



RAPPORT D'ETUDE - 2024

Conceptualisation hydrogéologique et recommandations pour les prospections géophysiques et l'implantation des forages Province du Guéra, Tchad

Rapport de stage de recherche de Pierre Palomar

TCHAD



Avec le soutien financier de : Agence française de développement (AFD), dans le cadre du projet de Renforcement de l'Accès, des acteurs et de la VIAbilité du service public de l'eau (REAVIA).



Le présent document bénéficie du soutien de l'Agence Française de Développement. Néanmoins, les idées et les opinions présentées ne représentent pas nécessairement celles de l'AFD.

En collaboration avec : La Délégation Régionale du Ministère de l'Eau et de l'Assainissement du Guéra et la commune de Bitkine.



Rédaction : Pierre Palomar, dans le cadre d'un stage de fin d'études d'ingénieur en Sciences de la Terre (ST5), à Polytech Sorbonne, réalisé au sein de SEVES

Maître de stage : Olivier Girou, référent hydrogéologue, SEVES

Responsable académique : Cyril Schamper, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, Paris, France

Appui académique et technique : Valérie Plagnes, Haroun Nouradine, Sorbonne Université, CNRS, EPHE, UMR 7619 METIS, Paris, France, David Ramel, ANTEA Lyon

Photographies : ADES (ONG)

Relecture : Romain Desvalois, Claire Benveniste, Colette Gènevaux, SEVES

Dates du stage : 20/02/2023 au 18/08/2023

En partenariat avec :

L'Unité Mixte de Recherche METIS (Milieux environnementaux, transferts et interactions dans les hydrosystèmes et les sols) de Sorbonne Université

Polytech Sorbonne : Ecole d'ingénieurs de Sorbonne Université

ANTEA Branche International, fourniture des données et appui par David Ramel, chef de projet 10^{ème} FED



Le contenu de ce document relève de la seule responsabilité de SEVES et ne peut en aucun cas être considéré comme l'avis des partenaires financiers

NOVEMBRE 2024

PREAMBULE

Depuis 2022, l'ONG SEVES et son partenaire local l'ONG ADES accompagnent les services d'eau potable de la ville de Bitkine et des petits centres périphériques de la ville dans la province du Guéra au Tchad. La majorité des services connaissent des arrêts et/ou ne permettent pas de répondre à la demande, en particulier en saison sèche, du fait de l'insuffisance de la ressource en eau souterraine mobilisée. Dans ce contexte, le développement de la couverture des besoins en eau potable par les services au rythme de la croissance démographique, de la consommation spécifique, et de l'étalement urbain est rendu impossible sans un renforcement de la mobilisation de la ressource. Toutefois, celle-ci est difficile dans cette zone, comme l'atteste le faible taux de succès des forages réalisés et exploitables dans le cadre d'un raccordement à un réseau AEP, de l'ordre de 11%.

Ces difficultés interrogent sur la possibilité d'y atteindre la cible 6.1 de l'Objectif de Développement Durable N°6 (ODD6) : d'ici à 2030, assurer l'accès universel et équitable à l'eau potable, à un coût abordable. SEVES, les services des Etats, les parties prenantes des services, et les partenaires techniques et financiers des projets sont donc confrontés à plusieurs problématiques dans ce type de contexte : jusqu'où pousser (et par suite quels moyens financiers engager) la recherche d'eau, après avoir multiplié des forages négatifs ou à faible débit ? Lorsque les limites d'investissements sont atteintes, convient-il alors d'adapter les services à la ressource disponible, et de réduire le niveau de service pour les usagers, voire abandonner l'idée d'un service géré en toute sécurité et la multiplication des branchements privés ? De manière plus nuancée, comment organiser le niveau et la gestion des services d'eau potable au regard des ressources en eau disponibles ?

Si ces questions peuvent se poser à court terme pour l'accompagnement au plus proche des services d'eau potable, elles ne peuvent pas trouver de réponse à moyen et long terme sans une caractérisation fine des ressources en eau souterraine des zones considérées, leur disponibilité et leur recharge, et notamment l'adaptation des méthodes de recherche hydrogéologique et géophysique.

C'est dans ce cadre que SEVES s'est associée à l'Unité Mixte de Recherche 7619 METIS de Sorbonne Université et au bureau d'études ANTEA pour développer ses compétences sur les méthodes de prospection géophysique en zone de socle. Cette collaboration a mené à la réalisation d'un stage de Master 2 conduit par Pierre Palomar et dont est issue cette étude. Elle a permis à SEVES de réaliser un véritable « bon en avant » dans sa capacité à accompagner ses partenaires dans les missions de mobilisation de la ressource en eau. Ce partenariat a démontré l'intérêt d'une synergie entre le domaine académique et le secteur privé, et l'accès à un important jeu de données fourni par un grand projet.

Malgré l'avancée permise par ce travail, des difficultés demeurent :

- La performance des forages n'est pas garantie, même quand l'implantation retenue correspond à une zone théoriquement favorable ;
- Les forages les plus performants ne permettent généralement qu'une exploitation à un débit modéré, nécessitant la réalisation d'un véritable champ captant pour alimenter une petite ville comme Bitkine ;
- La pérennité de la ressource reste incertaine, la recharge de la nappe étant trop difficilement quantifiable et les mesures de terrain (piézométrie et volumes prélevés) absentes.

Le partenariat se poursuit donc notamment à travers la réalisation en 2024 d'un stage de Master 1, qui mènera à la publication d'une synthèse bibliographique sur la recharge des nappes en contexte sahélien. Ce renforcement des connaissances et des méthodes constitue un préalable à l'adoption d'une approche intégrée de la gestion des ressources en eau dans la zone, notamment en lien avec les services essentiels associés. L'ensemble de cette démarche est mené en concertation avec la Délégation Régionale du Ministère de l'Eau du Guéra et la Commune de Bitkine.

Olivier Girou & Romain Desvalois, SEVES

RESUME

La réussite d'un forage, en tant que capacité à pouvoir y pomper de l'eau, est principalement déterminée par la nature des terrains rencontrés. En zone de socle, comme dans la province du Guéra au Tchad étudiée dans le présent rapport, l'accès aux services d'eau potable est fortement limité par le fort taux d'échec rencontré lors de la création des forages. En effet, l'implantation de forages dans les secteurs productifs de l'aquifère visé requiert des connaissances spécifiques dans les domaines de l'hydrogéologie et de la géophysique.

A partir d'une synthèse bibliographique sur l'hydrogéologie en zone de socle et les méthodes de prospection géophysique associées, de la réinterprétation des sondages géophysiques (ERT) existants dans la zone d'étude et de l'analyse de la performance des forages associés à ces sondages, le présent rapport propose un état de l'art en prospection hydrogéologique et géophysique en zone de socle, la définition d'un modèle conceptuel hydrogéologique de la zone d'étude, et des **recommandations pour les prospections géophysiques à venir dans le cadre de campagnes de mobilisation de la ressource en eau et de forages.**

Dans le cadre d'un partenariat entre ONG, université et bureau d'étude, la présente étude propose une application de travaux de recherche qui se veut opérationnelle et s'adresse à tous les acteurs de l'eau potable en zone de socle. Evidemment cette publication s'adresse en premier lieu aux hydrogéologues et géophysiciens en charge de l'implantation de forages. Les hydrogéologues trouveront un cadre pour mener leurs études de prospection, alors que les géophysiciens trouveront des éléments méthodologiques détaillés. Pour ceux travaillant dans le centre du Tchad, la méthodologie présentée peut être répliquée à l'identique. Pour des contextes hydrogéologiques comparables mais différents, le lecteur trouvera une base méthodologique à affiner ou pourra simplement « piocher » des éléments théoriques et pratiques. Enfin, les acteurs de l'eau potable (bailleurs, auteurs de projet, associations d'usagers...) trouveront dans la synthèse bibliographique des bases théoriques pour comprendre les enjeux de la mobilisation de la ressource en eau en zone de socle.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	7
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	9
Contexte géologique et hydrogéologique en zone de socle	9
Modèle géologique.....	9
Comportement hydrogéologique [Linéaments, Recharge]	10
Méthodes géophysiques appliquées aux aquifères en zone de socle	16
Panneau électrique [ERT]	16
Autres méthodes utilisées	25
Zone d'étude du Guéra – région de Bitkine	27
Contexte géologique et hydrogéologique	27
Campagnes de mesures antérieures [9 ^{ème} FED/ 10 ^{ème} FED]	28
Méthodologie & résultats de la thèse d'Haroun Nouradine	30
ANALYSE DES DONNEES DE LA REGION DE BITKINE	32
Données disponibles et qualité des données.....	32
Zone d'étude	32
Validation des données	33
Représentation des données	34
Représentation du panneau	34
Représentation du log de forage	35
Représentation de la résistivité au droit du forage.....	37
Choix des paramètres d'inversion.....	37
Invariables	37
Paramètres testés.....	38
Résultats d'analyse.....	43
Corrélation des forages avec les ERT.....	43
Analyse en composantes principales	47
MODELE [HYDRO]GEOLOGIQUE DE LA REGION DE BITKINE.....	49
Classification des sites	49
Modèle A et A*	49
Modèle B et B*	50
Modèle C	51
Résultats d'analyse du modèle hydrogéologique de la région du Guéra	52

Répartition des modèles hydrogéophysiques.....	55
CONCLUSION.....	57
Synthèse	57
Recommandations pour l'implantation des forages.....	57
Discussions	58
Perspectives	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	60

INTRODUCTION

Les aquifères de socle qui caractérisent la province du Guéra présentent des défis particuliers pour la mobilisation de l'eau souterraine.

Les données disponibles pour les 9^{ème} et 10^{ème} projets du Fonds Européen pour le Développement (FED), montrent que sur 137 forages réalisés au Guéra, entre 2010 et 2016 :

- 47 % se sont montrés négatifs en cours de foration et n'ont pas été équipés ;
- 42 % sont impropres à un raccordement à un réseau AEP car présentant un débit d'exploitation trop faible ;
- et seulement 11 % présentent un débit exploitable de l'ordre de 4 m³/h 8 h/j, qui justifie le raccordement à un réseau AEP.

Les faibles débits des forages existants et les taux élevés de forages négatifs ou impropres interrogent sur la possibilité de répondre aux besoins d'eau potable des populations en respectant les cibles des Objectifs de Développement Durable.



Carte 1 : Région du Guéra

L'UMR METIS et ANTEA travaillaient déjà sur la mobilisation de la ressource en eau dans la province du Guéra. D'une part, au sein de l'UMR METIS, une thèse de doctorat a été réalisée par Haroun Nouradine (Nouradine, 2023) sur la caractérisation de la ressource en eau dans les aquifères de socle de la province du Guéra. Ce travail étant concentré sur la zone autour de la ville de Mongo, à 60 km de Bitkine. D'autre part, ANTEA est mandataire des projets 9^{ème}, 10^{ème} et 11^{ème} FED pour la partie mobilisation de la ressource en eau de la région du Guéra, sous la direction de David Ramel.

A partir de 2023, l'association entre SEVES, l'UMR METIS et ANTEA s'est concrétisée par la réalisation d'un **stage de Master 2 mené par Pierre Palomar**, auteur du présent rapport, encadré par Cyril Schamper de l'UMR METIS et Olivier Girou de SEVES. Le stage s'est concentré sur l'étude hydrogéophysique de la zone de Bitkine, afin de déterminer les sites les plus propices à l'implantation de forages productifs. A partir du travail de thèse d'H. Nouradine et des données fournies par D. Ramel, P. Palomar a procédé à :

- la réalisation d'une synthèse bibliographique de l'hydrogéologie en zone de socle et les méthodes de prospection géophysique associées ;
- la réinterprétation des tomographies de résistivités électriques (ERT) existantes dans la zone d'étude (61 sondages) ;
- la définition d'un modèle conceptuel hydrogéologique de la zone d'étude ;
- la fourniture de recommandations pour les prospections géophysiques à venir.

D'un point de vue opérationnel, les résultats du stage de P. Palomar et le partenariat mis en place ont permis à SEVES de **mieux cadrer les prospections géophysiques et hydrogéologiques** notamment grâce à :

- une meilleure compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la zone d'étude ;
- une connaissance des méthodologies de tomographie de résistivité électrique à mettre en place ;

- la définition d'un jeu de paramètres d'inversion cohérent avec les lithologies et conditions géophysiques rencontrées ;
- la systématisation des interprétations des ERT pour une meilleure comparaison des investigations à venir avec les sondages déjà réalisés ;
- la connaissance des profils types correspondant aux zones propices pour l'implantation d'un forage ;
- une bonne connaissance des acteurs locaux spécialisés en géophysique et en forage d'eau.

Les pages suivantes, directement issues du rapport de stage de P. Palomar, présentent les travaux de recherche menés, détaillent la méthodologie adoptée, les résultats obtenus, et proposent des recommandations pratiques pour les futures prospections géophysiques et hydrogéologiques dans la région étudiée.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE EN ZONE DE SOCLE

Modèle géologique

Afin d'aborder le contexte géologique de la zone de socle, nous nous sommes basés sur les travaux de Lachassagne, Dewandel, et Wyns [2021] et Wyns et al. [2004] que nous complétons par d'autres références de manière ponctuelle.

Les roches cristallines ou roches de socle sont de nature plutonique ou métamorphique. Outre les formations volcaniques qui ne sont pas considérées comme zone de socle, ces dernières s'opposent généralement aux zones sédimentaires ou karstiques. Elles constituent la base des continents, et représentent 20% de la surface de la Terre. Le continent Africain compte à lui seul 35% des roches de socles en place sur Terre et le continent Américain 15%. On retrouve ce contexte géologique, à moindre mesure, en Inde, en Australie et en Europe [Lachassagne et al., 2021].

Lorsque la roche cristalline a été soumise à une période prolongée de calme tectonique sous un climat humide et que la vitesse d'érosion est inférieure à celle de l'altération, des mécanismes géochimiques conduisent à la formation d'une roche de socle altérée qui surplombe le socle sain. Quelques millions d'années suffisent à la formation de cette altération. Des études ont été menées par Hill [1996] et Taylor and Howard [1999] afin d'établir l'origine du processus d'altération et ont expliqué de manière exhaustive les mécanismes en jeu en utilisant des arguments stratigraphiques et géochimiques.

Les travaux de Wyns et al. [2004] présentent une synthèse des observations géologiques permettant de décrire les différentes couches de la zone de socle dont les limites sont parallèles au paléosol. Le modèle conceptuel proposé décrit ces couches en fonction de leur position verticale par rapport au paléosol et fournit des informations sur leur degré d'altération. Les paragraphes suivants font la description de ce modèle conceptuel de haut en bas ainsi que les abréviations qui seront utilisées pour la suite.

Une cuirasse latérique ou bauxitique, latérite ou encore **couche de recouvrement** surplombe généralement la roche cristalline. Elle n'est que localement préservée en raison de l'érosion ou, parfois, de son exploitation par l'Homme. Nous choisisons pour la suite le nom de couche de recouvrement pour désigner cet élément qu'on abrégera **CO** pour « cover ».

La saprolite, altérite ou encore **horizon altéré** se retrouve sous cette couche de recouvrement. Elle a une épaisseur allant de 20 à 30 mètres en moyenne, mais peut avoir totalement disparu en raison de l'érosion. Sa lithologie dépend de la roche parente et notamment de la teneur en quartz avec globalement des argiles pour les roches métamorphiques et des arènes granitiques pour les roches plutoniques. La partie supérieure est composée d'allotérites, structure non consolidée aux pores fermés, peu poreuse et peu perméable. La partie inférieure présente une structure de roche conservée, de grande porosité, nommée isaltérite. Elle demeure cependant faiblement perméable. La base des arènes granitiques peut présenter une texture feuilletée subhorizontale plus perméable, des fissures subhorizontales peuvent s'y développer mais présentent un grand risque d'être oblitérées par des fines [Maréchal et al., 2004]. Pour la suite, nous choisisons le terme d'horizon altéré pour désigner cette couche que l'on abrégera **HA**.

Sous cette couche fortement altérée se trouve l'**horizon fissuré** [noté **HF** dans la suite du rapport]. Son épaisseur est généralement le double de l'HA. Les fissures sont provoquées par les biotites présentes dans la roche qui, en évoluant vers des argiles gonflantes, entraînent des contraintes élevées et provoquent l'éclatement de la roche. Les roches isotropes telles que les granites présentent une orientation préférentielle subhorizontale de ces fissures [Wyns et al., 2004]. La densité de fissures est

à la fois proportionnelle à la quantité de biotites présentes dans la roche [Hill, 1996] et fonction de la profondeur avec un espacement entre les fissures de l'ordre de 10 centimètres en haut de l'horizon et qui augmente suivant la profondeur à mesure que la contrainte verticale augmente. Par conséquent, il est généralement admis qu'au-delà de 50 mètres sous l'interface avec l'HA, la densité de fissure est nulle.

On rencontre alors le substratum sain, socle d'origine composé de la roche parente.

On note aussi la présence de formations verticales de diverses origines telles que des fractures d'origine tectonique ou des veines de quartz et qui ajoutent une anisotropie au modèle [Lachassagne et al., 2021].

La Figure 1, ci-dessous, présente le modèle conceptuel des différentes formations en zones de socle décrites précédemment.

