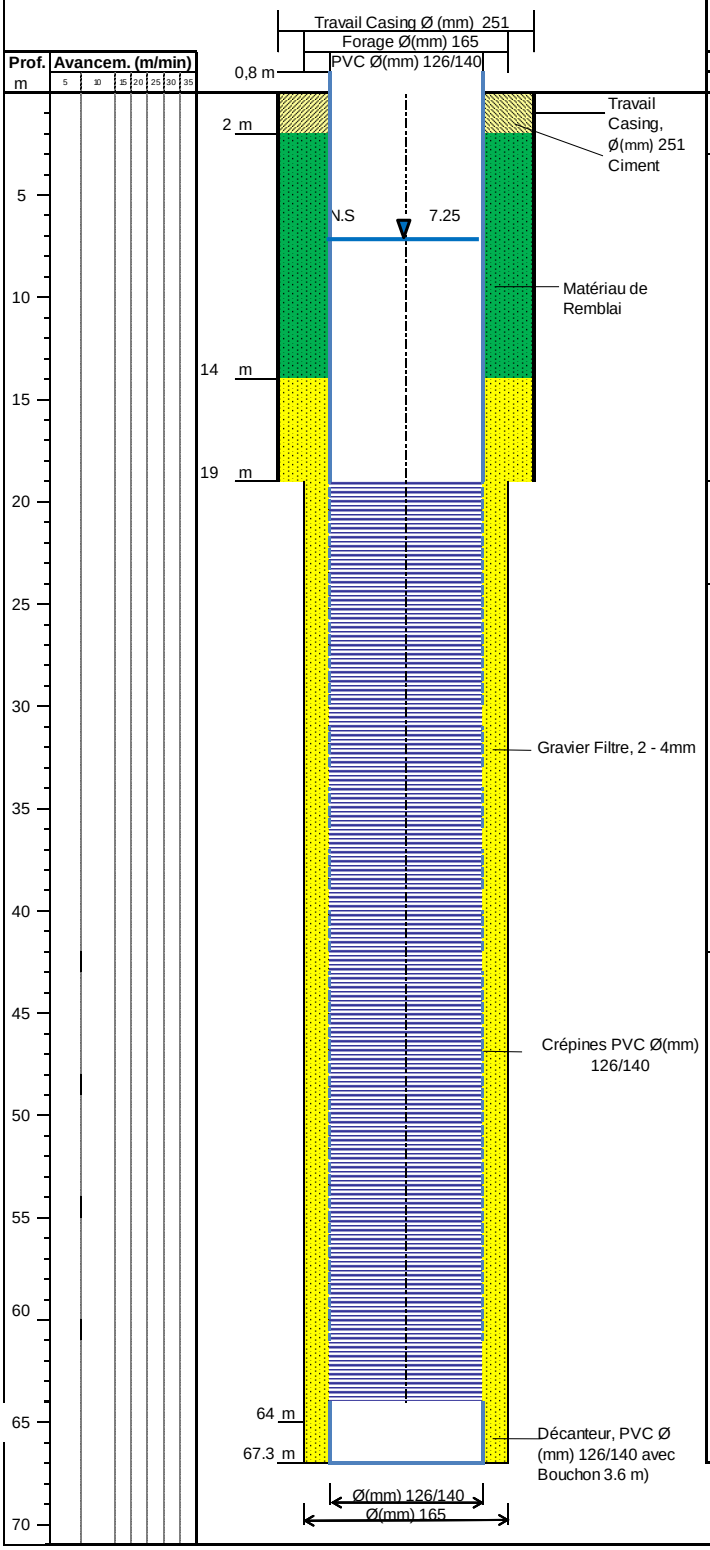
Essai de Pompage

Durée:	4 h	N.D:	8.28 m/sol
Débit:	9 m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	6.2 m/sol	Date:	15/06/113

Dates Forage:

Début:	15/05/2013	Fin:	15/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Déscription
0 - 3m			Argile latéritique
3- 19 m			Altération argileuse de micaschiste quartzeux à muscovite
19 - 24 m	22 0.45 m^3/h		Gneiss fracturé
24- 42 m			Gneiss sain
42-67m	46 1,54 m^3/h; 59m 30m^3/h; 62 22,5m^3/h		Gneiss fracturé

