

Caractérisation des aquifères de socle par la résistivité électrique. Pratique de l'implantation des forages et perspectives d'amélioration au Bénin

Basement rock aquifers characterization using electrical resistivity. Current uses of borehole implementation and improvement perspectives in Benin

Allé, C.⁽¹⁾; Descloitres, M.⁽²⁾; Vouillamoz, J.M.⁽²⁾; Yalo, N.⁽¹⁾; Lawson, F.M.A.⁽¹⁾; Adihou, C.⁽¹⁾

(1) Université d'Abomey-Calavi/Institut National de l'Eau, christian.alle@ird.fr, yalonicaise@yahoo.fr, messan.lawson@ird.fr, aaconsolas@gmail.fr

(2) IRD/UJF-Grenoble-1/CNRS/G-INP – UMR LTHE, marc.descloitres@ird.fr, jean-michel.vouillamoz@ird.fr

I. INTRODUCTION

La source principale d'approvisionnement en eau potable en Afrique est l'eau souterraine. Les roches de socle (métamorphiques et plutoniques) constituent plus de 40% de la superficie du continent et couvrent 80% du Bénin. L'implantation des forages est très souvent réalisée par prospection géophysique afin d'augmenter les chances de succès. Mais plus de 40% des forages réalisés produisent des débits nuls ou inférieurs aux 700 l/h nécessaires pour que le forage soit utilisé (Vouillamoz et al., 2014). Cela induit des pertes financières considérables et un ralentissement important de l'évolution du taux d'approvisionnement en eau potable (Vouillamoz et al., ce volume). Pour l'hydrogéologue, ce sont les zones d'altération (ZA) et « fissurées-altérées » (ZFA) épaisses qui sont recherchées, respectivement pour leurs propriétés de stock et de conduite du flux. Plus profondément, au sein du socle sain (S), les zones comportant des systèmes de fracture (ZSF) sont aussi recherchées (Dewandel et al., 2011). Pour le géophysicien, il s'agit donc de repérer, depuis la surface, la nature et les épaisseurs de ZA et ZFA, et tenter de détecter les ZSF.

Au Bénin, et en Afrique de l'Ouest, la pratique de prospection géophysique la plus répandue en zone de socle est basée sur la méthode de résistivité électrique. La pratique consiste à réaliser un (ou plus rarement des) trainé(s) de résistivité apparente d'une seule longueur de ligne perpendiculairement à la direction majeure de linéaments observés préalablement en photo-interprétation. La présence, au long du trainé, de déflexions plus conductrices est interprétée par les praticiens comme étant la marque de la présence de « fractures » produisant un épaississement de la ZA et de la ZFA, et/ou la marque d'une zone de fractures profondes (ZSF). Ensuite, pour tenter de quantifier les épaisseurs de terrain en présence, on positionne un (ou des) sondage(s) électrique(s) au droit des déflexions détectées par trainé. Selon les résultats obtenus le prospecteur implante alors par ordre prioritaire les points de forage. Cette pratique de l'implantation peut-elle être un des facteurs qui expliquerait les taux d'échec important au Bénin ?

Pour répondre à cette question nous explorons les limitations des trainés et sondages électriques 1D dans cet environnement de socle où le sous-sol est majoritairement 2D (voire 3D). Dans un premier temps, nous vérifions si la résistivité électrique est un bon paramètre géophysique pour discriminer les ZA, ZFA, S et ZSF en utilisant des données de diagraphies obtenues sur six sites expérimentaux du projet GRIBA (<http://projet-griba.com/>). Ensuite nous présentons des modélisations synthétiques, basées sur des géométries simplifiées typiques permettant de dégager (i) les limites des trainés et sondages électriques et (ii) les avantages et les limites de la méthode électrique 2D (tomographie de résistivité électrique, Electrical Resistivity Tomography – ERT) pour l'implantation des forages. Enfin, un exemple d'interprétation géologique est construit à partir des images ERT sur un des sites expérimentaux.

II. MATERIEL ET METHODE

II. 1 Modélisation synthétique

II. 1-1 Résistivités et épaisseurs des compartiments des modèles synthétiques

Pour les résistivités, nous avons tout d'abord cherché à vérifier si la résistivité est un paramètre capable de discriminer les différents compartiments ZA/ZFA/S/ZFS. Nous avons établi des gammes de résistivité en comparant résultats de forages et diagraphies électriques (figure 1) sur 6 sites du projet GRIBA (Vouillamoz et al., ce volume). Le passage entre ZA et ZFA (marqué par le passage du rotary au marteau fond de trou, figure 1), nous a permis de déterminer des gammes de valeur de résistivité de la ZA et ZFA (figure 2).