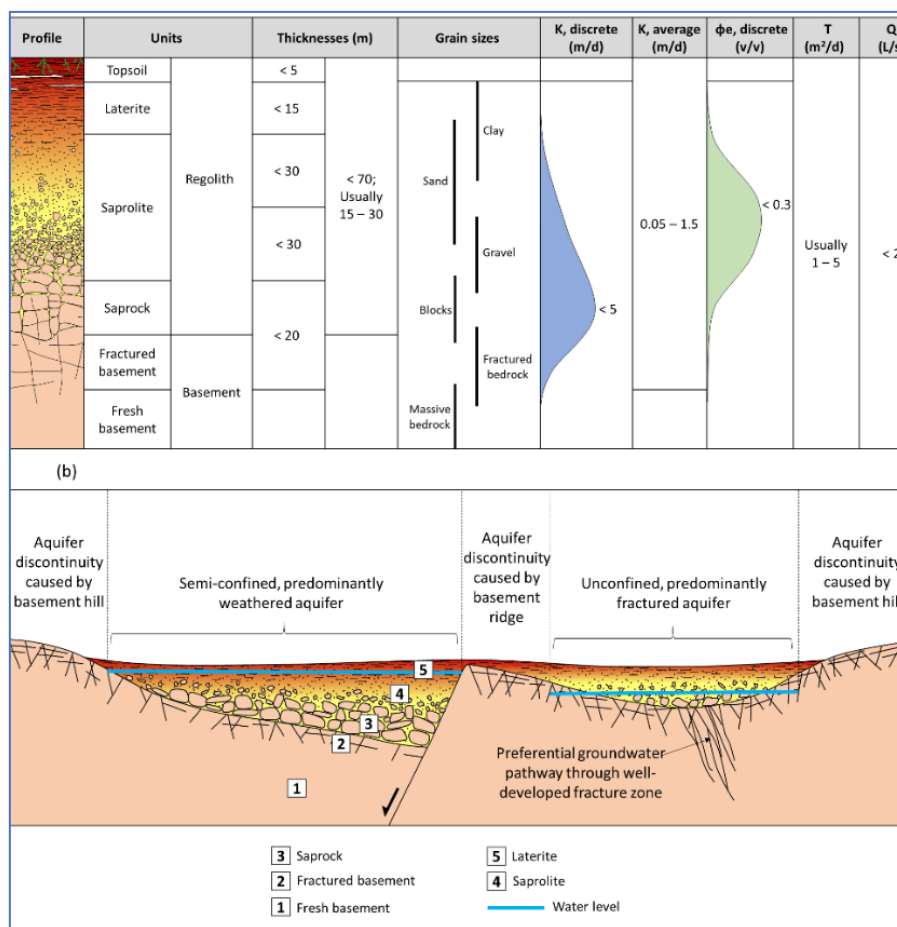


Figure 1 : Schémas conceptuels de la roche en zone de socle. A) Formation tabulaire type en zone de socle. B) Variations latérales types en zone de socle [Leborgne et al., 2021].

Comportement hydrogéologique [Linéaments, Recharge]

Hydrodynamique

Les roches cristallines, lorsqu'elles sont saines, sont denses, donc peu poreuses et peu perméables.

Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, lorsque les zones de socle ont connu de longs épisodes de quiétude dans leur activité tectonique, elles ont pu subir des processus d'altération in situ.

Wyns et al., [2004] propose un modèle hydrogéologique conceptuel des aquifères en zones de socle. Il a été démontré que la cuirasse latéritique ou bauxitique pouvait être rechargée lors de forte pluie et donner naissance à des nappes perchées. Cependant, le mécanisme hydrodynamique prédominant se trouve dans les horizons altérés et fissurés.

D'une part, la nature des altérites leur confère une grande porosité mais une faible perméabilité. La porosité de cette couche est de minimum 5% et peut atteindre les 30% dans certains cas. La conductivité hydraulique des altérites est cependant très faible, de l'ordre de 10^{-6} m/s [Acworth, 1987; Dewandel et al., 2006]. Cela attribue un rôle capacitif à l'horizon altéré par opposition aux unités géologiques plus perméables. A titre d'exemple, la Figure 2 reprend des valeurs de conductivités hydrauliques en fonction de la granulométrie. On peut notamment y voir que la conductivité de l'HA correspond à un mélange de sable, limon et argile.

$K(m/s)$		10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	
GRANULOMETRIE	homogène	Gravier pur			Sable pur		Sable très fin			Silt		Argile			
	variée	Gravier gros et moyen		Gravier et sable		Sable et argile-Limons									
DEGRES DE PERMEABILITE		TRES BONNE					BONNE					MAUVAISE		NULLE	
TYPES DE FORMATIONS		PERMEABLES					SEMI-PERMEABLES					IMPER.			

↓ limites conventionnelles

Figure 2 : Conductivité hydraulique en fonction de la granulométrie [Malundama et al., 2019].

A l'inverse, l'horizon fissuré présente une faible porosité [5% maximum], mais les fissures présentes lui confère une plus grande conductivité hydraulique [la conductivité de fissure étant 400 fois supérieure à la conductivité de la roche saine qui s'interpose [Maréchal et Dewandel, 2004]. L'étude de Dewandel et al. [2006] a montré que la conductivité hydraulique des fissures est légèrement supérieure dans les deux premiers mètres de l'horizon puis reste constante au-delà. Par conséquent, la conductivité hydraulique du milieu est directement proportionnelle à la densité des fractures qui décroît avec la profondeur. Toujours selon cette étude, elle est de l'ordre de 5.10^{-5} m/s sur les deux premiers mètres de l'horizon fissuré puis se retrouve divisée par 5. La Figure 3, ci-après, reprend schématiquement le modèle conceptuel de la conductivité hydraulique en zone de socle.

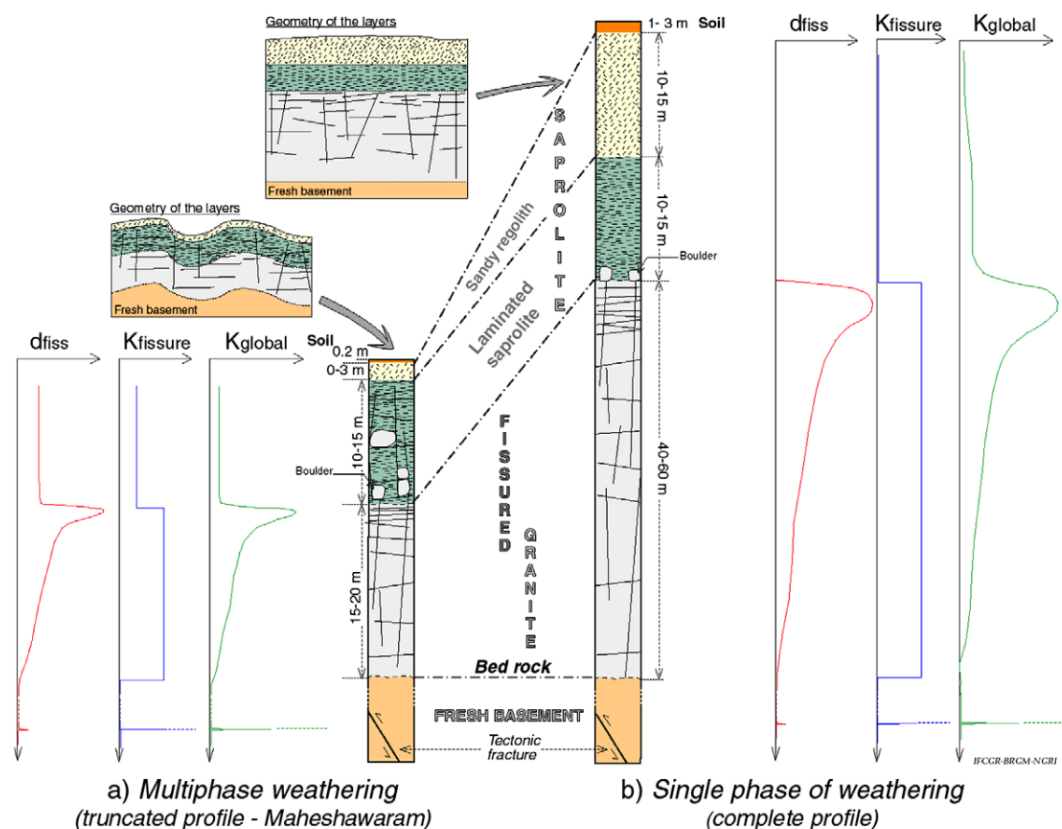


Figure 3 : Conductivité hydraulique au sein de l'aquifère expliqué par la conductivité des fissures et leur densité en fonction de la profondeur [Maréchal et al., 2004].

En outre, l'horizon fissuré est un milieu anisotrope tel que la conductivité hydraulique horizontale est en moyenne 10 fois supérieure à la conductivité verticale [Maréchal et al., 2003, Maréchal et Dewandel, 2004]. Plus précisément, Maréchal et Dewandel [2004], en plus d'affiner le modèle conceptuel de la zone fissurée, proposent une conductivité horizontale de 10^{-5} m/s pour une conductivité verticale de l'ordre de 10^{-6} m/s pour l'horizon fissuré.

Au regard des caractéristiques des horizons fissurés et altérés, les deux horizons se comportent comme deux réservoirs complémentaires avec un réservoir capacitif [HA] qui surplombe un réservoir conductif [HF].

Le modèle de flux de l'aquifère est décrit par Rushton [1986] puis par Rodhe and Bockgård [2006] avec des tests de pompage dans l'horizon fissuré. Il y est montré que la recharge s'opère de deux manières :

- Un flux entre l'horizon altéré vers l'horizon fracturé qui cherche à équilibrer la charge entre les deux réservoirs.
- Par des flux horizontaux au sein de l'horizon fracturé lorsque le niveau de la nappe descend sous un seuil donné. Pour approfondir, la thèse de Le Goc [2009] propose une modélisation des flux au sein des milieux fracturés hétérogènes par une approche stochastique.

La Figure 4 schématise les différents flux au sein de l'aquifère de socle lors d'un pompage dans l'horizon fissuré.

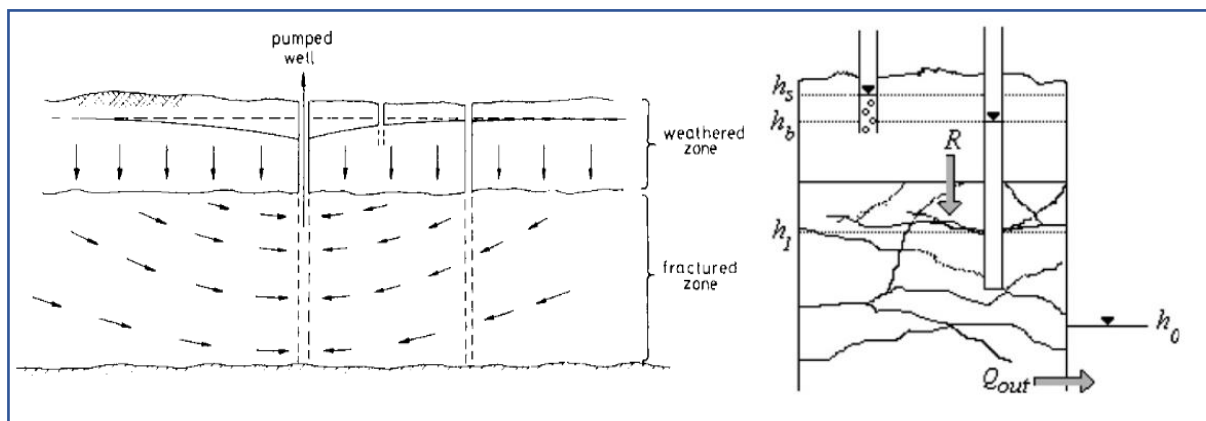


Figure 4 : A gauche : réponse d'un aquifère de socle lors du pompage dans l'horizon fissuré, le toit de la nappe est situé dans les altérites [Rushton, 1986]. A droite : niveaux piézométriques de HA [h_s] et HF [h_b] la recharge est notée R et Q_{out} symbolise le débit sortant lorsque le niveau piézométrique descend en dessous d'un h_o [Rodhe and Bockgård, 2006].

On peut de plus citer les travaux de Dewandel et al. [2012] qui proposent une méthode de cartographie de la perméabilité et la porosité au sein des aquifères de socle à l'aide de sondages électriques et de forages. Une conclusion intéressante de cette étude est que, malgré une forte hétérogénéité locale, les valeurs de perméabilité et porosité ne varient pas lorsque l'on considère une échelle spatiale de l'ordre de la taille des fissures. Aussi, au-delà d'une échelle de 100 m, la porosité et la perméabilité de l'horizon fissuré peuvent être considérées comme homogènes.

Linéaments et fractures

Des formations subverticales entraînent l'existence d'hétérogénéités locales dans la perméabilité et la porosité de l'aquifère, telles que les dykes, veines, failles, joints ou encore contacts entre deux lithologies distinctes [Lachassagne et al., 2021].

La Figure 5, page suivante, montre un exemple de 3 formations subverticales pouvant se retrouver en zone de socle [veine de quartz, fracture et contact lithologique].

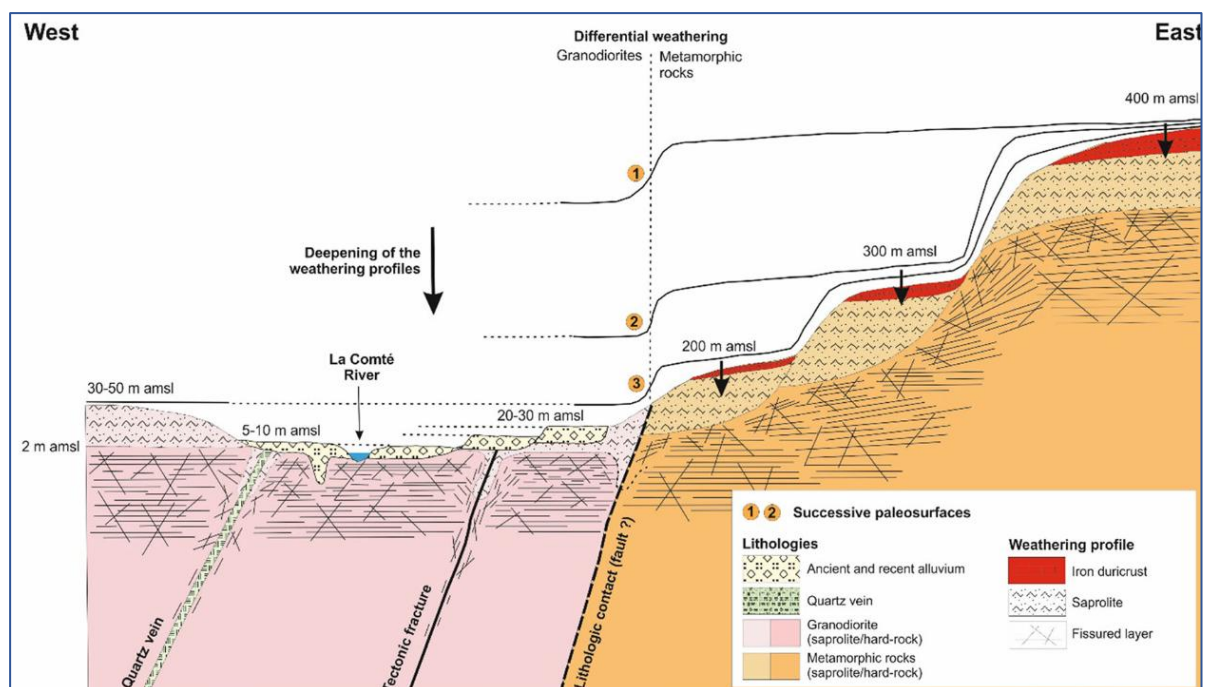


Figure 5 : Différentes formations subverticales pouvant être présentes en zones de socle [Lachassagne et al., 2021]

Il est possible d'observer en surface les fractures tectoniques ou les joints par la présence de linéaments. Les formations subverticales comme les fractures ont longtemps été considérées comme des sites favorables à l'implantation de puits d'approvisionnement en eau potable. A ce titre, une étude, menée par Roques et al. [2014] dans le Massif armoricain en France, confirme le caractère perméable des failles et fractures dans la zone d'étude, et modélise leur rôle dans la recharge de l'aquifère. En outre, il est mis en avant que ces zones sont des voies privilégiées pour la recharge puisqu'elles permettent la communication entre l'aquifère et les eaux de surface.

A l'inverse, certains auteurs comme Gleeson et Novakowski [2009] et Place et al. [2016], mettent en évidence que les fractures, qui diffèrent des fissures issues des processus d'altération, peuvent en réalité constituer des zones peu connectées et d'une perméabilité faible car scellées par des argiles. Ces auteurs concluent que les fractures agissent en réalité comme des barrières à la recharge et au flux au sein de l'aquifère et qu'elles constituent donc des sites non favorables à l'implantation de forages.

Dewandel et al. [2014, 2012] apportent des modèles mathématiques théoriques afin de modéliser des pompages aux abords de fractures productives ou scellées.

Dans la pratique, la présence d'une fracture n'est une condition ni nécessaire ni suffisante à l'implantation d'un pompage productif. En effet, la présence d'altérites et d'un horizon fissuré constitue des éléments bien plus révélateurs d'un site favorable [Nouradine et al., 2023].

En outre, il a longtemps été d'usage de corréliser la présence de linéaments identifiés par télédétection à la présence de fractures. Cependant, la corrélation entre linéaments et fractures est, elle aussi, particulièrement controversée. En effet, les études réalisées par des méthodes géophysiques sur le terrain après télédétection montrent des résultats contraires. D'une part, on peut lire dans l'étude menée par Nesny et al. [2019] que les linéaments correspondent généralement à des fractures. C'est pour cette raison que des cartes de densité de linéaments interviennent parfois dans la cartographie des zones favorables à la recharge de l'aquifère [Al-Djazouli et al., 2021; Lentswe and Molwalefhe, 2020; Mussa et al., 2020 et Bandré, 2022]. Ces méthodes seront abordées dans la partie consacrée à la recharge de l'aquifère

Mais, d'autre part, les articles de Yalo et al. [2021] et surtout Soro et al. [2017] mettent en évidence l'absence de corrélation entre la présence de linéaments et les fractures.

Au regard de ces controverses, les fractures et les linéaments ne seront pas considérés comme des conditions nécessaires à la productivité des forages dans la suite de ce rapport.