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Wassiakparou
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Témé
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Bori
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Borgou / N'dali

FORAGE No. **FD17-P2**

Coordonnées (UTM)

X:	440458	N
Y:	1089763	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	55.2 m		
Equip. Prof.	55.2 m		
Ø	9" 5/8	-	17 m
Ø	6" 1/2	-	39 m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	16.7	m	PVC	140
Crépines	32.9	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	5.6	m	PVC	140

Développement

Durée:	1h	
Débit:	3	m^3/h
N.S:	6.80	m/sol
Date:	02/05/2013	

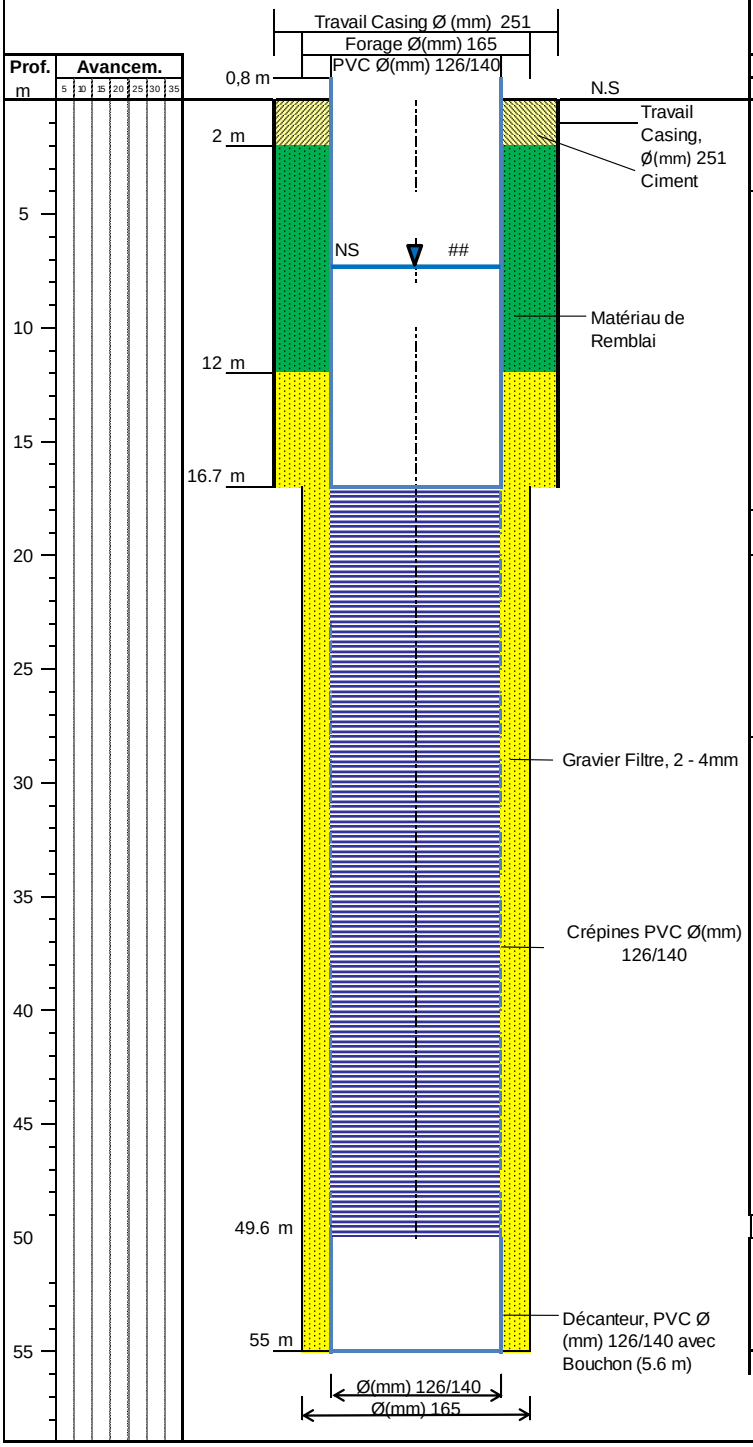
Essai de Pompage

Duréee:	4 h	N.D:	23.26 m/sol
Débit:	9 m^3/h	Prof. Inst.:	32 m
N.S:	6.12 m/sol	Date:	15/06/2013