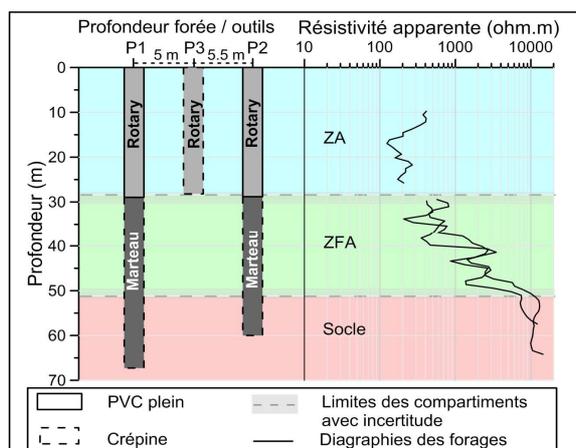


Figure 1 - Diagraphies et profondeurs forées par outils (exemple du site F68).

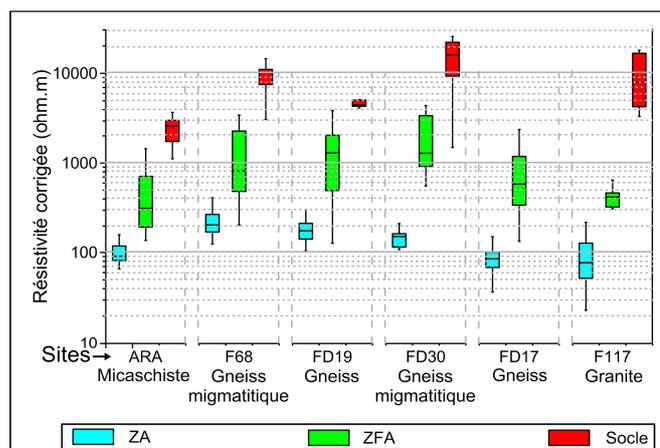


Figure 2 - Gammes de résistivités par compartiment et par sites (socle non atteint à FD17).

Le socle sain, est marqué par une relative stabilisation de la valeur de la résistivité électrique dans les valeurs hautes (parfois entrecoupée de chute de résistivité au droit des systèmes de fracture, marqués en général par des résistivités de l'ordre de 1000 ohm.m). La moyenne des médianes de chaque gamme est de 150 ohm.m, 800 et 8000 ohm.m respectivement pour la ZA, la ZFA et le socle. On note des recouvrements de valeur entre ZA et ZFA (par exemple entre les schistes et les gneiss sur les sites ARA et F68), ce qui engage à réaliser ce genre de caractérisation pour chaque formation géologique. La conclusion importante est néanmoins que la résistivité est capable de discriminer les différents compartiments intéressants l'hydrogéologue.

Les épaisseurs ont été déduites d'une analyse statistique réalisée sur 2122 forages positifs qui nous donne la fréquence des épaisseurs des compartiments de ZA et ZFA (Vouillamoz et al., ce volume). Nous avons déduit un rapport ZA/ZFA de 0,6. Nous avons ensuite considéré quatre géométries permettant de représenter un approfondissement du toit du socle progressivement de 10, 32, 48 et 64 m représentant respectivement la fréquence cumulée de la profondeur du toit du socle de 10% à 75 % sur l'ensemble des forages. Nous avons ainsi 4 géométries 1D de base A, B, C et D (tableau 2) qui sont rendus plus complexes par l'ajout de structures ayant des géométries 2D simplifiées. Enfin, nous avons ajouté un compartiment de surface souvent présent, le sol sec et/ou la cuirasse (représentés par un terrain de 2 m d'épaisseur à 1000 ohm.m) afin de rendre plus réalistes nos modèles.

Géométries de base	Epaisseurs ZA	Epaisseurs ZFA	Toit du socle	Fréquences cumulées	Rapport ZA/ZFA
A	4 m	6 m	10 m	10%	0,6
B	12 m	20 m	32 m	25%	
C	18 m	30 m	48 m	50%	
D	24 m	40 m	64 m	75%	

Tableau 2 - Géométries de base (source : 2122 forages de la Direction Générale de l'Eau).

II. 1-2 Ajout de structures 2D plus complexes sur les géométries 1D de base

Nous avons imaginé 4 catégories de structure inspirées des réalités rencontrées sur le terrain, mais simplifiées (figure 3). La catégorie de structure 1 est un cas idéalisé (et rare en Afrique de l'Ouest) de système de fracture au droit duquel l'altération ne se serait pas développé. La catégorie de structure 2 illustre un approfondissement localisé de la ZA et de la ZFA engendré par une altération préférentielle autour du système de fracture. La catégorie de structure 3 modélise de possibles variations latérales de nature au sein de la ZA, la rendant plus argileuse (et donc plus conductrice). La catégorie de structure 4 représente des petites structures superficielles conductrices en contact avec les électrodes pour en évaluer l'effet sur les trainés. En tout, 96 modèles ont ainsi été générés.