Recharge de l'aquifère

La revue de Lachassagne et al., [2021] rappelle que la recharge a lieu de préférence dans les parties basses des bassins versants nommées « bas-fonds ». La première raison est que les parties hautes présentent souvent une couche argileuse en surface qui favorise le ruissellement. La seconde est que, notamment en région aride où la recharge diffuse par les eaux de pluie est quasi-nulle, la recharge a lieu au sein des talwegs lors des épisodes de pluie saisonnière, et plus sporadiquement au sein des fractures [Roques et al., 2014].

A l'échelle du bassin, Maréchal et al. [2006] ont réalisé une étude sur un bassin indien utilisant la méthode de la fluctuation de la nappe [Water Table Fluctuation] revue par Healy and Cook [2002]. Cette méthode permet de prédire simplement l'évolution du niveau de la nappe en s'appuyant sur des données piézométriques et le bilan hydrique à l'échelle d'un bassin versant donné.

A l'échelle régionale, de nombreux articles sur la cartographie des zones de recharge préférentielle ont été publiés. On peut citer de manière non exhaustive Al-Djazouli et al. [2021], Lentswe and

Molwalefhe [2020], Mussa et al. [2020] et Bandré [2022]. Leurs travaux sont basés sur des méthodes d'analyse multicritère intégrée dans un Système d'Information Géographique. L'objectif de l'analyse est de reclasser divers facteurs hydrologiques [densité de drainage, pente, densité de linéaments, occupation des sols, géologie, épaisseur d'altération, pluie, eau utile] présentés sous des fonds cartographiques, selon un critère de recharge de la nappe. Ensuite, une hiérarchie est établie entre les différents facteurs suivant leurs interactions entre eux. Une carte de zones de recharge préférentielles est alors produite.

La Figure 6 qui suit est un schéma synthétique de la cartographie des zones préférentielles de recharge.

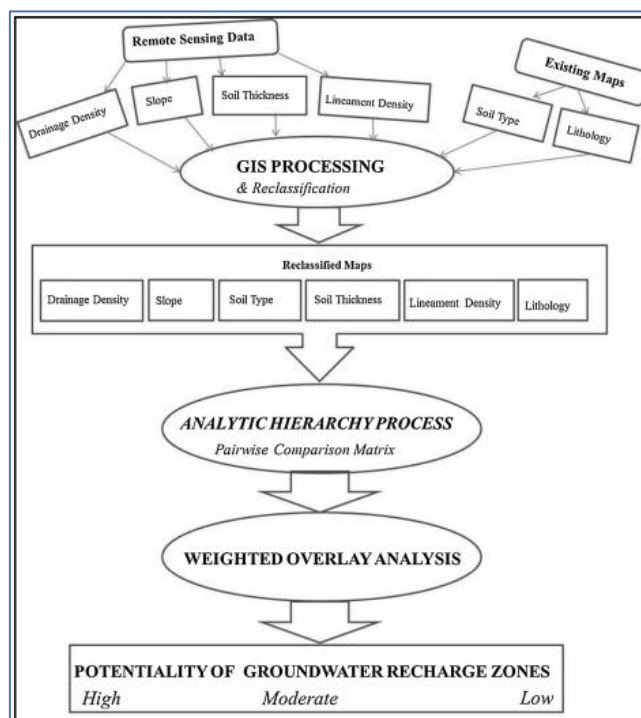


Figure 6 : Etape de la cartographie des zones de recharge préférentielles [Lentswe and Molwalefhe, 2020].

Enfin, on peut aussi trouver dans la littérature des méthodes de cartographie des zones de recharge potentielles utilisant le *machine learning* afin d'affiner les résultats. C'est le cas de l'article de Gómez-Escalonilla et al. [2022].

Productivité des forages

Les zones de socle sont généralement peu productives et il est difficile d'atteindre un débit d'exploitation de 10 m³/h dans des puits d'approvisionnement en eau potable [AEP] [Detay et al., 1989 ; Courtois et al., 2010]. Cependant, la productivité des zones de socle a été largement étudiée et plusieurs résultats permettent d'identifier des zones favorables à l'implantation de forages.

Deux facteurs sont à prendre en compte dans l'implantation de puits AEP : le débit de pompage qu'il est possible d'atteindre au regard des propriétés de l'aquifère et la recharge de la nappe au cours de l'année.

Il a été mis en évidence qu'une bonne productivité des forages était conditionnée par une épaisseur ni trop grande, ni trop faible d'horizon altéré, une bonne épaisseur d'horizon fissuré et un niveau piézométrique compris dans les altérites [Detay et al., 1989 ; Davis and Turk, 1964].

En effet, la fonction capacitive des altérites sera d'autant plus élevée que le niveau piézométrique dépasse la base de l'horizon altéré, on appelle cette propriété la puissance du réservoir des altérites.

Et tout aussi logiquement, par sa fonction capacitive, l'épaisseur d'altérite joue un rôle primaire dans la quantité d'eau accessible dans l'aquifère.

Il a notamment été mis en lumière que le débit atteint une asymptote au-delà de 30 m d'épaisseur de HA ainsi qu'un optimum de débit spécifique [c'est-à-dire ici, le débit divisé par l'épaisseur d'altérite autour de 13 m de HA. Cela veut dire qu'un horizon altéré de 13 m d'épaisseur garantit à la fois un bon fonctionnement du réservoir capacitif tout en évitant de forer trop profondément ce qui représente un coût conséquent lors des travaux et de l'exploitation.

Par ailleurs, une étude menée par Courtois et al. [2010] propose une méthode de calcul de l'épaisseur utile moyenne en fonction des débits spécifiques relevés dans une zone de socle. Il s'agit entre autres de l'épaisseur d'horizon fissuré garantissant une bonne productivité du forage. Or, il y est montré que le débit spécifique décroît à partir du toit de l'horizon fissuré. De plus, comme vu avec l'étude de Dewandel et al. [2006], les deux premiers mètres de l'horizon fissuré sont les plus perméables. Donc la productivité des forages va grandement dépendre des propriétés hydrodynamiques des premiers mètres de l'horizon fissuré.

D'un point de vue plus opérationnel, le rayon d'influence d'un pompage allant d'une centaine à plusieurs centaines de mètres, il est pertinent de garder une distance du même ordre de grandeur entre deux forages implantés côte à côte [Dewandel et al., 2012 et Lachassagne et al., 2021]

Enfin, on peut aussi rappeler les observations du chapitre sur les Linéaments et fractures qui interviennent dans la productivité des forages de manière controversée. Selon la revue de Lachassagne et al. [2021], il n'est pertinent de rechercher ces formations subverticales qu'en l'absence d'horizon altéré suffisant.

Enfin, les zones de recharge préférentielles sont privilégiées puisqu'elles garantissent un meilleur renouvellement de la ressource en eau sur le long terme. Le chapitre Recharge de l'aquifère présente les processus de recharge en zone de socle.

METHODES GEOPHYSIQUES APPLIQUEES AUX AQUIFERES EN ZONE DE SOCLE

Panneau électrique [ERT]

Puisque l'essentiel de notre travail a porté sur l'interprétation de panneaux électriques, nous nous concentrons sur la description de cette méthode de prospection. Il existe cependant un chapitre consacré aux Autres méthodes utilisées.

Principes du panneau électrique

Le panneau électrique ou Tomographie de Résistivité Electrique [ERT] est une méthode de prospection indirecte et non destructive. Elle repose sur la propriété de résistivité électrique du sous-sol, paramètre géophysique caractéristique de la présence de charges qui conduisent le courant dans un milieu donné. Concrètement, la résistivité dépend soit de la présence de roches métallifères, soit de la teneur en eau et de la quantité d'ions (principalement sels) dissous. À noter que les argiles sont généralement faiblement résistantes tandis que le socle sain est très résistif.

Le fonctionnement de base est le suivant. Un courant électrique est artificiellement injecté par l'intermédiaire de deux électrodes et la différence de potentiel est alors mesurée à l'aide de deux autres électrodes. Il s'agit d'une seule mesure.

Lorsqu'on réalise un panneau électrique [ERT], on effectue un grand nombre de mesures avec une batterie d'électrodes disposées à intervalle régulier suivant un profil donné. L'appareil va réaliser une

série de mesures sur 4 électrodes [2 électrodes pour injecter le courant et 2 pour le mesurer] selon un ordre préétabli. En effet, la disposition des électrodes joue un rôle dans la sensibilité, la profondeur d'investigation et l'aire de prospection. On peut citer par exemple les configurations Wenner-Schlumberger et Pôle-Dipôle qui ont été utilisées dans les investigations que nous allons étudier. Ces dispositifs sont caractérisés par « a » la longueur du dipôle, « n » est le facteur de séparation du dipôle et k est un facteur géométrique utilisé lors de l'inversion et tenant compte de la distance entre les électrodes [Dahlin and Zhou, 2004; Loke, 2010].

La Figure 7, ci-dessous montrent des exemples de dispositifs communs.

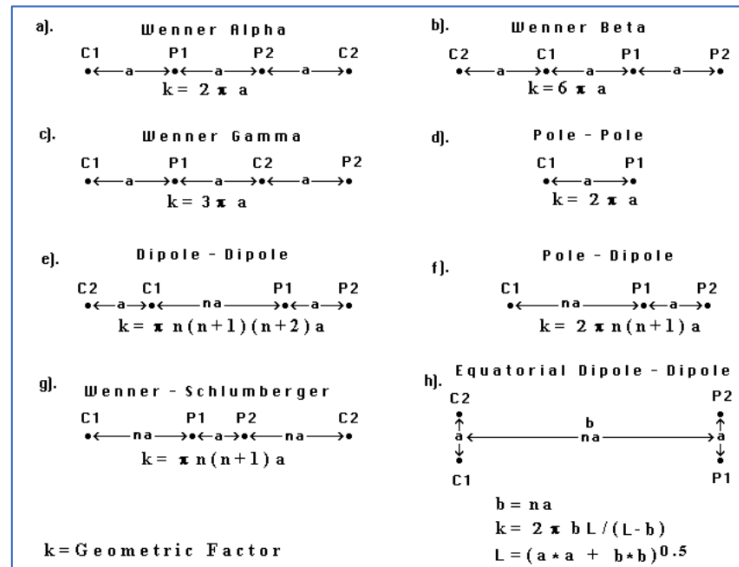


Figure 7 : Dispositifs communs utilisés en ERT, C1 et C2 désignent les électrodes de courant, P1 et P2 les électrodes de potentiel, a est la longueur du dipôle, n est le facteur de séparation des dipôles et la constante k est le facteur géométrique (en m) tenant compte des distances entre électrodes [Loke, 2010].

La sensibilité caractérise le degré auquel un changement de la résistivité dans une zone donnée va influencer le potentiel mesuré par le dispositif. Elle diminue avec la profondeur. La sensibilité peut être négative ou positive. Une forte sensibilité positive aura tendance à surestimer les valeurs de résistivité et inversement. Par ailleurs, la profondeur d'investigation est proportionnelle à l'écartement entre les électrodes, allant du tiers au sixième de la taille du dispositif suivant la configuration utilisée. C'est-à-dire qu'en faisant varier cet écartement, il est possible d'obtenir les résistivités apparentes du sol à des profondeurs plus ou moins grandes.

De plus, les mesures peuvent être influencées par du bruit. Un bruit systématique peut être présent dans les mesures lorsqu'il y a un défaut d'implantation du dispositif. Et un bruit aléatoire peut être issu des courants telluriques. Pour caractériser l'influence du bruit sur les mesures, on regarde le ratio signal sur bruit.

La Figure 8, qui suit, montre la sensibilité des mesures pour différents dispositifs avec les zones de forte sensibilité portant vers les couleurs extrêmes soit le rouge et le bleu et les zones de plus faible sensibilité sont colorées en jaune kaki.

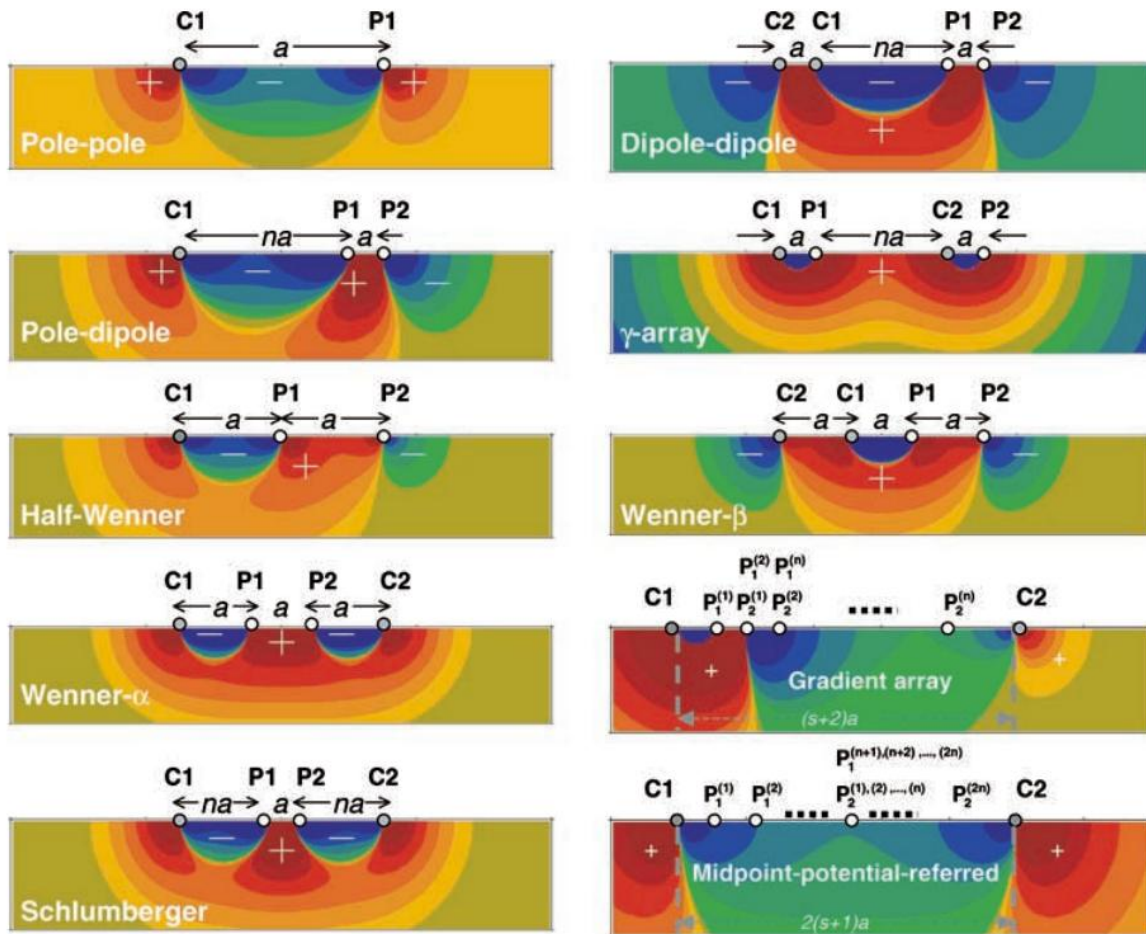


Figure 8 : Sensibilité des mesures suivant la disposition des électrodes [Dahlin and Zhou, 2004]

Dans le tableau ci-dessous, nous reprenons les propriétés des configurations les plus classiques. Afin de simplifier, nous avons dans un premier temps caractérisé la sensibilité selon qu'elle est soumise aux variations verticales [Verticale] et latérales [Latérale]. Puis nous classons les dispositifs sur 5 suivant leurs qualités en termes de profondeur d'investigation, de ratio signal sur bruit et de couverture latérale. Nous complétons ce classement par des commentaires.

Dispositif	Sensibilité [Horizontale/Verticale]	Profondeur d'investigation [1 à 5]	Signal sur bruit [1 à 5]	Couverture latérale [1 à 5]
Wenner-alpha [W-alpha]	[Verticale] Contours horizontaux centrés sous le centre du dispositif. Sensible aux variations verticales de résistivité.	4. Environ 1/6 de la longueur total du dispositif.	1. Le plus fort	5. La plus faible
Wenner-Schlumberger [WS]	[Latérale et Verticale] Sensibilité aux variations horizontales de résistivité pour les « n » petits, pour les variations verticales pour les « n » grands notamment entre P1 et P2.	3. Environ 1/6 de la longueur du dispositif, augmente vers 1/5 lorsque n augmente.	2. Plus faible que le Wenner mais supérieur que les dispositifs PP et DP.	4. Plus forte que le Wenner mais inférieure aux dispositifs PP, DD et DP.
Dipôle-Dipôle [DD]	[Latérale] Valeurs de sensibilité fortes sous les centres des dipôles C1-C2 et P1-P2. Très sensible aux variations latérales mais peu aux variations verticales.	5. De 1/7 de la longueur du dispositif pour n=1 à ¼ pour n=8.	3. Fort pour les « n » petits mais décroît rapidement lorsque « n » augmente.	3. Supérieure au W-alpha et WS mais inférieure au PD et PP.
Pôle-Pôle [PP]	[Latérale] Sensibilité plutôt faible entraînant des problèmes de résolution. Sensible aux variations latérales de résistivité.	1. La plus élevée, de l'ordre de l'écartement entre les deux électrodes.	5. Très faible en raison de la distance entre les électrodes pour chaque dipôle [de l'ordre de 20 fois la longueur du profil] qui favorise la présence de bruit tellurique.	1. La plus élevée.
Pôle-Dipôle [PD]	[Latérale] Sensibilité asymétrique, plus élevée entre P1 et P2 et devient verticale lorsque « n » augmente. De ce fait, ce dispositif est très sensible aux variations latérales de résistivité. La résolution diminue lorsque « n » augmente.	2. La plus élevée après le PP, de l'ordre du tiers de la taille du dispositif.	4. Faible en raison de l'électrode placée à l'infini qui favorise la présence de bruit tellurique.	2. Bonne couverture latérale mais inférieure à DD.