Dates Forage:

Début:	02/05/2013	Fin:	02/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Description
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 18 m			Altération argileuse de micaschiste quartzeux à muscovite
18-20 m			micashiste sain
20 - 28 m	21 m, 2,7 m^3/h		micaschiste à deux micas argileux
28-48 m			Gneiss fracturé
48-49 m			Gneiss sain
49-55 m	54 m, 2,76 m^3/h		Gneiss fracturé

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Wassiakparou
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Témé
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Bori
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Borgou / N'dali

FORAGE No. **FD17-P3**

Coordonnées (UTM)

X:	440451	N
Y:	1089766	W
Z:		m

Forage

Prof. foréee	13.2 m		
Equip. Prof.	13.2 m		
Ø	9" 7/8	-	13.2 m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	4	m	PVC	140
Crépines	8.9	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	0.8	m	PVC	140

Développement

Durée:	1	h
Débit:	0	m^3/h
N.S:	7.60	m/sol
Date:	15/05/2013	

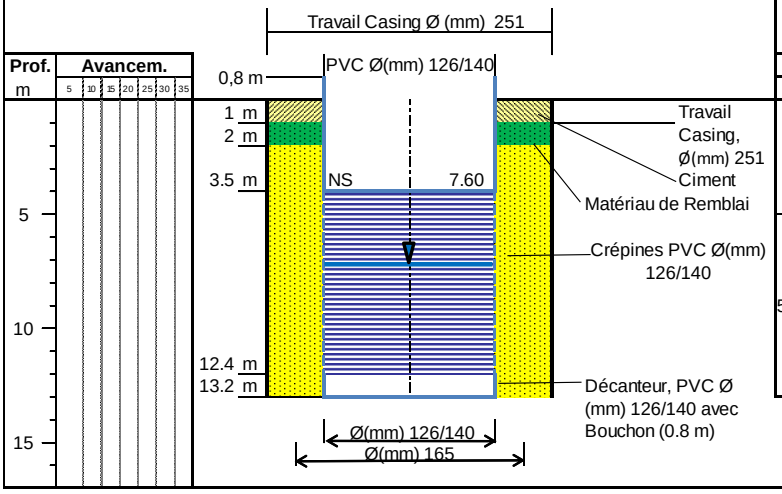
Essai de Pompage

Durée:	4 h	N.D:	7.08 m/sol
Débit:	9 m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	6.37 m/sol	Date:	15/06/2013

Dates Forage:

Début:	15/05/2013	Fin:	15/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	rrivée d'ea	Profile	Description
0 - 5 m			Argile Lateritique
5 - 13,2 m			Altération argileuse de Micaschiste quartzeux à muscovite

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Ganrou
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Ganrou
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Serekali
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Borgou / Nikki

FORAGE No. F117-P1

Coordonnées (UTM)

X:	507613	N
Y:	1107767	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee		55 m
Equip. Prof.		55 m
Ø	9" 5/8 -	20 m
Ø	6" 1/2 -	35 m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	19.6	m	PVC	140
Crépines	32	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	3.4	m	PVC	140