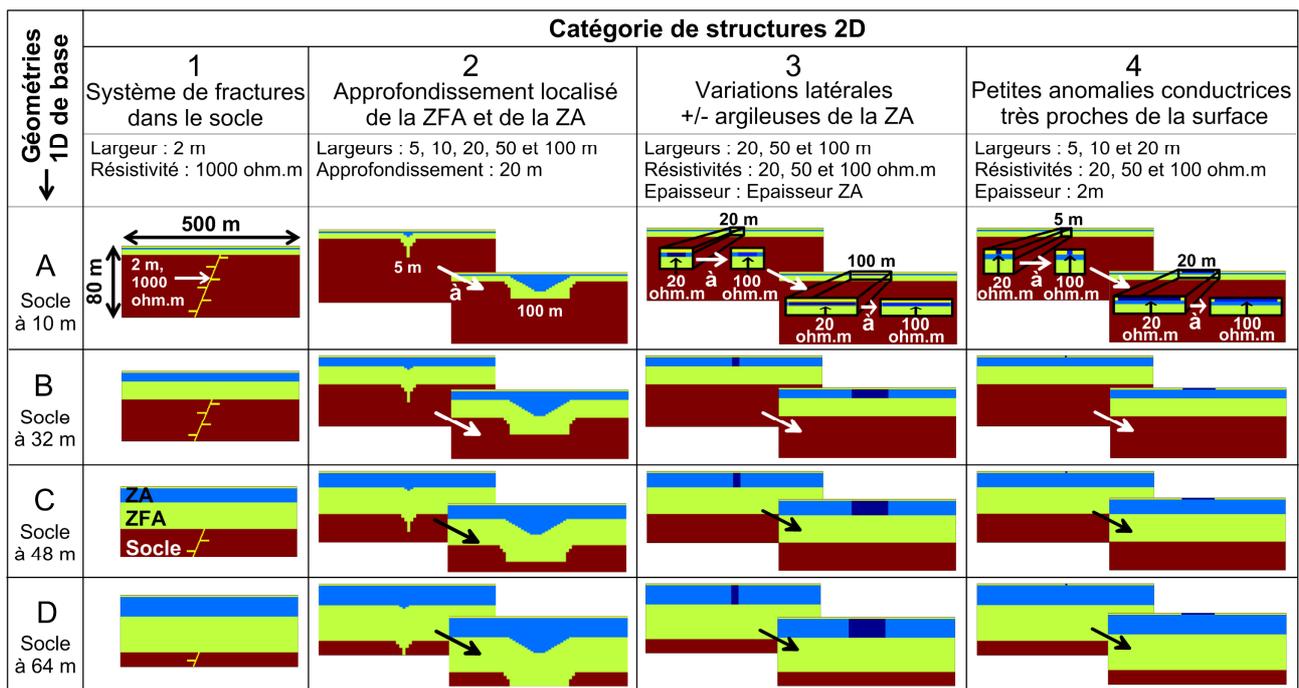


Figure 3 - Présentation des modèles synthétiques utilisés.

II. 2 Production des données synthétiques et mesures de terrain

Les 96 modèles ont été utilisés pour générer des données 2D de résistivités apparentes (panneaux électriques) avec les différents dispositifs qui sont classiquement utilisés par les prospecteurs (Schlumberger et Wenner). Les données synthétiques sont rendues « réalistes » par l'ajout d'un bruit gaussien de 1%. Nous extrayons ensuite du jeu de données 2D des trainés électriques Schlumberger (avec $AB/2 = 100$ m) et Wenner (avec $AB/3 = 50$ m) souvent utilisés au Bénin ainsi que des sondages électriques 1D (Schlumberger). Les données 2D sont aussi utilisées dans leur totalité (panneau) pour réaliser des inversions 2D, en y ajoutant des données Dipole-Dipole destinées à mieux contraindre les inversions (Descloitres et al., 2008). Enfin un jeu de donnée Pole-Dipôle a aussi été calculé pour traiter les cas où le socle sain est profond. Nous avons utilisé 96 électrodes espacées de 5 m. Le traitement des données a été fait avec le logiciel DC2D (Günther et Rücker, 2006) et les paramètres d'inversion standards (algorithme d'inversion : méthode Gauss-Newton, facteur d'anisotropie désactivé, régularisation moyenne de 30). Les sondages 1D sont interprétés avec le logiciel IX1D (Interpex Ltd). Sur le terrain, les sections de résistivité ont été réalisées sur tous les sites avec un résistivimètre Syscal Pro (IRIS Instrument). Nous nous sommes conformés à un protocole d'acquisition et des paramètres d'inversion identiques à ceux simulés.