Tableau 1 : Comparaison entre les différents dispositifs selon leur sensibilité, leur profondeur d'investigation, le ratio signal sur bruit et la couverture latérale.

Une pseudo-section de résistivités apparentes est obtenue à la suite des mesures. Elle présente une vision 2D des mesures de résistivités apparentes réalisées en fonction de leurs positions le long du profil et placées à la profondeur d'investigation relative à la configuration de chaque mesure. Pour les dispositifs Wenner et WS, le point de mesure est représenté au centre du dispositif puisque la sensibilité y est importante. Cependant, les dispositifs PP, DP et DD présentent des sensibilités excentrées sous les dipôles, ce qui oblige à un traitement particulier de la pseudo-section avant inversion [Loke, 2010].

Cette pseudo-section représente les résistivités apparentes mesurées, il est nécessaire de l'inverser afin de définir un modèle des valeurs de résistivité du terrain prospecté. Les méthodes d'inversion font l'objet du chapitre Méthodes d'inversion *blocky / smooth*.

L'obtention d'un panneau électrique issu de l'inversion permet alors l'identification des différentes structures géomorphologiques en sous-sol, distinguées sur la base de leur résistivité.

Panneau électrique et modèle de résistivité en zone de socle

La méthode ERT s'est distinguée ces dernières années face à des méthodes de prospection 1D telles que le trainé ou le sondage électrique [Leborgne et al., 2021; Soro et al., 2020]. En effet, leur interprétation porte à confusion et ne peut pas garantir une bonne connaissance du sous-sol. Elles ont même tendance à induire en erreur puisque différentes structures géomorphologiques peuvent aboutir aux mêmes résultats, notamment des fractures et des structures argileuses superficielles [Alle et al., 2018]. Voir le chapitre Les méthodes « 1D »

Par ailleurs, ces techniques sont utilisées dans l'identification des fractures, or nous avons déjà discuté du faible intérêt de ces structures dans la recherche de forages productifs dans le chapitre Productivité des forages.

La méthode ERT est, de plus, un outil performant dans l'identification des différentes couches de l'aquifère de socle. Et comme nous l'avons vu précédemment dans le chapitre Comportement hydrogéologique [Linéaments, Recharge], la productivité des aquifères dépend avant tout de l'épaisseur des horizons altérés et fissurés. Or, il apparaît que la résistivité des différents éléments de l'aquifère de socle ont des gammes de résistivité différentes.

Voici de haut en bas les intervalles que nous avons retenus [Alle et al., 2018; Belle et al., 2019; Briški et al., 2020; Lachassagne et al., 2021] :

- Couche de recouvrement [CO] : 10 à 50 Ωm , celle-ci peut occasionnellement présenter des résistivités de l'ordre de 1 000 Ωm .
- Horizon altéré [HA] : de manière générale, sa résistivité s'échelonne entre 50 et 300 Ωm . La partie supérieure composée d'allotérites est constituée de formations meubles conductrices. La partie inférieure, les isaltérites, est représentée par des formations consolidées moyennement résistantes qui peuvent dans certains cas présenter une résistivité de l'ordre de 1000 Ωm . Donc les valeurs de résistivité ont tendance à croître avec la profondeur dans l'horizon altéré.
- Horizon fissuré [HF] : on y trouve des résistivités comprises entre 50 et 1000 Ωm . La résistivité augmente progressivement avec la profondeur lorsque la densité de fracture diminue.
- Roche saine : la résistivité y est toujours supérieure à 1000 Ωm . Elle a généralement une valeur constante en fonction de la profondeur.

On peut déjà remarquer que la distinction entre l'horizon altéré et l'horizon fissuré est délicate puisque leurs gammes de résistivité se chevauchent.

Cependant, la différence de résistivité entre le socle sain et l'horizon fissurée est souvent très marquée.

La présence de fractures ou de joints, isolées dans le socle sain, conduit localement à des valeurs de résistivités électriques similaires à celles de l'HF, c'est-à-dire entre 100 et 1000 Ωm , et une forme qui s'enfonce dans le socle sain.

A titre de référence, la Figure 9 reprend des exemples de gamme de résistivité des roches communément trouvées dans la nature.

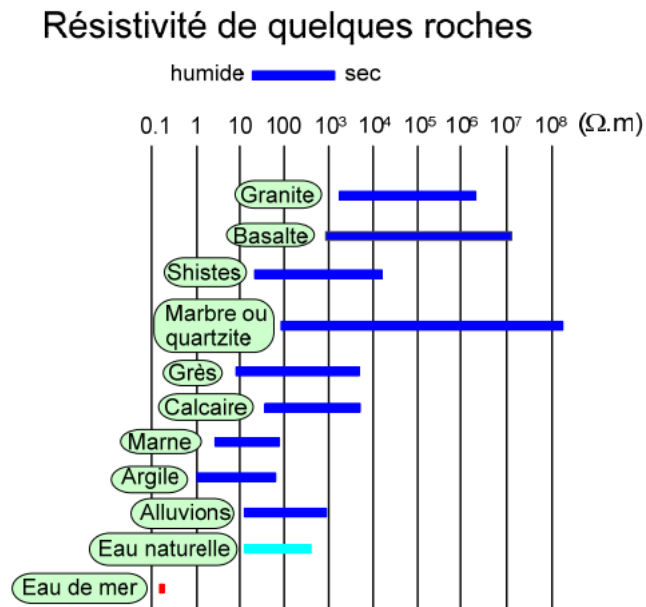


Figure 9 : Résistivité de quelques roches [Florsch et al., 2018].

La Figure 10, ci-après, présente un exemple de modèle de résistivité de l'aquifère de socle. Une couche résistante [1000 Ωm] surplombe l'horizon altéré divisé en une couche de faible résistivité [100 Ωm] qui surplombe une couche de plus forte résistivité [entre 250 et 1000 Ωm]. L'horizon fissuré est ici caractérisé par une faible résistivité de 50 Ωm et le socle sain par une résistivité de 3000 Ωm . Une fracture s'enfonce dans le socle sain avec une résistivité de 50 Ωm .



Figure 10 displays four resistivity tomography (RT) cross-sections, comparing standard inversion results with results using a filter ratio of 0.3. The cross-sections are arranged in a 2x2 grid, showing the effect of a laminated layer on the inversion results.

The top row shows results for a laminated layer resistivity of 250 Ωm and thickness of 2.5 m. The bottom row shows results for a laminated layer resistivity of 1000 Ωm and thickness of 2.5 m.

The left column shows the standard inversion results, and the right column shows the standard inversion results with a filter ratio of 0.3.

The color scale at the bottom indicates resistivity in Ωm , ranging from 40.0 to 1000.0.

The cross-sections show the subsurface structure with various layers labeled R1, R2, R3, C1, and FZ. The filter ratio of 0.3 significantly improves the resolution of the subsurface structure, particularly in the lower layers.

Le premier constat est bien entendu que l'image du sous-sol obtenue par inversion n'est pas exactement fidèle au modèle. Cependant, elle permet d'identifier avec une précision métrique la

position et l'épaisseur des différents horizons. Cette estimation est a priori suffisante pour déterminer si un site est favorable à l'implantation de puits AEP.

Configuration Pôle-Dipôle

Dans la suite de notre travail, nous allons interpréter des panneaux électriques réalisés avec un dispositif Pôle-Dipôle [PD] aussi appelé « Half-Schlumberger ». Par conséquent, on propose dans ce chapitre une présentation du dispositif ainsi que ses avantages et ses contraintes.

Comme l'ensemble des configurations de sondage électrique, le dispositif Pôle-Dipôle se compose de 4 électrodes : 2 électrodes pour injecter le courant et 2 électrodes permettant la mesure du potentiel. La particularité de ce dispositif est que l'une des électrodes de courant est placée « à l'infini ». Elle doit en réalité être placée à minima à 1,25 fois la longueur totale du profil depuis le centre de celui-ci. Et l'angle entre l'axe du profil et le segment entre le centre du profil et l'électrode à l'infini doit être idéalement de 90°. La Figure 12, ci-dessous, est un schéma de la disposition des trois autres électrodes. On réalise ensuite toutes les combinaisons de mesures qu'il est possible de faire le long d'un profil d'électrodes disposées à intervalle régulier.

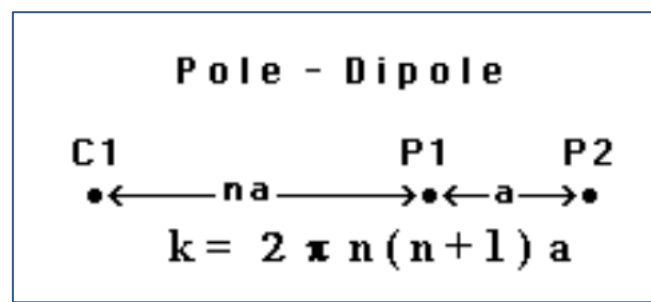


Figure 12 : Schéma du dispositif Pôle-Dipôle [Loke, 2010])

Par le caractère asymétrique des mesures, il est d'usage d'effectuer deux séquences de mesures, l'une dite directe et l'autre indirecte. Il s'agit simplement du côté où l'électrode de courant se situe lors des mesures. Les deux profils sont ensuite interprétés ensembles lors de l'inversion [Razafindratsima and Lataste, 2014].

Les investigations par Dahlin and Zhou [2004] ont été menées sur un éventail de 10 dispositifs différents. Des prospections ont été réalisées sur divers modèles de résistivité connus (ancien lit d'une rivière, un dyke, des blocks penchés et des coffrages de déchets) avec l'ensemble des dispositifs.

Le ratio de l'effet d'anomalie sur bruit et la fidélité du résultat par rapport au modèle géologique ont été examinés pour chaque dispositif.

Il a été montré, que malgré un rapport signal sur bruit plus précaire, le dispositif PD permettait d'obtenir une représentation fidèle à la réalité, notamment dans la représentation d'éléments présentant un pendage.

On remarquera, de plus, que quel que soit le dispositif, la sensibilité des mesures obtenues diminue avec la profondeur.

Enfin, la densité des données peut se caractériser par le nombre de quadripôles mesurés lié au nombre d'électrodes et l'espacement entre celles-ci. Il est montré que ces deux paramètres sont primordiaux dans l'obtention de résultats fidèles à la réalité et qu'ils doivent être ajustés à l'échelle des éléments recherchés (la plus haute résolution juste sous la surface étant le demi-espacement entre les électrodes).

Méthodes d'inversion *blocky* / *smooth*

L'acquisition des données brutes permet d'obtenir une pseudo-section de résistivité apparente. Il est nécessaire d'inverser cette pseudo-section afin de connaître le modèle géologique de résistivité qui en est à l'origine [voir Principes du panneau électrique]. Les détails mathématiques de l'inversion sont repris dans les travaux de Loke [2010].

Bien qu'on ne rappelle pas ici le raisonnement mathématique mobilisé dans l'inversion, il est nécessaire de noter qu'il existe deux méthodes distinctes. Loke et al. [2003] et Loke et Dahlin [2002] ont étudié ces deux méthodes et proposent la distinction suivante.

D'une part, l'inversion dite *blocky*, *robust* ou encore L1, minimise la valeur absolue de l'écart entre la résistivité mesurée et estimée. Elle permet de faire ressortir les variations brutales de résistivité entre deux zones mais aura tendance à créer artificiellement des transitions franches dans les zones à changement progressif de résistivité (par exemple du sableux vers l'argileux ou inversement).

D'autre part, l'inversion dite *smooth* ou L2, minimise le carré de l'écart entre la résistivité mesurée et estimée. Elle met en valeur les changements graduels mais a tendance à lisser les variations brutales de résistivité.

La Figure 13 montre un exemple d'inversion ERT d'un profil transversal à la rivière Magusi (Canada). On voit que dans le cas de l'inversion *smooth*, les valeurs de résistivité augmentent progressivement entre les alluvions et le socle sain, tandis que pour l'inversion *blocky*, on distingue deux environnements quasi-homogène avec une rupture nette entre les deux.

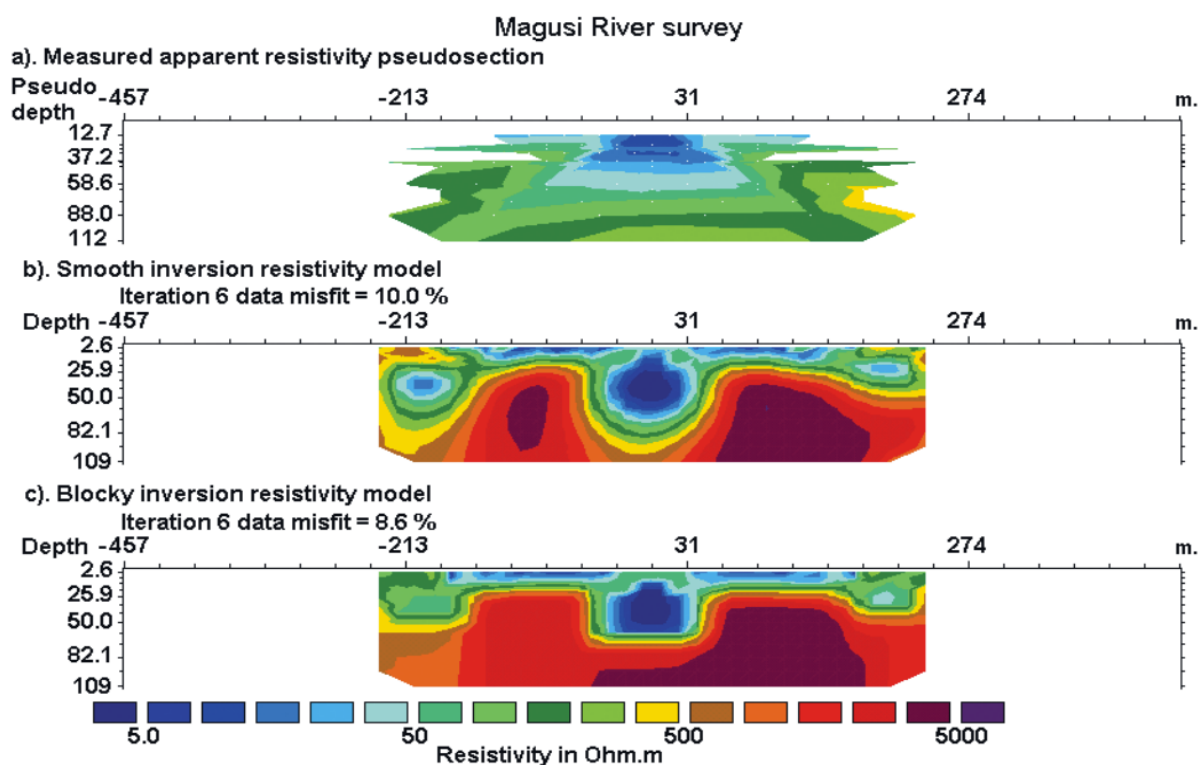


Figure 13 : Comparaison entre les inversions *smooth* et *blocky*. a) pseudo-section de résistivité apparente, b) inversion *smooth*, c) Inversion *blocky* [Loke et al., 2003].

Au regard des gammes de résistivité que l'on trouve dans les zones de socle et des variations 2D présentes, il est communément admis que l'inversion L1 dite *blocky* est la plus adaptée à l'interprétation des différentes structures qui composent l'aquifère.

Afin d'effectuer l'inversion d'un panneau, deux outils numériques peuvent être employés. RES2DINV est un logiciel payant qui a été jugé comme satisfaisant dans l'étude de Briški et al. [2020]. Mais il existe des outils libres et gratuits tels que pyGIMLi qui est notamment utilisé dans l'étude de Maurya et al. [2021].

Autres méthodes utilisées

Les méthodes « 1D »

Le trainé électrique est une méthode de prospection électrique 1D qui repose sur les propriétés de résistivité du milieu. Il permet de mesurer, le long d'un profil, la conductivité apparente [inverse de la résistivité apparente] du sous-sol sur une profondeur d'investigation de l'ordre du sixième au quart de la longueur du dispositif. Le résultat obtenu est directement exploitable afin de connaître les variations latérales de résistivité dans le sous-sol, comme la présence d'une fracture ou d'une zone localement argileuse [Kirsch, 2006].

Le sondage électrique permet de réaliser un log de résistivité électrique du sous-sol représentant la résistivité apparente en fonction de la profondeur. La profondeur d'investigation est proportionnelle à l'écartement entre les électrodes, allant du tiers au sixième de la taille du dispositif selon la configuration. Elle dépend aussi de la résistivité du sous-sol, par exemple, une faible résistivité en surface aura tendance à masquer les couches sous-jacentes. Après inversion et une connaissance a priori du nombre de couches présentes (dans l'hypothèse d'un sous-sol tabulaire) et de leurs résistivités, cette méthode permet de distinguer la profondeur et l'épaisseur des différentes couches.

Les méthodes 1D demeurent encore largement utilisées dans l'identification des sites potentiels d'implantation de puits AEP. En effet, elles sont simples à mettre en œuvre et peu coûteuses. De plus, la recherche de ces sites s'appuie encore sur l'hypothèse que les fractures subverticales sont des sites systématiquement productifs. En effet, le trainé électrique permet de repérer des variations latérales de résistivité pouvant être induites par la présence de fractures. En complément, le sondage électrique permet d'obtenir l'information sur la profondeur des couches dans le sous-sol [Kirsch, 2006].

Or, l'étude de Alle et al. [2018] démontre que ces méthodes sont impertinentes dans la recherche de sites potentiels. Il y est précisé qu'elles peuvent même induire en erreur lors de l'interprétation du sous-sol.

En effet, il est montré que l'inversion des données de sondages électriques s'appuie sur l'hypothèse d'un sol tabulaire, ce qui n'est pas le cas pour les zones de socle qui présentent des variations 2D de leur résistivité. Par ailleurs, les valeurs de résistivité obtenues manquent de précision et ne garantissent pas une distinction entre les différents horizons.