Développement

Durée:	2 h 00	
Débit:	4.5	m^3/h
N.S:	11.50	m/sol
Date:	04/05/2013	

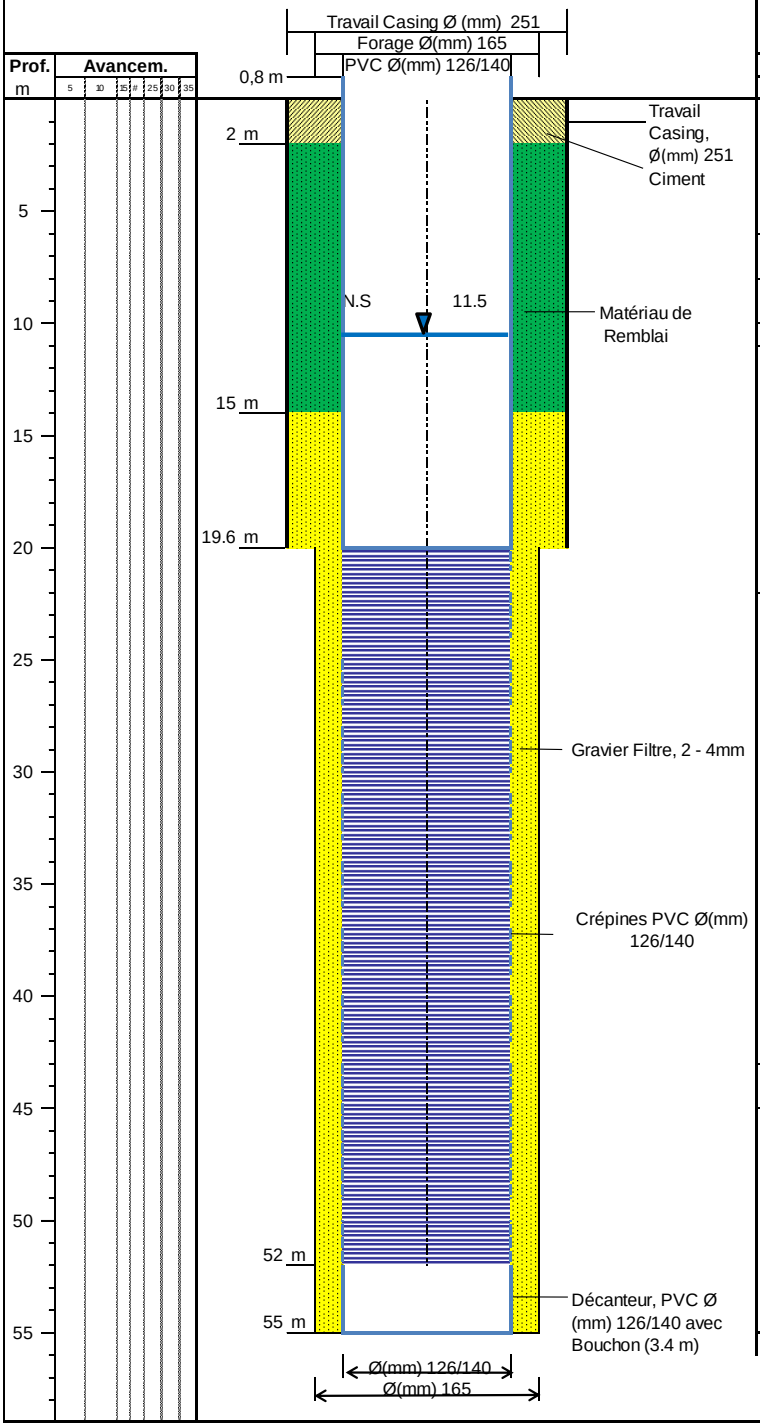
Essai de Pompage

Durée:	4 h	N.D:	27.46 m/sol
Débit:	1.7 m^3/h	Prof. Inst.:	35 m
N.S:	7.32 m/sol	Date:	21/06/2013

Dates Forage:

Début:	04/05/2013	Fin:	04/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Déscription
0 - 6 m			Argile latéritique
6 - 8 m			Argile rougeâtre
8-10 m			Argile jaunâtre
10-11 m			Argile grisâtre
11-22 m			Altération sableuse de granite
22 - 42 m	28 m 0.4 m^3/h; 32 m 0.6 m^3/h		Granite sain
42-45 m			Granite fracturé
45-55 m	53m 1 m^3/h		Granite sain

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Ganrou
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Ganrou
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Serekali
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Borgou / Nikki

FORAGE No. **F117-P2**

Coordonnées (UTM)

X:	507633	N
Y:	1107751	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	59.2	m
Equip. Prof.	53.47	m
Ø 9" 5/8	- 24	m
Ø 6" 1/2	- 35.4	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC Plein	19.1	m	PVC	140
Crépines	31.84	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	2.58	m	PVC	140