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

III. 1 Détectabilité des structures avec les trainés

La zone d'intérêt sur un trainé électrique est généralement définie par l'interpréteur par des critères de forme : de façon systématique, c'est une déflexion (chute) dans les valeurs de la résistivité apparente qui est choisie comme zone intéressante pour (i) y réaliser un sondage électrique, (ii) placer un point de forage. En choisissant cette zone, le praticien suppose implicitement être en présence d'une structure intéressante. Il n'existe pas de critère quantitatif établi dans la pratique au Bénin, même si des études antérieures d'ingénierie dans la sous-région tentent de dégager des règles moins subjectives. Au Bénin, la valeur intrinsèque de la résistivité apparente ne sert généralement pas de critère : les praticiens considèrent les anomalies comme dignes d'intérêt lorsque la déflexion montre un rapport de résistivité apparente de 1.5 entre les valeurs qui encadrent la déflexion et sa valeur minimale. Cette constatation permet de construire des graphes de détectabilité basés sur le contraste de 1.5, présentés sur la figure 4. Certaines formes d'anomalie ne satisfaisant pas ce critère peuvent toutefois être choisies sur des critères de forme lorsque le sous-sol est complexe. Ces cas ne sont pas présentés ici car ils réclameraient, pour leur analyse, des modélisations de sous-sol plus complexes que ceux explorés dans cette étude.

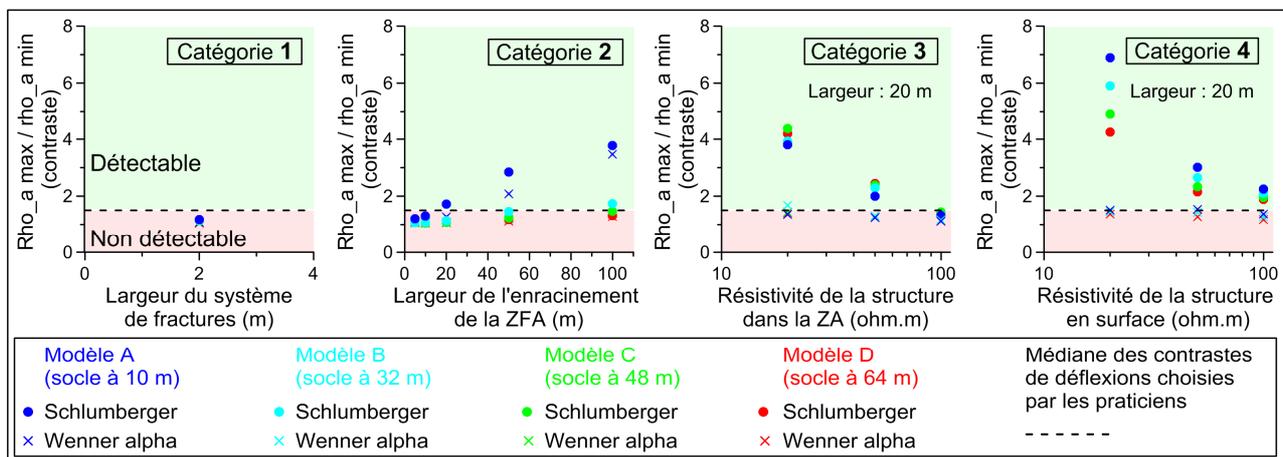


Figure 4 – Détectabilité des différentes catégories de structures.

Les trainés extraits des modélisations (qu'ils soient Schlumberger ou Wenner), montrent la plupart du temps une déflexion digne d'intérêt. Ils montrent aussi des cas pour lesquels des structures ne sont pas détectables. Pour la catégorie de structure 1, les systèmes de fractures isolées sans altération associée ne sont pas détectables quelle que soit la profondeur, y compris lorsqu'ils sont relativement superficiels (socle à 10 m). Pour la catégorie de structure 2, les élargissements de l'approfondissement de la ZFA pour un socle situé à 10 m de profondeur sont indétectables s'ils sont inférieurs à 20 m de large. Lorsque le socle est situé à plus de 35 m de profondeur les élargissements de 20, 50 et 100 m de large sont aussi indétectables. La déflexion induite reste négligeable et peut conduire à l'ignorer sur le trainé. Ce résultat est d'une portée pratique importante : de larges zones altérées-fissurées profondes peuvent être quasiment indétectables en trainé, alors qu'elles seraient des zones intéressantes pour les forages. Pour la catégorie de structure 3 (variations latérales de la nature de la ZA), les zones de la ZA où le contraste de résistivité est inférieur ou égal à 3 ne sont pas perceptibles.