En ce qui concerne le trainé électrique, l'interprétation s'effectue à partir des variations relatives de résistivité le long d'un profil. Or, par exemple, une zone argileuse et une fracture, toutes deux de faible résistivité, peuvent être confondues. Cette méthode de prospection ne peut donc apporter qu'une information qualitative qui devra être confirmée par une méthode 2D telle que l'ERT.

Enfin, au regard de la controverse sur le rôle des fractures dans la productivité des forages, l'utilité du trainé devient nulle après avoir identifié que l'on ne s'intéresse plus aux variations latérales de résistivité pour identifier les sites potentiels.

Résonance Magnétique des Protons [RMP]

La résonance magnétique des protons repose sur le phénomène de précession des protons qui composent les molécules d'eau après excitation par un champ magnétique alternatif. La mesure du

champ magnétique induit après arrêt du champ excitant fournit des informations sur la teneur en eau et la porosité du milieu [Kirsch, 2006].

L'étude de Wynn et al. [2004] a notamment proposé une modélisation des aquifères de socle à l'aide de cette méthode de prospection. La méthode permet l'identification du toit de la nappe ainsi que la position et l'épaisseur des différents horizons.

Cependant, la RMP fournit des informations sur l'unique dimension verticale et n'est pas suffisante lors de la recherche de site potentiel de puits AEP. Elle se doit d'être complétée par un panneau électrique afin d'obtenir une bonne vision des structures en sous-sol. En réalité, l'utilisation de la RMP et de l'ERT ensemble pourrait s'avérer redoutable dans l'identification des sites potentiels à l'implantation des puits AEP.

Mais en réalité, le coût du matériel ne permet généralement pas aux bureaux d'études de réaliser les deux prospections. Par ailleurs, l'ERT fournit une quantité d'informations supérieure. La RMP seule ne s'avère pas être une méthode opérationnelle de prospection, elle est employée en recherche et en complément d'autres méthodes géophysiques.

Méthode sismique

Certains auteurs, notamment Holbrook et al. [2014] se sont intéressés à la réfraction sismique pour la caractérisation de l'horizon altéré en zone de socle. Cette méthode repose sur les propriétés de densité et d'élasticité du milieu mais aussi la porosité et le taux de saturation. Le principe est d'émettre un choc en un point donné puis d'observer, à l'aide de géophones placés le long d'un profil, les réponses en surface de la propagation dans le sol de l'onde résultante.

La méthode de réfraction s'appuie notamment sur l'analyse de la vitesse des ondes réfractées lors de la traversée d'une interface entre deux couches. Une inversion par tomographie permet alors de revenir aux propriétés intrinsèques des milieux, notamment la vitesse de propagation d'une onde mécanique propre à chaque couche. De la même manière que l'ERT, on obtient une représentation 2D du milieu suivant un profil donné.

Il est légitime de se demander quelle est la pertinence de la méthode ERT face à la méthode sismique. Il apparaît en effet dans les travaux de Holbrook et al. [2014] que ces deux méthodes permettent l'obtention de modèles similaires notamment dans l'identification des couches géologiques en place. Cependant, les dispositifs de panneaux électriques sont généralement plus simples à mettre en œuvre. Par ailleurs, la littérature compte davantage d'études utilisant l'ERT que d'études utilisant la méthode sismique dans l'étude des eaux souterraines. Enfin, les campagnes de prospection réalisées, notamment en Afrique, privilégient les panneaux électriques. Par conséquent, bien que la méthode sismique demeure intéressante, celle-ci ne sera pas abordée davantage ici. On peut cependant tout à fait imaginer une utilisation opérationnelle de cette méthode.

Méthode EM –VLF et TDEM

La méthode Very Low Frequency [VLF] repose sur l'induction d'un courant électrique dans le sol sous-jacent par des ondes électromagnétiques de basse fréquence. Ces ondes proviennent d'antennes de transmission militaires réparties sur la planète et ayant une portée continentale. Leur puissance peut atteindre plusieurs kilowatts. L'information mesurée est la somme du champ primaire émis par l'antenne et du champ induit émis par le sous-sol via les courants de Foucault. En observant la phase et l'amplitude du signal, tout en connaissant la nature du champ primaire, on peut revenir au champ induit, dit secondaire. La connaissance du champ induit permet de retrouver les caractéristiques du

sous-sol qui en sont à l'origine, notamment la propriété de résistivité électrique. En outre, la profondeur d'investigation du dispositif dépend des propriétés de résistivité des matériaux sous-jacents [Kirsch, 2006]

Cette méthode est intéressante pour cartographier les valeurs de résistivités apparentes d'une grande zone géographique et identifier les zones de faible résistivité [Sharma and Baranwal, 2005]. L'objectif d'une telle prospection est l'identification des fractures. Or, nous avons vu que les fractures ne sont pas forcément des sites favorables à l'implantation de puits AEP et font controverse auprès de la communauté scientifique [voir chapitre sur les Linéaments et fractures].

D'un autre côté, les travaux menés par Osinowo and Olayinka [2012] montrent que cette méthode de prospection peut être employée pour identifier les différentes structures géologiques à plus grande échelle telle que des changements de lithologie.

La méthode Time Domain Electromagnetic [TDEM] repose, elle-aussi, sur l'induction de courant de Foucault dans le sous-sol. Cependant, l'émission du champ EM primaire et la mesure du champ EM secondaire se font par intermittence. Dans un premier temps, le champ primaire est émis de manière continue. Dans un second temps, le champ primaire est arrêté brusquement. La réponse des dipôles magnétiques présents dans les sols, constitués d'ions ou de métaux, est enregistrée. Dès lors, cette réponse est fonction de la résistivité et de la profondeur du sol sous-jacent.

La méthode TDEM est intéressante dans la mesure où elle est d'une grande praticité opérationnelle, elle peut notamment être hélicoptérée et permettre la cartographie d'une zone conséquente en un temps minime.

Micro-gravimétrie

La gravimétrie est une méthode qui repose sur l'étude des variations de la masse volumique dans le sol sous-jacent. Elle permet notamment de repérer l'anomalie dites de Bouguer relative à des défauts ou des excès de masse en profondeur. La gravimétrie peut, par ailleurs, être utilisée pour étudier les modifications de pesanteur au cours du temps notamment lors de la variation du niveau de nappe [Kirsch, 2006]

Cette méthode est notamment utilisée dans les travaux de Creutzfeldt et al. [2010] et Hector et al. [2013]. Il y est démontré la pertinence de cette méthode dans le suivi saisonnier d'aquifère de socle afin d'étudier le suivi de la recharge.

Cette méthode présente un intérêt certain dans la caractérisation de la recharge des aquifères et offre des perspectives d'étude. Cependant, il est difficile de considérer cet outil de manière opérationnelle dans la mesure où le rapport coût/bénéfice d'un tel appareil est trop élevé.

ZONE D'ETUDE DU GUERA – REGION DE BITKINE

Contexte géologique et hydrogéologique

La région du Guéra, située au centre du Tchad, s'étend entre 10° et 14° Nord et entre 18° et 20° Est et couvre une superficie de 23 262 km². La zone est peuplée d'environ 550 000 habitants [INSEED, 2009], répartis dans 700 villages. Elle est subdivisée sur le plan administratif en quatre départements : Abtouyour, Guéra, Bahr Signakha et Mangalmé.

Le climat de la région est du type sahélo-soudanien (430 à 867 mm/an). Les mois de juillet et août totalisent 60 à 70% des pluies. La faible couverture végétale ainsi que les reliefs font que le ruissellement est dominant par rapport à l'infiltration au niveau des plateaux et versants.

Le contexte géologique de la région de Bitkine se compose de roches de socles plutoniques en grande partie. Celles-ci ne sont pas les mêmes partout, on retrouve des granites, granites à biotites, diorites, granodiorites et dolérites.

De cette variété de lithologies, on remarquera deux familles de roches de socle dans la zone d'étude, dont la classification a été faite sur la propension de celles-ci à la formation de fissures subhorizontales en profondeur :

- Les diorites, granodiorites et dolérites produisent de grande quantité d'argiles en s'altérant ce qui diminue la capacité d'infiltration, la conductivité hydraulique et donc la productivité des forages.
- Les granites à biotite sont favorables au développement d'horizons fissurés dont l'altération produit des sables peu argileux et qui permettent des débits de pompage supérieurs.

La carte géologique de Bitkine est présentée en Figure 14 et est issue de [Nouradine et al., 2023].

Ces lithologies permettent à priori la formation d'aquifère de socle suivant le modèle que nous avons décrit



Figure 14 : Carte géologique de la région de Bitkine.

Campagnes de mesures antérieures [9^{ème} FED/ 10^{ème} FED]

La région du Guéra a connu plusieurs campagnes de prospections soutenues par des programmes internationaux. On peut notamment citer les Programmes Hydraulique Pastoraux au Tchad Central 1 et 2 [ANTEA, 2016, 2008] ainsi que le 9^{ème} FED et le 10^{ème} FED.

Les Programmes Hydrauliques Pastoraux au Tchad Central [ANTEA, 2016, 2008] rassemblent des données de forages, de pompages d'essai et des sondages électriques suivant la pertinence des sites. Ils ont permis une meilleure connaissance géologique de la région.

Cependant, les campagnes qui nous intéressent le plus dans nos travaux sont celles du 9^{ème} et 10^{ème} FED menées par Egis dans les régions du Guéra et du Batha. En effet, le programme a réalisé des prospections sur l'ensemble des localités du Guéra prévoyant a minima un forage par localité. La

validation des sites potentiels ayant été, au préalable, confirmée par des panneaux électriques, ces données permettent de corréler les interprétations des panneaux aux logs de forage.

Il faut cependant noter que les sites ont été choisis d'après les résultats d'un traitement des linéaments par télédétection dans l'objectif d'identifier des fractures productives. Or nous avons vu dans le chapitre Linéaments et fractures que l'impact de ces formations dans la productivité des forages est controversé. Par conséquent, les résultats que nous obtiendrons au regard de la productivité des puits AEP seront biaisés.

Controverse à part, un modèle conceptuel des divers résultats des tomographies ERT a été développé par le 9^{ème} FED [Figure 15, ci-dessous].

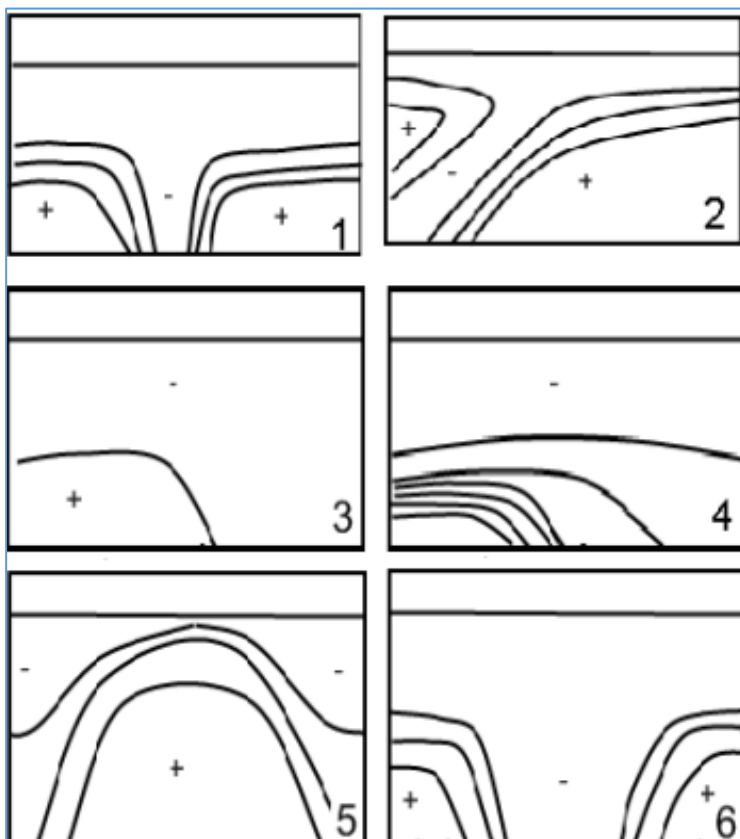


Figure 15 : Schémas de structures observées sur les panneaux lors du 9^{ème} FED.

Les signes + localisent les zones résistantes et les – les zones conductrices.

Avec :

1. Structure fermée subverticale : présence d'un conducteur localisé entre deux encaissants résistants,
2. Structure fermée avec pendage : structure interprétée de la même manière que la fracture subverticale,
3. Structure ouverte,
4. Structure à gradient lâche : structure ne montrant pas de contrastes verticaux francs et de grandes amplitudes,
5. Structure massive,
6. Structure à zone conductrice large.

Il est indiqué dans le rapport que tous les sites ne rentrant pas dans l'un de ces schémas se sont révélés négatifs. Mais, la méthode consistait en l'implantation d'un forage lorsqu'il y a présence d'une fracture. Par conséquent, aucune analyse n'a été faite sur la productivité des forages suivant les 6 modèles de résistivité.

On peut malgré tout retenir que le taux de succès rencontré lors de la campagne du 9^{ème} FED, c'est-à-dire des forages ayant un débit supérieur à 0,7 m³/h, est estimé entre 40 et 48 %. De plus, il est énoncé que le taux de réussite varie grandement suivant l'orientation des fractures et la topographie, avec des forages plus productifs en basse altitude.

Le 9^{ème} FED fournit une base de données géologiques et hydrogéologiques exhaustive avec 798 forages, 700 profils EM34 et 592 panneaux électriques sur la région du Guéra et du Batha. Ces données englobent les coordonnées géographiques des forages, l'état de l'ouvrage, la position des crépines, la profondeur du massif filtrant, le débit de développement, le débit de foration et de pompage par paliers, le niveau piézométrique (rabattement et niveau statique), la profondeur du socle sain, la profondeur totale du forage, les logs de foration, ainsi que les profils et panneaux électriques avec leurs coordonnées géographiques.

Notre travail s'appuiera sur l'ensemble de ces données.

Méthodologie & résultats de la thèse d'Haroun Nouradine

Les travaux de Nouradine et al. [2023] portent sur l'analyse des données du 9ème FED de la région du Guéra et plus précisément des bassins de Barlo et Mongo. L'objectif était d'établir un modèle conceptuel de l'aquifère de socle puis d'expliquer la productivité des forages suivant ce modèle dans la perspective d'implantation future de forages AEP productifs.

Paramètres

La base de données se compose de forages et de panneaux électriques. Les 15 paramètres retenus dans la thèse de H. Nouradine afin de caractériser les aquifères de socle sont les suivants :

Tableau 2 : Paramètres utilisés dans la description de l'aquifère de socle.

Paramètre	Description
Z (m)	Altitude
Qd (m3/h)	Débit de développement
TCO (m)	Epaisseur de recouvrement
THA (m)	Epaisseur de l'horizon altéré
QHA (m)	Débit de l'horizon altéré extrait du débit de foration suivant la profondeur
THF (m)	Epaisseur de l'horizon fissuré
QHF (m)	Débit de l'horizon fissuré extrait du débit de foration suivant la profondeur
T(CO+HF) (m)	Somme des épaisseurs de l'horizon altéré et fissuré
TCOC (m)	Epaisseur du recouvrement argileux
T(CO+HA) (m)	Somme de recouvrement et épaisseur de l'horizon altéré
DBHR (m)	Profondeur de formations meubles
DT (m)	Profondeur totale
Ω_{m_CO} (Ohm.m)	Résistivité de recouvrement
Ω_{m_HA} (Ohm.m)	Résistivité de l'horizon altéré
Ω_{m_HF} (Ohm.m)	Résistivité de l'horizon fissuré

Ces notations seront utilisées dans la suite du présent document.

Interprétation des panneaux électriques

Une première étape du travail a consisté en la sélection des forages et des panneaux qui présentaient des données complètes.

Par la suite, Nouradine a procédé à la réinterprétation des panneaux électriques dans la région de Mongo et de Barlo. Il a notamment appliqué une méthode d'inversion *blocky*.

Une classification en 4 modèles de profils a été extraite de l'ensemble des inversions. Ces quatre modèles sont désignés par A, A*, B et C :

- A : Recouvrement, horizons altéré et fissuré bien développés et roches saines.
- A* : Modèle A + fine couche résistante en surface.
- B : Quasi-absence de recouvrement, l'altération est peu ou pas développée sur l'ensemble du profil ou à l'aplomb de l'ouvrage.
- C : Altération peu développée et discontinuité verticale ou latérale des horizons limitant la recharge latérale de la nappe.

Il est montré que les modèles A et A* sont les plus susceptibles d'offrir des débits de pompage élevés, car ils ont une épaisseur des horizons altérés et fissurés satisfaisante. Cependant, la présence d'argile dans les couches supérieures de recouvrement ou des altérites aura tendance à empêcher la recharge de la nappe, car ces couches sont peu perméables.

La Figure 16, ci-dessous, présente des exemples de panneaux électriques pour les 4 modèles énoncés ci-dessus.