Développement

Durée:	1 h 20	
Débit:	4.5	m^3/h
N.S:	6.04	m/sol
Date:	05/05/2013	

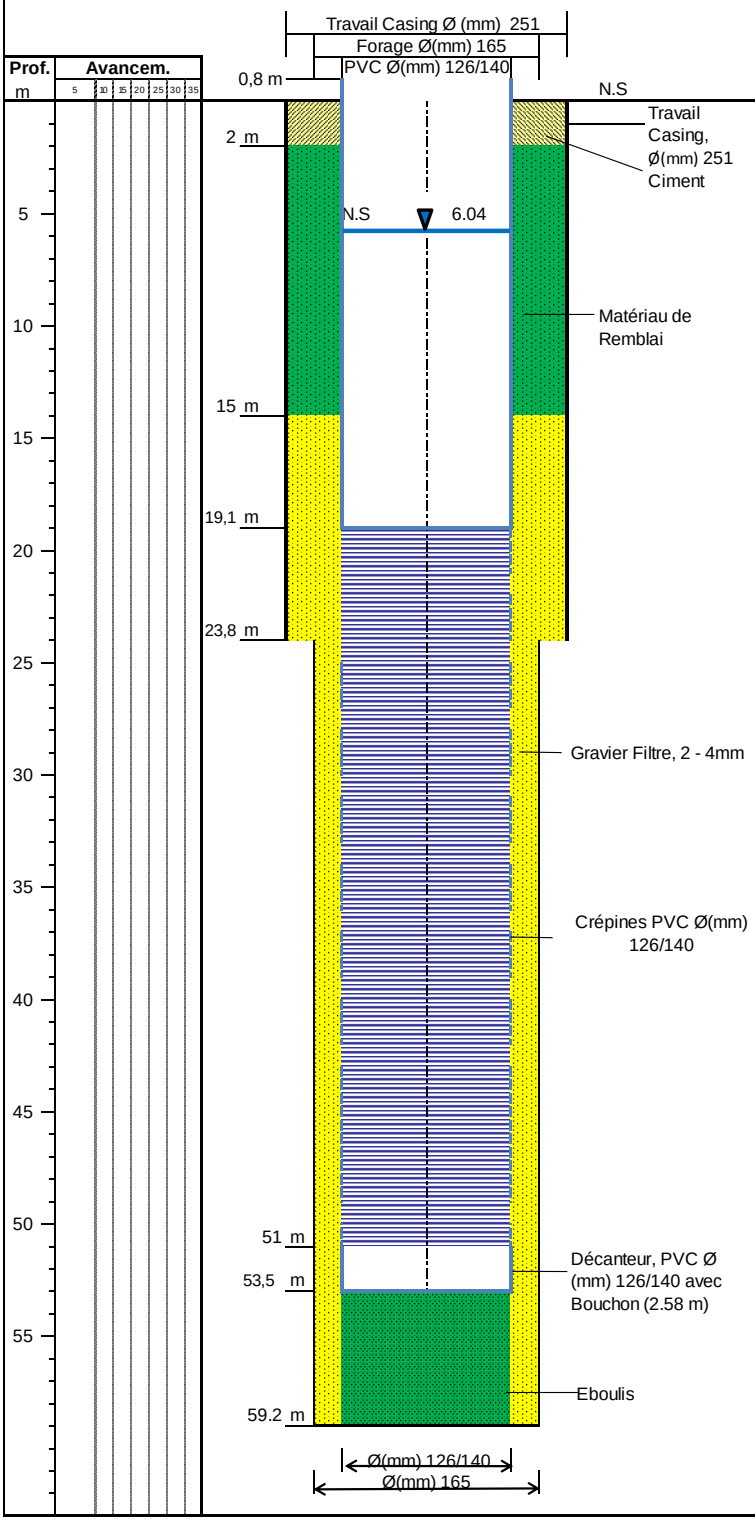
Essai de Pompage

Durée:	4 h	N.D:	4.57 m/sol
Débit:	1.7 m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	4.48 m/sol	Date:	21/06/2013