Notre modélisation montre aussi que plusieurs cas particuliers peuvent conduire à des implantations erronées. Dans le cas des structures superficielles conductrices (catégories 3 et 4, qui n'intéressent pas l'hydrogéologue), elles peuvent être prises pour intéressantes lorsque le trainé est de type Schlumberger. Pour le trainé Wenner, les anomalies produites sont de forme plus complexe et d'amplitude plus faible. Le Schlumberger peut s'avérer ainsi un dispositif sensible à la proche surface, et induire en erreur le praticien. Ces résultats tendent à désigner les variations de nature de terrain dans la proche surface et dans la ZA (si elle devient conductrice donc argileuse) comme étant les premières causes de déflexions notables des

courbes de trainés et peuvent donc conduire à des implantations non intéressantes. Les trainés peuvent aussi se révéler similaires pour des catégories différentes. Il s'agit ici d'une forme d'équivalence bien connue des géophysiciens mais souvent négligée par les praticiens : des structures différentes du sous-sol peuvent conduire à des trainés de formes très similaires (figure 5 du paragraphe suivant). Cette incapacité des trainés à distinguer des structures très différentes dans le sous-sol, certaines intéressantes, d'autres stériles pour l'hydrogéologue, conduit à s'interroger dans cette étude sur les capacités des sondages électriques et des tomographies de résistivité comme moyens discriminants.

III. 2 Exemples d'équivalence en trainé et limites des sondages électriques

Un exemple d'équivalence obtenu en trainé avec trois modèles différents issus de nos modélisations est présenté sur la figure 5. Les trois structures de sous-sol sont très différentes les unes des autres (figure 5-A). Mais à la seule vue des formes de trainé (figure 5-B), l'hydrogéologue souhaitera connaître l'épaisseur de la ZA et de la ZFA (déterminante pour débit du forage, cf Vouillamoz et al., ce volume) en s'aidant d'un sondage électrique, voire directement implanter un forage sans interpréter le sondage (cas souvent rencontré au Bénin). Les sondages électriques réalisés au droit de la déflexion des trainés peuvent-ils être discriminants et utiles ?

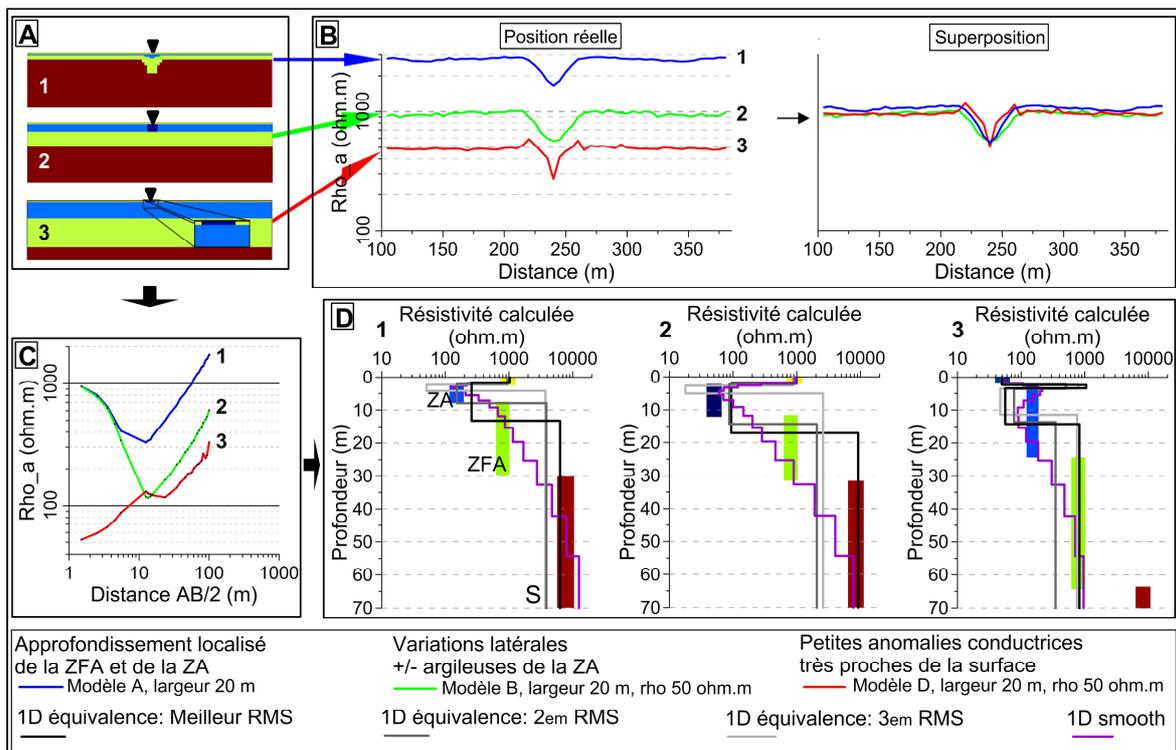


Figure 5 - Exemple d'équivalences obtenues en trainé pour trois structures différentes : A) Modèles synthétiques, B) Trainés équivalents, C) Courbes de sondage, D) Résultats d'inversion 1D des courbes de sondage.