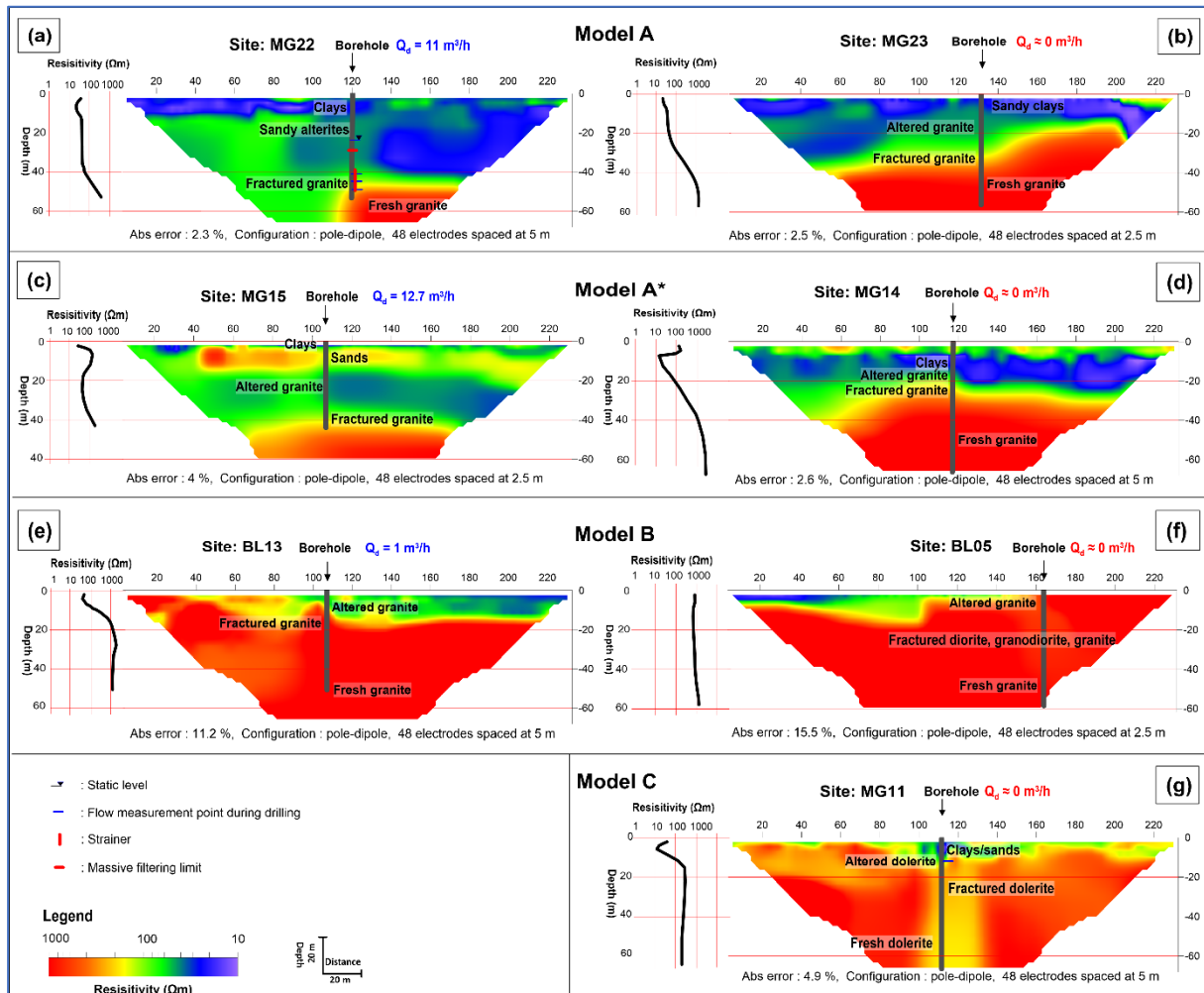


Figure 16 : Tomographie de Résistivité Electrique suivant les modèles A, A*, B et C. Avec à gauche des forages productifs et à droite des forages non productifs [Nouradine et al., 2023].

Analyse statistique

Par ailleurs, Nouradine a réalisé une analyse statistique des données de foration et des débits par Analyse en Composantes Principales (ACP) dont on peut retrouver la théorie dans le cours de Duby and Robin [2006]. L'objectif est d'observer des corrélations qui ne sont pas visibles a priori entre les différents paramètres de l'aquifère de socle et la productivité des puits AEP.

Il a notamment montré que les forages productifs présentaient :

- Une profondeur de foration $DT < 80 \text{ m}$. Au-delà les frais de forage deviennent trop importants pour de maigres résultats,
- Une épaisseur de recouvrement $TCO < 20 \text{ m}$ lorsque celui-ci est perméable,
- Une épaisseur d'horizon altéré $10 \text{ m} < TCA < 35 \text{ m}$.

- Un horizon fissuré n'allant pas au-delà des 30 mètres, ensuite la densité des fissures diminue et la productivité des forages aussi.
- Une basse altitude car présent dans les zones de recharge préférentielle.
- Des résistivités des horizons altérés (Ωm_{HA}) et fissurés (Ωm_{HF}) faibles. En effet, cela caractérise un état avancé d'altération.

Nous proposons dans le présent document de réaliser la même étude mais aux abords de la ville de Bitkine à l'Ouest des bassins de Mongo et Barlo. L'objectif était de compléter les résultats de la thèse de Nouradine tout en étoffant la connaissance géologique et hydrogéologique de la zone.

ANALYSE DES DONNEES DE LA REGION DE BITKINE

DONNEES DISPONIBLES ET QUALITE DES DONNEES

Zone d'étude

Etant donné les enjeux de l'ONG SEVES, nous nous intéressons aux forages présents aux alentours de Bitkine sans prendre en compte la délimitation des bassins versants.

Une seconde partie de l'étude reprend les données des bassins versants de Mongo et Barlo traitées par H. Nouradine afin de compléter le travail d'analyse de la région du Guéra.

La Figure 17, ci-après, montre en rose la délimitation de la zone d'étude. Nous y avons représenté les bassins versants de Mongo et Barlo et la région du Guéra dans son ensemble.

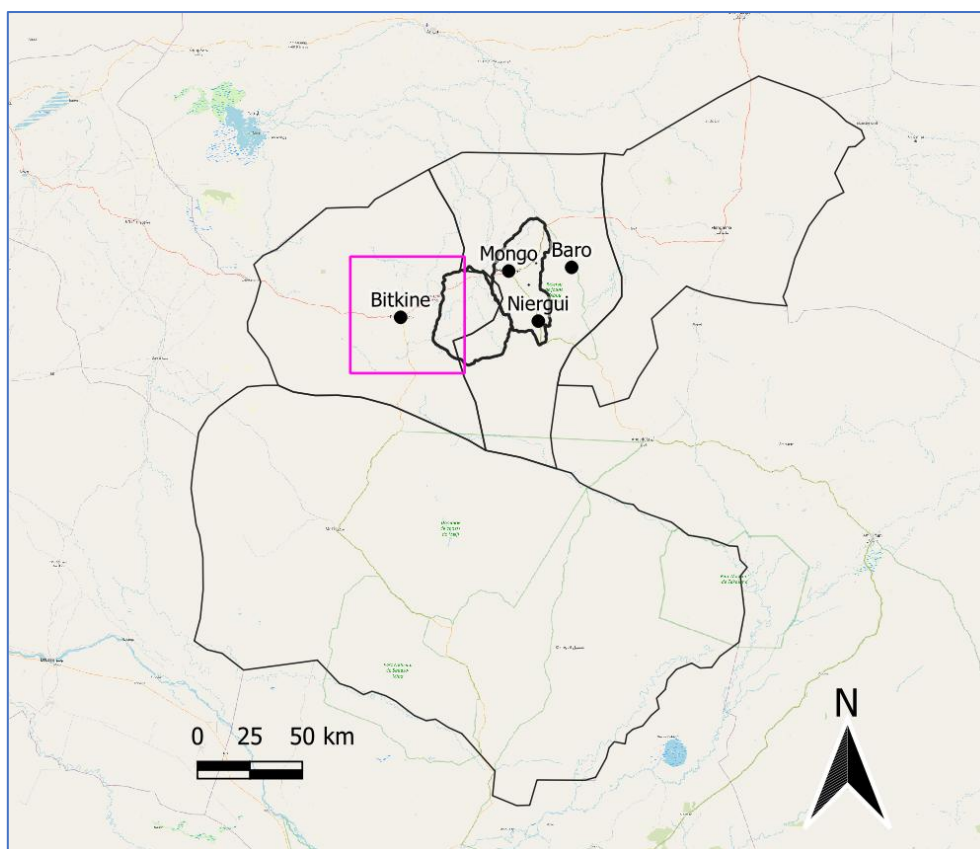


Figure 17 : Carte de la zone d'étude, zone d'étude en rose, bassin de Barlo et Mongo en noir épais, région du Guéra en noir fin.

Validation des données

Les données nous ont été fournies par H. Nouradine. Elle comporte un tableau recensant l'ensemble des forages de la zone mais de nombreux forages ont des données lacunaires.

Un forage est retenu pour l'analyse lorsqu'il présente :

- Position GPS,
- Débit,
- Lithologie et profondeurs associées.

En complément, nous utilisons lorsque présentes les informations concernant les :

- Profondeurs d'arrivée d'eau et leurs débits,
- Niveaux statiques,
- Profondeur de changement de la tête de forage du rotary vers le marteau fond de trou,
- Débit maximum par palier et rabattements nous fournissant le débit spécifique,
- Conductivité de l'eau,
- Altitude.

Par ailleurs, H. Nouradine nous a fourni les données brutes des panneaux électriques.

Celles-ci sont retenues lorsqu'elles comportent :

- Les données Direct at Reverse du dispositif Pôle-Dipôle associé.
- Les coordonnées des électrodes 1 et 48.

Nous avons retenu en complément la position de l'électrode à l'infini afin d'expliquer l'anisotropie des pseudo-sections de résistivité apparente des panneaux.

A l'aide des coordonnées des panneaux et des forages, nous avons calculé la position de la projection du forage sur le panneau [notée X sur la Figure 18 ainsi que la distance orthogonale du forage par rapport au panneau [notée H sur la Figure 18.

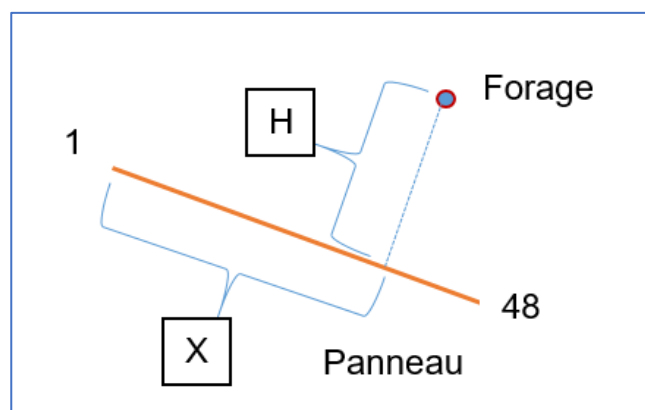


Figure 18: Représentation schématique des longueurs employées dans la validation et le traitement des données de forage et d'ERT.

La longueur des panneaux étant de 240 mètres, lorsque la valeur de H est supérieure à 50 mètres, nous avons considéré le couple forage/panneau comme non valide. Ce choix est arbitraire mais cohérent avec la taille caractéristique des structures retrouvées dans les panneaux de manière générale.

Dans la zone d'étude sont présents un total de 95 forages réalisés par les programmes des 9^{ème} et 10^{ème} FED ainsi que par l'UNICEF.

Parmi eux, 43 forages sont associés à des données de panneaux électriques. Sur ces 43 forages, 37 forages sont positionnés de manière cohérente sur ces panneaux électriques. On compte au total 35 panneaux éligibles sur la zone.

Ce travail a été réalisé par H. Nouradine sur les bassins de Barlo et Mongo, à côté de la région de Bitkine. A l'issue du même travail de sélection, nous avons obtenu 24 couples forages/panneaux supplémentaires qui seront aussi employés dans l'analyse de nos résultats.

REPRESENTATION DES DONNEES

Afin de procéder à l'analyse des données de forages et des panneaux électriques associés, nous avons représenté les deux côte à côte. De plus, nous avons ajouté les valeurs de la résistivité au droit du forage, calculées à partir des données du panneau. Les trois représentations comportent le même axe des ordonnées, c'est-à-dire la profondeur.

Au regard du nombre de sites, ce travail est particulièrement laborieux. Par conséquent, nous avons développé un programme sous Python qui prend en entrée le tableau de données des forages, les panneaux inversés et la position des forages le long des profils. En sortie, nous obtenons la représentation de l'ensemble, des panneaux dans un fichier PDF. Il n'y a plus qu'à les interpréter.

Le développement de ce programme nous a permis par la suite de réaliser la représentation et l'interprétation d'un grand nombre de panneaux.

La Figure 19, ci-dessous donne un exemple de représentation d'un couple forage/panneau. Le débit max de l'essai par paliers, le débit de développement et le débit spécifique sont affichés et caractérisent la productivité du forage. Les descriptions du panneau, du log de forage et du log de résistivité sont faites dans la suite de ce chapitre.

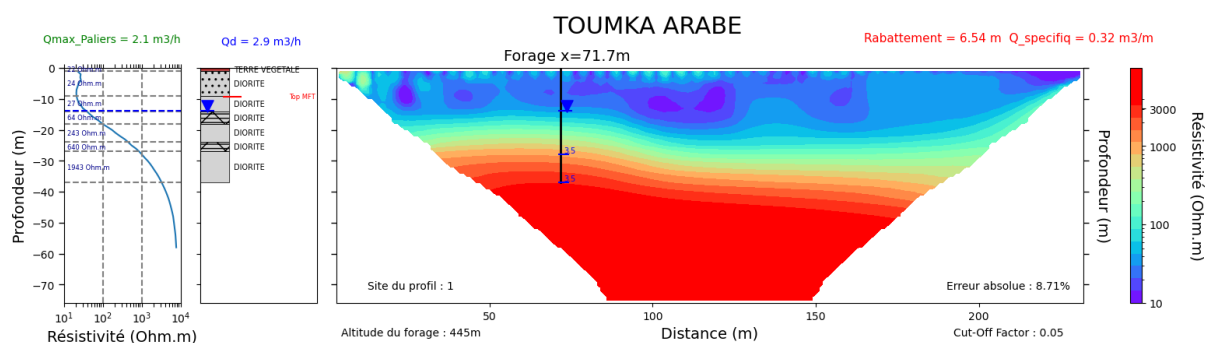


Figure 19 : Exemple de représentation d'un couple forage/panneau.

Représentation du panneau

Les panneaux de résistivité électrique, suite à l'inversion de la pseudo-section de résistivité apparente, sont représentés dans un repère orthonormé avec en abscisse la position le long du profil et en ordonnée la profondeur. Puisque les panneaux ont été réalisés sur des profils de pentes toujours inférieures à 1%, nous n'avons pas trouvé pertinent d'ajuster la topographie le long du panneau.

Par ailleurs, la représentation par contours pleins des valeurs de la résistivité électrique est obtenue par interpolation linéaire sur un maillage métrique des résultats de l'inversion. La gamme colorimétrique varie de 10 Ωm [en violet] à 4 000 Ωm [en rouge]. Ce choix se justifie par les gammes de résistivité abordée dans le chapitre Panneau électrique et modèle de résistivité en zone de socle.

L'ensemble des panneaux présente des profondeurs d'inversion hétérogènes. Par conséquent, nous avons fixé la profondeur de l'ensemble des représentations à 76 mètres, qui est en réalité la valeur maximale observée. Ainsi, il peut y avoir une absence de valeurs en profondeur pour certains panneaux.

La Figure 20, ci-dessous, montre l'exemple d'une représentation d'un panneau.

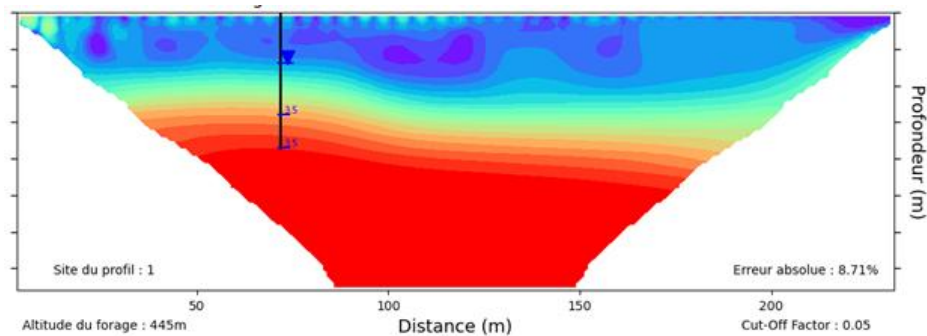


Figure 20 : Exemple d'un panneau de résistivité électrique

Par-dessus le panneau, nous avons représenté le forage à la position projetée le long du profil et s'arrêtant à la profondeur de foration, accompagné du niveau statique, des arrivées d'eau et des débit correspondants.

On remarquera de plus, la présence de l'erreur absolue, du *cut-off factor* employé dans l'inversion, du site correspondant et de l'altitude du forage.

Représentation du log de forage

La représentation du log de forage a été effectuée suivant une seule dimension verticale suivant 3 variables : la profondeur de la couche, sa lithologie et l'altération de la lithologie. La Figure 21 offre un agrandissement sur la zone dédiée au log de forage.

L'axe des ordonnées est le même que celui des panneaux précédemment décrits.

Chaque couche est représentée par un rectangle allant du toit au pied de la couche. La lithologie est différenciée par la couleur du rectangle et rappelée à droite de celui-ci par une étiquette.

Parmi les altérations relevées, il y avait :

- Recouvrement,
- Altéré,
- Très altéré,
- Fissuré ou fracturé,
- Altéré / Fracturé ou altéré / microfissure,
- Microfissure,
- Sain.

Nous avons donc choisi types de figurés :

- Gros points : recouvrement
- Petits points : altéré et très altéré
- Lignes horizontales et obliques : fissuré, fracturé, microfissure
- Lignes horizontales et obliques + petits points : formations à la fois altérées et fracturées
- Aucun figuré : roche saine.

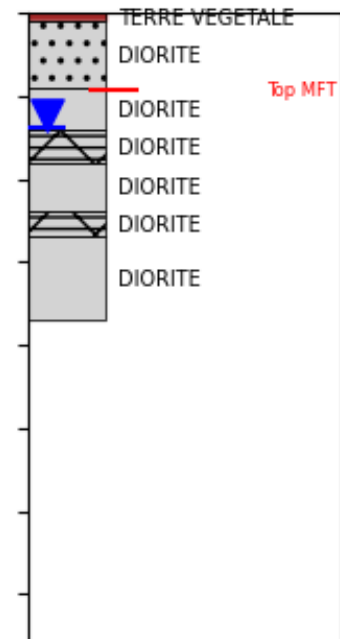


Figure 21 : Exemple de
représentation du log de forage

Nous avons ajouté le niveau statique ainsi que la profondeur de la première utilisation du marteau fond de trou. On suppose en effet que le changement d'outil est dû au changement d'état de la lithologie vers une couche plus résistante et donc plus saine. On remarquera, cependant, que les panneaux et forages ayant été réalisés à plusieurs mois d'intervalle, la profondeur du niveau statique lors de la réalisation du panneau peut être différente de celle relevée lors du forage.