Dates Forage:

Début:	05/05/2013	Fin:	05/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	Arrivée d'eau	Profile	Déscription
0 - 5 m			Argile latéritique
5 - 6m			Altération argilo sableuse de
6 - 24 m			Altération sableuse de granite
24 - 28 m	24 / 1.09 m^3/h		Arène granitique
28-43 m	41 / 2,5 m^3/h		Granite sain
43-48 m	47 / 2,76 m^3/h		Granite fracturé
48-56 m			Granite sain
56-59,2m	57 / 3,6 m^3/h		Granite fracturé

FICHE DE FORAGE

Projet	GRIBA	Localité :	Ganrou
Client:	IRD-PROJET GRIBA	Village :	Ganrou
Entreprise:	FORAG SA	Arrondissement:	Serekali
Foreur: SORHGO	Foreuse: INGERSOL RAND	Département/Commune:	Borgou / Nikki

FORAGE No. F117-P3

Coordonnées (UTM)

X:	507623	N
Y:	1107756	W
Z:	-	m

Forage

Prof. foréee	24.4	m
Equip. Prof.	24.4	m
Ø 9" 7/8	24.4	m

Equip.	Prof.		Mat.	Ø (mm)
Hors sol	0.8	m	PVC	140
PVC P	5.0	m	PVC	140
Crépines	17.4	m	PVC	140
Ouverture	1.0	mm		
Décanteur	2.0	m	PVC	140

Développement

Durée:	1	h
Débit:	0.375	m^3/h
N.S:	6.78	m/sol
Date:	04/05/2013	

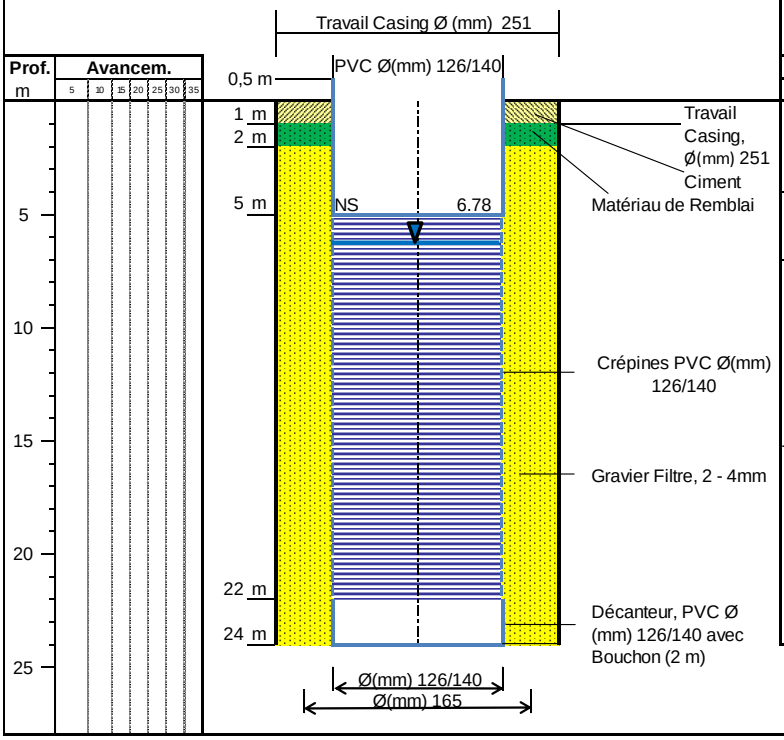
Essai de Pompage

Durée:	4	h	N.D:	2.1 m/sol
Débit:	1.7	m^3/h	Prof. Inst.:	- m
N.S:	2.05	m/sol	Date:	21/06/2013

Dates Forage:

Début:	04/05/2013	Fin:	04/05/2013

Equipment



Remarque

LITHOLOGIE

De à,m	rrivée d'ea	Profile	Déscription
0 - 4 m			Argile Lateritique
4-7m			Altération argilo sableuse de Micaschiste
7 - 24,4 m			Altération sableuse de granite