Les sondages électriques Schlumberger (extraits ici parallèlement à la ligne d'électrodes, comme le font les praticiens en général au Bénin, mais qui pourrait introduire un léger biais dans l'analyse) présentent des formes de courbe très différentes (figure 5-C). L'interprétation de ces sondages se fait avec un modèle tabulaire (1D), interprétation qui est soumise à des règles d'équivalence. En zone de socle le sous-sol est structuré, de la surface vers la profondeur, par une succession de 4 terrains : résistant (sol) > conducteur (ZA) > un peu moins conducteur (ZFA) et enfin résistant (S). Lors de l'interprétation, sauf cas particuliers, la ZA et ZFA sont confondues en un seul et même terrain conducteur. Le modèle résultant est donc de 3 terrains seulement, pour lequel s'applique la règle d'équivalence basée sur le calcul de la conductance longitudinale (Kunetz et Rocroi, 1970). Pour une même conductance longitudinale du terrain (ZA+ZFA), la

courbe de sondage sera la même. Pour chaque sondage nous avons calculé trois modèles équivalents (RMS restant entre 3 et 5%). Nous avons aussi conduit une inversion des courbes de sondage avec une logique « 15 terrains » permettant des variations progressives de résistivité avec la profondeur, interprétation qui n'est jamais considérée en routine par les bureaux d'étude. Les résultats, synthétisés (figure 5-D), sont les suivants :

(i) Pour le premier modèle (ZFA élargie de 20 m s'enracinant dans le socle dont le toit est à 10 m de profondeur), les modèles électriques équivalents 1D montrent un terrain (ZA+ZFA) de 2, 6 et 12 m d'épaisseurs et de résistivités respectives 40, 120 et 250 ohm.m. Selon la résistivité choisie, l'épaisseur de (ZA+ZFA) peut être sous-estimée. La faible épaisseur calculée (12m) de ZA+ZFA ne fait pas de ce site un site favorable pour un forage. Mais surtout, l'interprétation ne permet pas de déterminer la présence de l'élargissement central, qui permet d'avoir localement une ZA+ZFA de 30 m, ce qui est pourtant intéressant pour l'hydrogéologue. Le modèle « 15 terrains » montre une augmentation progressive de 1000 à 12000 ohm de la résistivité du socle, entre 10 à 50 mètres, information peu exploitable pour l'hydrogéologue.

(ii) Pour le second modèle (ZFA de 35m) et variation latérale de nature de la ZA avec apparition d'une zone plus argileuse-50 ohm.m), les modèles 1D obtenus montrent tous une sous-estimation de l'épaisseur de la ZA+ZFA : selon les résistivités choisies, elle varie de 4 à 18 m au lieu des 35 mètres attendus. L'interpréteur n'a pas d'indication pour fixer une résistivité plutôt qu'une autre en l'absence d'information extérieure. Le modèle « 15 terrains » montre l'ensemble (ZA+ ZFA) de 25-30m plus réaliste.

(iii) Pour le troisième modèle (anomalies conductrices très superficielles et socle profond à 65 m) les modèles 1D obtenus sous-estiment l'épaisseur de la ZA. En revanche, la résistivité de la ZFA (800 ohm.m) est bien déterminée. Le socle n'est pas repéré. Le modèle « 15 terrains » reproduit mieux l'épaisseur de la ZA.

Cette analyse permet de conclure que les sondages électriques ont un intérêt très limité pour discriminer de façon acceptable des géométries 2D pourtant très différentes, certaines pouvant être intéressantes. De plus, même si l'on accepte la simplification excessive de tabularité dans ce contexte très souvent 2D, la règle de l'équivalence peut conduire, en l'absence d'information sur les valeurs de résistivités en présence (ce qui est le cas en routine), à sous-estimer parfois d'un facteur de plus de 3 les épaisseurs de l'ensemble (ZA+ZFA), ce qui peut conduire à hésiter pour implanter. Les techniques d'inversion 1D « 15 terrains » permettent d'obtenir une alternative d'interprétation qui peut paraître séduisante mais qui reste difficilement exploitable, car le praticien ne saura pas, in fine, quel scénario choisir.