Représentation de la résistivité au droit du forage

Nous avons voulu distinguer plus clairement les valeurs de résistivité au droit du forage. Pour cela, nous avons développé un programme permettant d'obtenir les valeurs de résistivité interpolées à partir du panneau à la position exacte de la projection du forage au décimètre près.

Ensuite, nous avons représenté ces valeurs dans un repère semi-logarithmique. Il possède la même ordonnée que les deux autres figures, c'est-à-dire la profondeur, et la résistivité est, elle, représentée suivant une échelle logarithmique de base 10. La gamme des abscisses est la même pour tous les forages : 10 à 10 000 Ωm .

La Figure 22 montre un exemple d'une telle représentation. Afin de faciliter l'interprétation et d'en affiner le résultat, nous avons représenté par des pointillés horizontaux les changements de couche et le niveau statique. De plus, nous avons calculé et affiché la moyenne arithmétique des résistivités de chaque couche, obtenue à partir des valeurs de la courbe des résistivités au droit du forage.

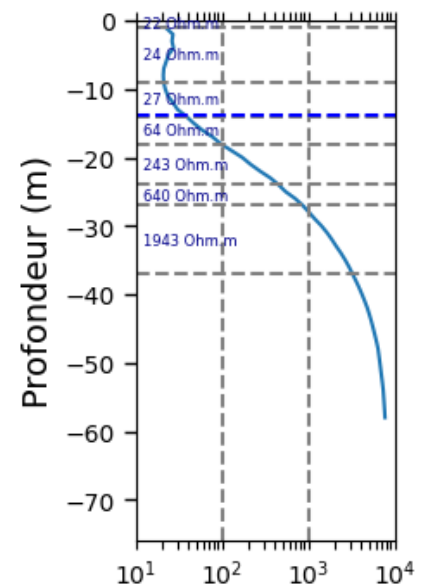


Figure 22 : Exemple de représentation de la résistivité au droit du forage.

CHOIX DES PARAMETRES D'INVERSION

Invariables

Dans l'ensemble des inversions que nous avons effectuées, une partie des paramètres est restée la même pour toutes les inversions, notamment :

- La méthode d'inversion des moindres carrés utilisée est la méthode Gauss-Newton Standard.
- Le calcul numérique est réalisé suivant la méthode des éléments finis sur un maillage le plus fin possible.
- Le *damping factor* qui caractérise la vitesse de convergence et permet notamment de contrôler les divergences lors de l'inversion. Celui-ci était fixé à 0,16 et pouvait lors de cas exceptionnel d'une divergence ou d'une inversion aberrante être porté à 0,25.
- La valeur de *flatness ratio* est de 1.
- La limite de convergence est atteinte lorsque la variation de l'erreur est inférieure à 1%.
- Le nombre maximum d'itérations est de 10 sauf lorsque l'erreur demeure supérieure à 5%. Dans ce cas-là, nous poussons le nombre d'inversion jusqu'à atteindre la convergence ou une erreur satisfaisante.

Lorsqu'ils ne sont pas explicitement testés, les paramètres de bases sont les suivants :

- La version de RES2DINV utilisée est la 4.1.
- La Valeur de *cut-off factor* de 0,05.
- L'écartement horizontal des blocs est de la moitié de l'écartement des électrodes.
- L'option *extended* n'est pas employée.

Paramètres testés

Ayant automatisé la représentation des panneaux et des forages, nous avons pu réaliser un grand nombre d'inversions, en faisant varier différents paramètres. L'objectif de ce travail était de déterminer si certains paramètres permettaient d'obtenir une meilleure corrélation des données géophysiques aux données de forage.

Nous avons également testé deux versions de RES2DINV : les versions 3.5 et 4.1.

Ce logiciel offre la possibilité de calculer la section inversée sur un modèle de blocs deux fois plus dense que la densité des électrodes de mesures dans la direction horizontale. Ce qui permet d'artificiellement doubler le nombre d'électrodes du panneau mesuré. Cette option est d'ailleurs recommandée dans le cas des dispositifs Pôle-Dipôle. Nous l'avons donc testé sur l'ensemble des panneaux.

De plus, un traitement des données de résistivité apparente en amont, proposé par PROSYS 2 du nom de *automatic filtering*, a été testé sur une dizaine de panneaux avant de conclure que ce traitement n'est pas pertinent dans l'obtention de résultats issus du terrain et pour l'explication des données mesurées.

En termes de paramètre d'inversion à proprement parler, les inversions ont toutes été réalisées à la norme L1 c'est-à-dire *blocky* ou *robust*. Nous avons regardé l'influence du *cut-off factor* sur l'ensemble des panneaux.

Enfin, les inversions *robust* ont tendance à former des blocs résistifs isolés afin de diminuer l'erreur absolue et qui n'ont pas de réalité physique. Donc nous avons observé les résultats d'une inversion dite *extended* qui permet de calculer des valeurs sur un maillage plus étendu et d'atténuer les divergences de résistivité lors de l'inversion.

Les sections suivantes présentent l'analyse de sensibilité de ces différents paramètres.

Les 2 versions de RES2DINV

Nous avons eu l'opportunité de travailler avec deux versions de RES2DINV qui sont la 3.5 et la 4.1. La 4.1 étant plus récente que la 3.5 nous nous attendions à obtenir des inversions de meilleure qualité. Nous avons cherché à qualifier l'apport de la nouvelle version par rapport à la précédente.

Il est à noter que RES2DINV prend en compte que la sensibilité des dispositifs Pôle-Dipôle n'est pas maximale à l'aplomb du centre mais légèrement excentrée sous les électrodes de mesure et l'électrode d'injection du courant.

Nous avons donc testé les deux versions de RES2DINV avec les paramètres énoncés dans le chapitre 0.

Comme attendu, la version la plus récente de RES2DINV [4.10] permet d'obtenir des résultats expliquant les données avec une erreur plus faible. En effet, la moyenne de l'erreur pour les 35 panneaux est de 6,3% avec la version 3,5 et de 4,9% avec la version 4.10.

De plus, le calcul de l'inversion est réalisé sur un maillage parfois plus profond d'une dizaine de mètres avec la version 4.1.

On ne remarquera cependant aucune différence significative entre les deux versions pour un même panneau. La Figure 23, ci-dessous, montre le même panneau du site 1 du village Toumka Arabe pour les deux versions de RES2DINV

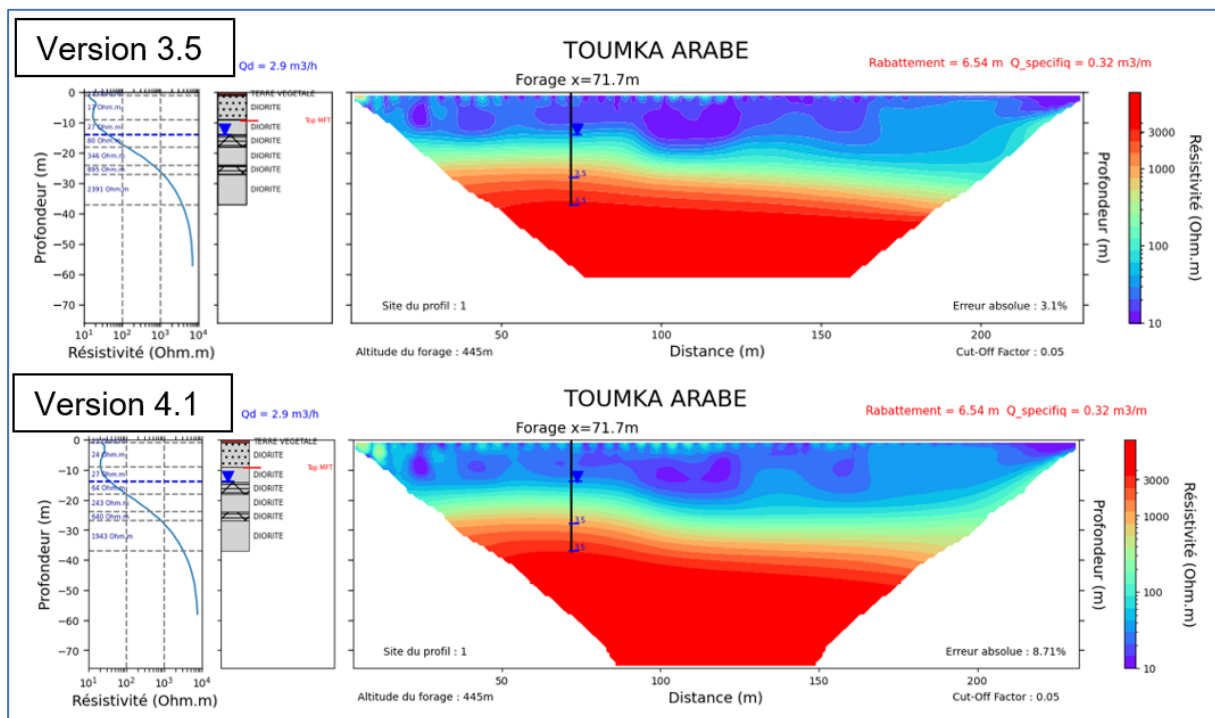


Figure 23 : Exemple de comparaison des inversions entre les versions de RES2DINV (en haut la version 3.5, en

Densité horizontale du maillage

Le logiciel RES2DINV offre la possibilité de choisir un espacement horizontal des blocs d'inversion :

- soit égal à l'espacement des électrodes [la largeur des éléments finis correspond à l'espacement des électrodes],
- soit à la moitié de l'espacement des électrodes [la largeur des éléments finis correspond à la moitié de l'espacement des électrodes].

L'affinage du maillage est d'ailleurs recommandé pour le dispositif Pôle-Dipôle.

Lorsque la taille horizontale des éléments est égale à la moitié de l'espacement des électrodes, le maillage est deux fois plus dense suivant l'horizontal. La densité verticale des blocs s'en retrouve elle aussi augmentée de 33 %.

Le nombre total de blocs est multiplié par 2,7. La première conséquence est une augmentation du temps de calcul pour chaque panneau.

La Figure 24, ci-dessous, montre les deux possibilités de maillages proposés par RES2DINV.

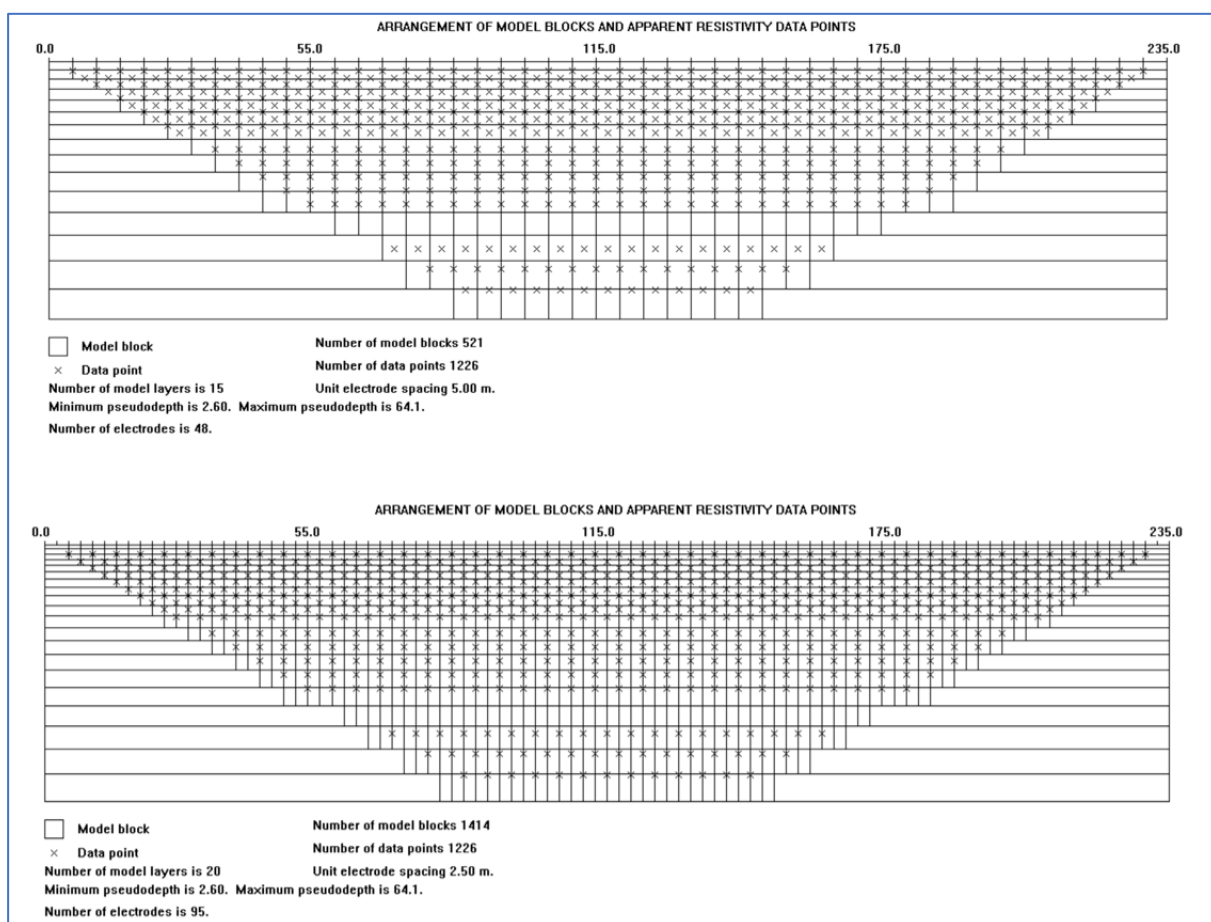


Figure 24 : Position des blocks pour un espacement horizontal égal à l'espacement des électrodes (en haut) et à la moitié de l'espacement des électrodes (en bas).

Il s'agit du paramètre ayant la plus grande influence dans nos tests. Les inversions avec un espacement simple ont une erreur moyenne de 3,6%, contre 4,9% pour l'espacement moitié.

La Figure 25, page suivante, montre les résultats d'inversion pour les deux densités de maillage différentes.

Cependant le côté *blocky* ressort fortement sur les inversions en espacement simple. À tel point qu'il n'est pas toujours aisé de donner un sens physique aux résultats obtenus.

D'un autre côté, l'espacement de moitié présente des petites ondulations en surfaces qui n'ont pas de sens physique. Cependant, elles n'ont pas d'influence réelle d'interprétation des panneaux dans le contexte de l'étude.

Dans l'ensemble, l'utilisation d'un maillage fin pour les inversions est plus pertinente pour le contexte de notre étude en contexte de zone de socle.

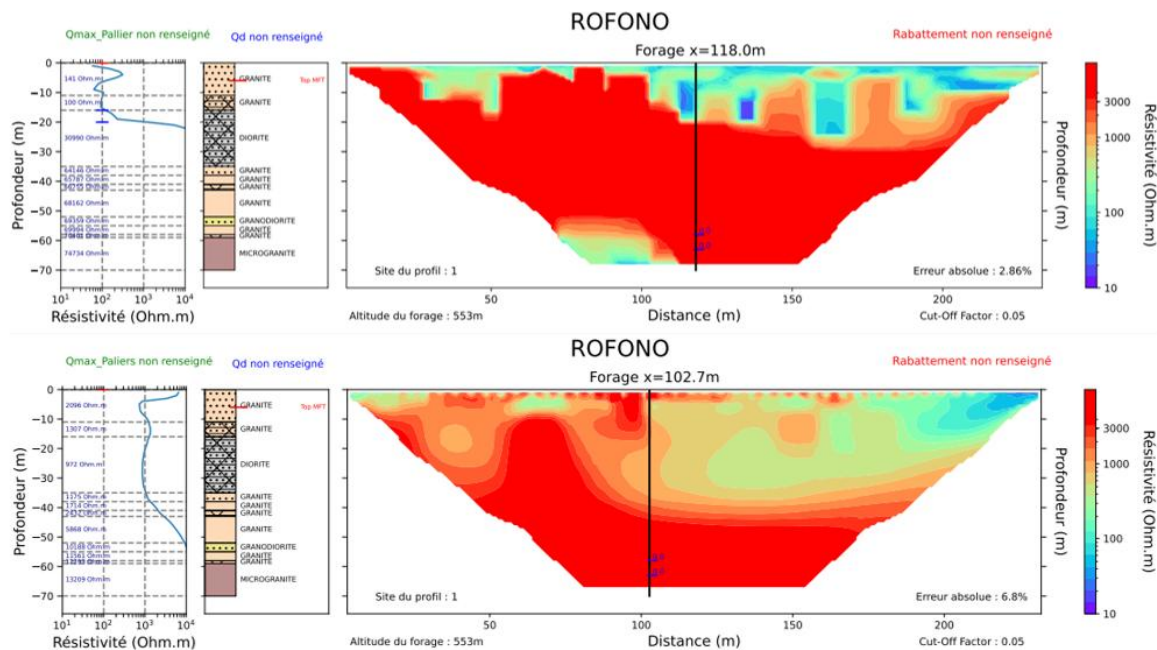


Figure 25 : Exemple d'une inversion avec un maillage ayant un espacement horizontal de la valeur de l'espacement des électrodes en haut et de la moitié de la valeur de l'espacement des électrodes en bas.

Cut-off factor

Toujours dans l'objectif d'affiner nos inversions au cas particulier de la zone de socle, nous nous sommes intéressés au *cut-off factor*.