III. 3 Résolution de la tomographie de résistivité

Les panneaux de résistivité apparente issus des trois modèles présentant des équivalences en trainés de la figure 5-B ont été inversés. Les résultats sont présentés sur la figure 6. Les structures 2D sont bien repérées par l'inversion ERT. En particulier, pour le premier modèle, l'élargissement d'une zone plus profonde de ZFA est bien représenté, même si sa largeur est légèrement exagérée par le calcul. Avec cette image, le praticien peut très bien décider de forer, contrairement à sa décision précédente prise à la seule analyse des résultats de sondage 1D. La structure 2 peut être considérée sans ambiguïté par l'hydrogéologue comme non-intéressante car trop argileuse, et la structure 3 comme superficielle mais ne marquant pas de système de faille altéré, considérant alors les seules épaisseurs de ZA et ZFA comme potentiellement intéressantes. L'inversion produit un effet d'adoucissement des contrastes de résistivité similaire à celui déjà décrit pour le sondage 1D « 15 terrains » : les ZA et ZFA ne sont pas séparées comme 2 ensembles distincts de résistivité homogène. Si l'on décide de tracer les toits ZA-ZFA et ZFA-Socle comme étant les isocontours 150 et 800 ohm.m définis précédemment par diagraphie, nous constatons que les épaisseurs de ZA et ZFA sont restituées avec une légère sous-estimation de seulement 10-15%. Lorsque la limite ZFA – Socle est très profonde (> 50m), les dispositifs Wa et Dipole-Dipole combinés ne permettent pas de la préciser (résultat conforme avec les limites de pénétration connues de ces dispositifs). Des dispositifs plus pénétrants tels que le Pole-Dipole (PdP) le permettent, comme le montre la figure 6-C.

En résumé, les images ERT permettent dans tous les cas (i) de discriminer les structures et (ii) de mieux préciser les épaisseurs de l'ensemble (ZA+ZFA). Le passage de la ZA à la ZFA apparaît comme un continuum.

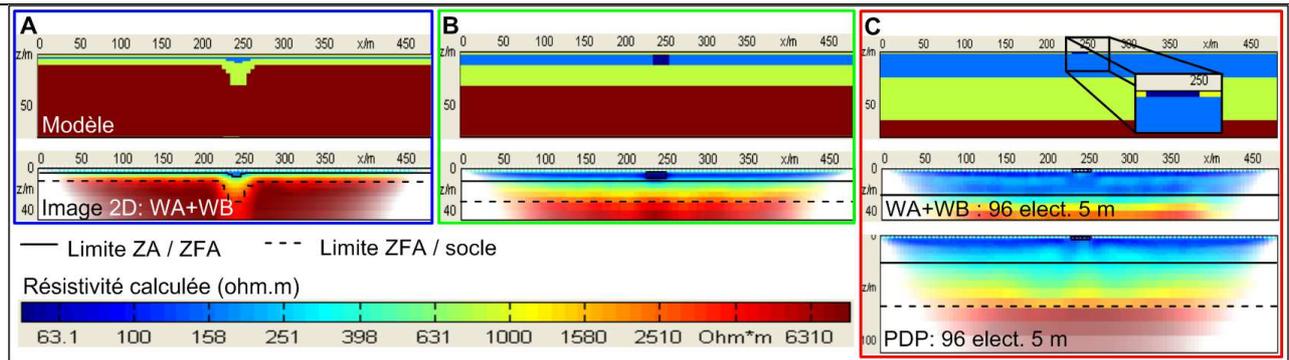


Figure 6 – Résultats des inversions 2D des trois modèles équivalents présentés.

Nous avons constaté que l'ensemble des modèles étaient généralement correctement résolus par une imagerie ERT, repoussant ainsi les limitations constatées en trainés, mais que l'ERT présente aussi des limites dans les cas extrêmes suivants :

- L'ERT ne peut pas détecter un système de fractures isolées sans altération associée (cas très peu probable en Afrique), et ce, lorsqu'il est enfoui sous plus de 10 m de ZA et de ZFA.
- L'ERT, conformément aux limites connues de la méthode électrique, ne peut pas distinguer de façon nette la limite entre ZA et ZFA, qui de toute façon peut être progressive dans un cas réel.
- Avec un socle à 30 m et plus, un approfondissement localisé de la ZFA devient quasiment indétectable avec les dispositifs classiques Wa et Dipole-Dipole quel que soit sa largeur alors qu'il reste une cible privilégiée pour implanter un forage. Le PdP permet d'améliorer l'efficacité de détection de ce type de structure: elles sont toutes détectables si elles font au moins 20 m de large.
- La méthode ERT est en théorie aussi soumise aux lois de l'équivalence de la conductance longitudinale. En pratique, la procédure d'inversion pourrait donner des résultats différents lorsque la résistivité du modèle homogène de départ est différente de celle proposée par le logiciel et/ou lorsqu'on utilise des paramètres d'inversion différents. Des études sur l'influence du modèle de départ seront nécessaires pour explorer les équivalences possibles en ERT.

III. 4 Exemple d'une interprétation géologique sur un des sites tests

A titre d'exemple, nous présentons sur la figure 7 une interprétation géologique construite à partir d'un panneau de de résistivité 2D sur le site F68 du projet. Comparée à la lithologie des 3 forages, l'interprétation représente bien les différents compartiments. En revanche, les fractures identifiées par le foreur et observées en diagraphie à la base de la ZFA (figure 2) ne sont pas visibles sur l'image ERT.

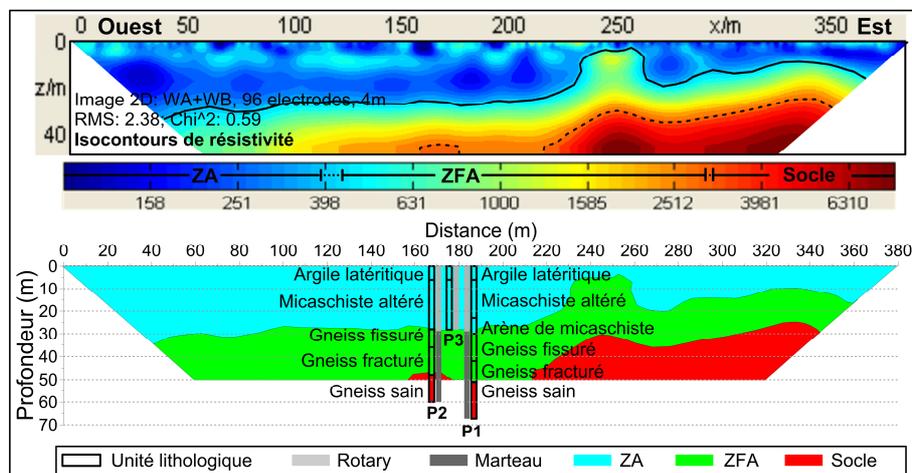


Figure 7 – Interprétation géologique de tomographie 2D comparée avec la lithologie (site F68).

Ce résultat illustre que les fractures dans la ZFA et à fortiori dans le socle ne sont pas identifiables par l'ERT, en conformité avec les résultats de nos modélisations synthétiques.

IV. CONCLUSION

La pratique de prospection 1D (trainé + sondage électrique 1D) peut conduire à tomber dans des pièges issues des équivalences ou créés par des structures conductrices argileuses dans la ZA ou proches de la surface car elles engendrent les déflexions en trainé, et peuvent conduire à des implantations erronées. Les structures intéressantes comme un approfondissement de l'ensemble ZA+ZFA et son élargissement peuvent parfois être indétectables. Les sondages électriques peuvent sous-estimer les épaisseurs ZA+ZFA. Leur interprétation en « 15 terrains » est une alternative difficilement exploitable par les praticiens. La méthode ERT permet une meilleure résolution des structures d'une part et des épaisseurs des compartiments intéressant l'hydrogéologue d'autre part (y compris jusqu'à plus de 80 m en utilisant un dispositif PDP). Quelle que soit la méthode (trainé, sondage 1D, ERT) les systèmes de fractures profonds sont indétectables (sauf si une altération généralisée significativement plus conductrice se développe autour). Pour l'implantation de forages en Afrique de socle, l'ERT est donc hautement recommandable pour la détermination des compartiments hydrogéologiques, alors que les mesures 1D (trainé et VES) devraient être abandonnées. L'utilisation généralisée de l'ERT améliorerait notre connaissance de ces aquifères importants, et conduirait très probablement à améliorer les taux de succès dans l'implantation des forages.

Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce au Projet GRIBA (Groundwater Resources In Basement rocks of Africa) financé par l'Union Africaine et l'Union Européenne, et à l'Institut de Recherche pour le Développement (grant AURG/098/2012). Le contenu de ce document relève de la seule responsabilité de l'IRD et ne peut en aucun cas être considéré comme reflétant la position de l'Union Européenne ou de l'Union Africaine. Cette étude bénéficie des financements de l'IRD par ses programmes d'appui des renforcements des capacités ARTS et JEAI et du LMI « Picass'eau » pour le financement à la participation au colloque.

Références

- Descloitres, M., Ruiz, L., Sekhar, M., Legchenko, A., Braun, J.J., Kumar, M.S.M., Subramanian, S., 2008. Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding, *Hydrological Processes*. 22, 384–394.
- 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.
- Günther, T., Rücker, C., 2006. A General Approach for Introducing Information into Inversion and Examples from dc Resistivity Inversion, *EAGE Near Surface Geophysics*, Helsinki.
- Kunetz, G., Rocroi, J.P., 1970. Automatic processing of electrical soundings. *Geophysical Prospecting*, volume 18, issue 2, 157–198.
- 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.
- 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.
- Vouillamoz, J.M., Tossa, A.Y.A., Chatenoux, B., Kpegli, K.A.R., (2015). Propriétés des aquifères de socle du Bénin: analyse multi-variables et multi-échelles des paramètres de contrôle. « Aquifères de socle : le point sur les concepts et les applications opérationnelles » La Roche-sur-Yon, juin 2015.