Ce paramètre caractérise la sensibilité du blocage de l'inversion, c'est le facteur de coupure qui rendra l'inversion d'autant plus *blocky* qu'il est faible. Pour rappel, pour notre étude, nous travaillons avec un facteur de 0,05 qui est aussi la valeur maximale testée. Nous avons testé ce qu'il se passe lorsqu'on le diminue par 10, c'est-à-dire 0,005. L'objectif était notamment d'observer si de cette manière on pouvait forcer le modèle à faire apparaître la frontière entre l'horizon altéré et l'horizon fissuré.

Les résultats n'ont pas révélé de différence majeure lorsqu'on diminue le *cut-off factor*. Par conséquent, ce paramètre n'est pas véritablement décisif dans l'inversion en zone de socle. Un exemple est disponible page suivante au sein de la Figure 26.

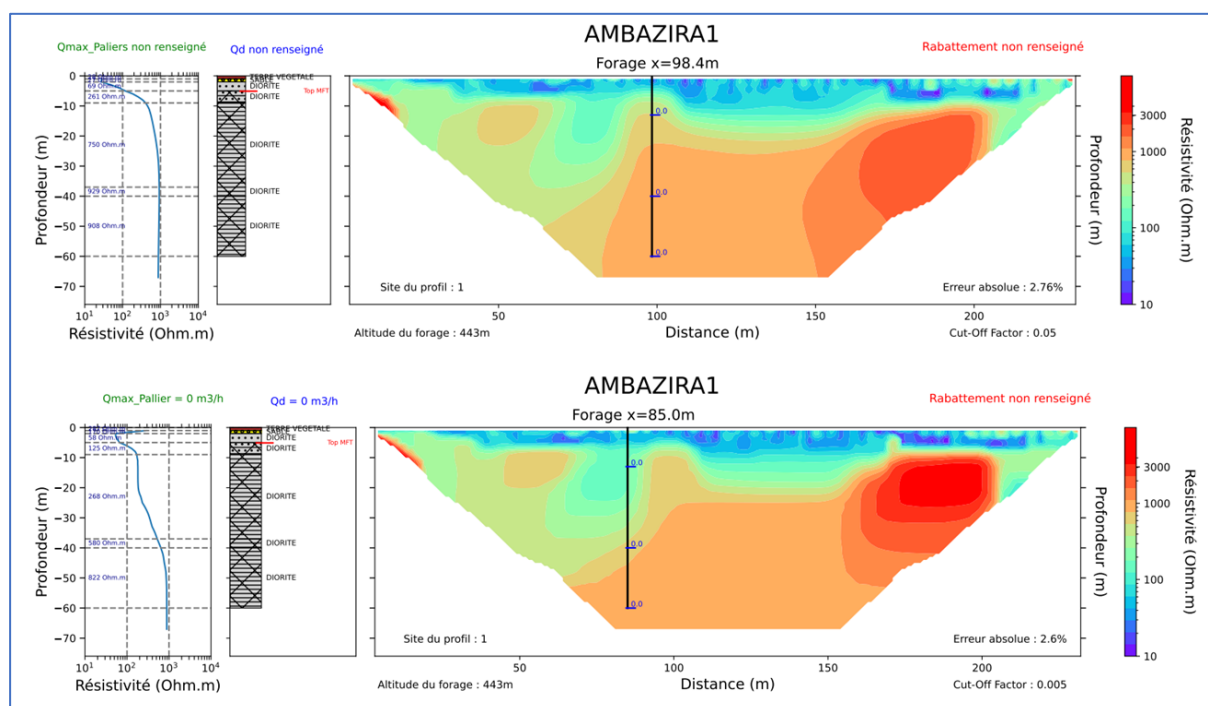


Figure 26 : Exemple d'inversions obtenues avec un cut-off factor de 0.05 [en haut] et de 0.005 [en bas].

Le modèle *extended*

Il arrive dans certaines inversions que la résistivité calculée diverge ou que se forment des blocs de résistivité n'ayant pas de réalité physique. Le processus d'inversion, purement mathématique, peut tendre à faire apparaître ces erreurs. Ceci pour expliquer au mieux les données et minimiser l'erreur lors de la résolution directe des données inversées avec les données brutes. Théoriquement, élargir le nombre de points de calcul lors de l'inversion peut permettre de diminuer les contraintes en bord des panneaux et prévenir de ces erreurs. C'est ce que propose le mode *extended*.

Nous avons réalisé les inversions avec les paramètres retenus dans le chapitre Invariables.

Nous avons comparé les résultats à l'inversion sans mode *extended*. Les résultats obtenus sont en réalité grandement similaires. Les blocs de résistivité que l'on cherchait à faire disparaître sont pour la plupart toujours présents. Cependant, certains panneaux semblent plus proches d'une réalité physique avec des résultats plus tabulaires notamment en profondeur. Il est donc pertinent d'effectuer l'inversion avec les deux méthodes.

En outre, le calcul et la représentation du modèle *extended* donne une représentation de la résistivité dans des zones de très faible sensibilité du panneau. S'il est méconnu, ce phénomène peut avoir pour conséquence d'induire des erreurs dans l'interprétation des panneaux.

La Figure 27, page suivante, montre un exemple d'inversion avec le mode *extended*.

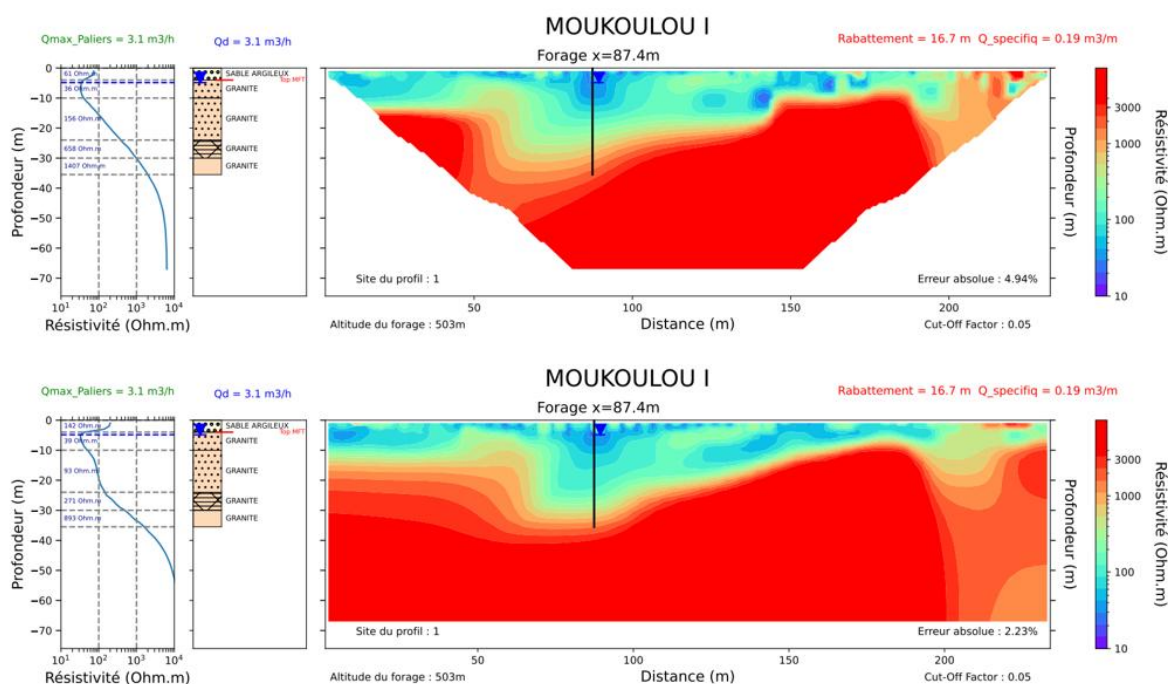


Figure 27 : Exemple d'inversion avec le mode extended avec en haut l'inversion sans le mode extended, et en bas l'inversion avec le mode extended.

RESULTATS D'ANALYSE

Pour rappel, tous les sites ont été interprétés avec les paramètres cités dans le chapitre Invariables. Leur représentation est disponible en Annexe 1.

Corrélation des forages avec les ERT

Résistivité des horizons

Nous avons cherché à obtenir la répartition de la résistivité selon le type de lithologie obtenue lors du forage.

Pour cela nous avons réinterprété chaque log de forage afin de déterminer les profondeurs des différents horizons suivant le contexte géologique du modèle de socle et de référencer ces valeurs dans un tableau Excel pour l'ensemble des forages.

Ensuite, nous avons poursuivi le développement de notre programme Python afin qu'il puisse récupérer les profondeurs de chaque horizon dans le tableau Excel qui contient ces données. Puis le programme effectue la liste de l'ensemble des résistivités calculées pour chaque horizon à partir de la courbe de résistivité au droit du forage.

Après réalisation de cet exercice sur l'ensemble des forages étudié, nous avons concaténé les résultats et les avons représentés sous la forme d'histogrammes d'occurrence.

La Figure 28, ci-après, montre les résultats obtenus sur les 37 forages étudiés dans la région de Bitkine.

La Figure 29, qui la suit, prend en compte les forages de la région de Barlo et Mongo.

Dans ces deux figures, l'axe des abscisses représente les valeurs de résistivités suivant une échelle logarithmique de base 10.

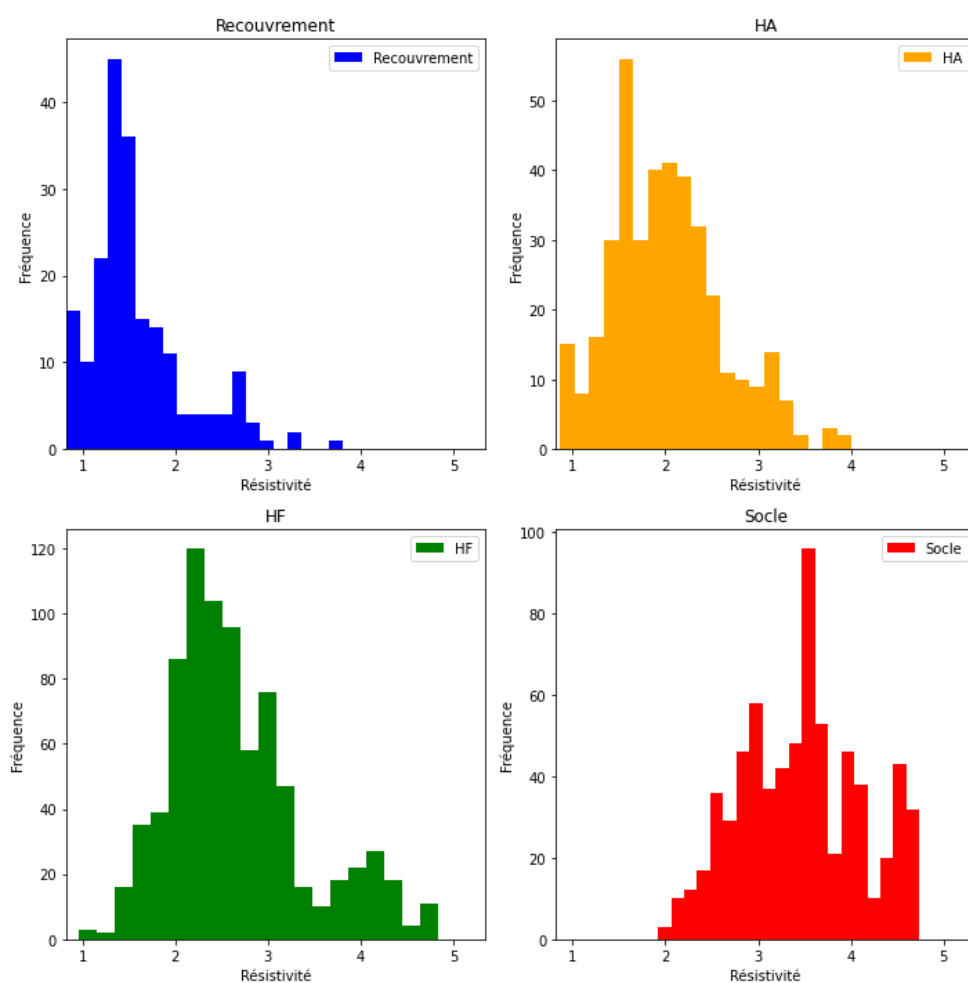


Figure 28 : Histogramme d'occurrences des résistivités obtenus pour chaque horizon dans la région de Bitkine.

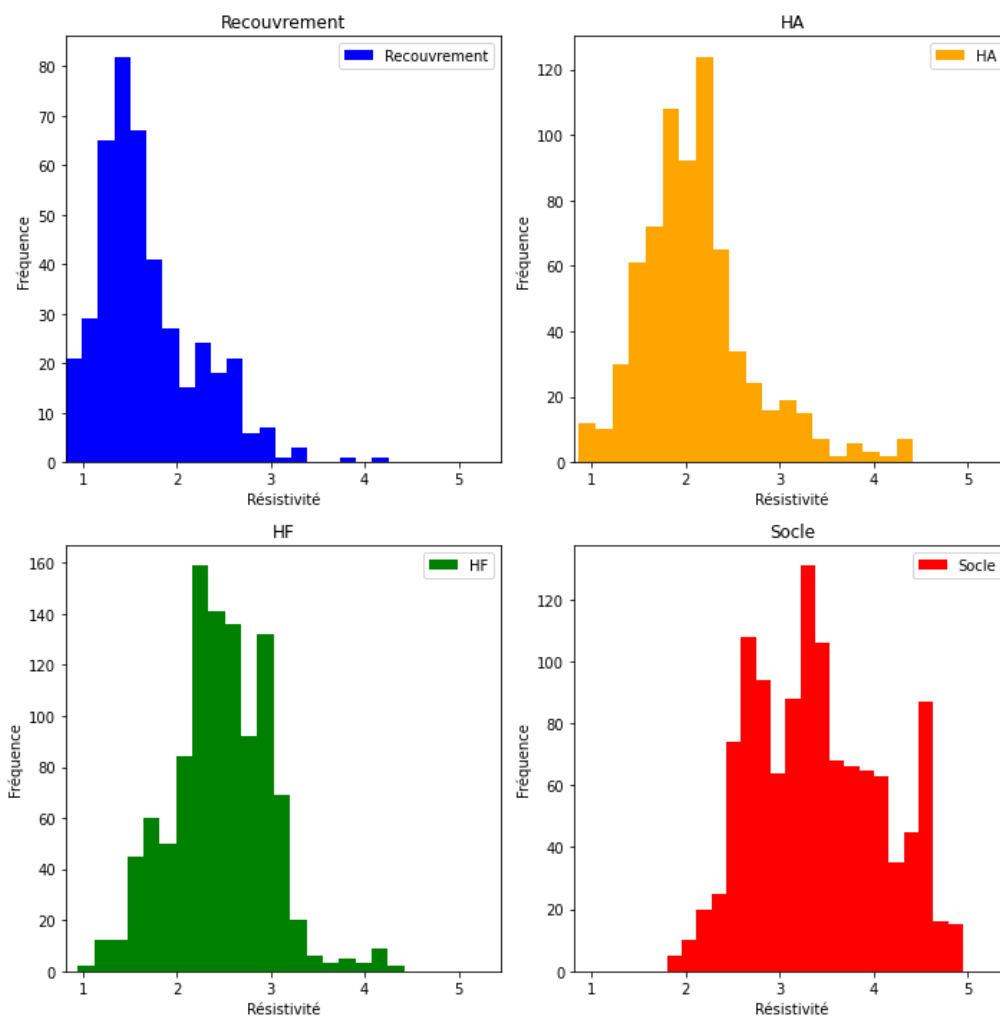


Figure 29 : Histogramme d'occurrences de résistivités obtenues pour chaque horizon dans la région de Bitkine, Barlo et Mongo.

On peut retenir de ces résultats que :

- la résistivité de la couche de recouvrement varie de l'ordre du Ωm à 1000 Ωm avec une forte concentration des valeurs autour de 30 Ωm .
- la résistivité de l'horizon altéré est centrée autour de 100 Ωm avec des valeurs qui peuvent descendre sous les 10 Ωm et monter jusqu'à 4 000 Ωm mais dont une grande proportion demeure sous les 500 Ωm .
- la résistivité de l'horizon fissuré est centrée autour des 300 Ωm , avec des valeurs s'étendant de la dizaine de Ωm et dépassent rarement les 1 500 Ωm .
- la résistivité obtenue au niveau du socle est de manière quasi-systématique supérieure à 500 Ωm centrée autour des 3 000 Ωm , elle atteint fréquemment les 20 000 Ωm

On a donc dans l'ensemble des résultats qui correspondent à ce que l'on avait pu relever dans la littérature [Chapitre Panneau électrique et modèle de résistivité en zone de socle] avec quelques différences tout de même :

- la résistivité de l'horizon altéré est plus élevée,
- la résistivité du socle descend souvent sous les 1 000 Ωm .

Cela peut éventuellement s'expliquer par la difficulté à identifier les différents types de lithologie par l'opérateur lors du sondage.

Cependant, nous considérerons dans le reste de ce document que le toit du socle se situe au dépassement des 1 000 Ωm .

Résistivité des lithologies

Comme nous l'avons vu dans le chapitre sur le Contexte géologique et hydrogéologique de la région du Guéra, il existe deux familles de roches distinctes ayant un impact sur la productivité du milieu : les granites d'une part, et, d'autre part, les diorites, dolérites et les granodiorites.

Nous avons donc itéré le travail précédent en considérant cette fois-ci les lithologies indépendamment de leur état. La Figure 30, ci-dessous, montre les résultats obtenus pour les 61 forages de la région en incluant les résistivités obtenues pour les sables et les argiles. Les trois histogrammes sont représentés en transparence les uns sur les autres avec au premier plan les diorites, dolérites et granodiorites, puis les granites puis les argiles et les sables. L'échelle utilisée est le logarithme de base 10 de la résistivité.

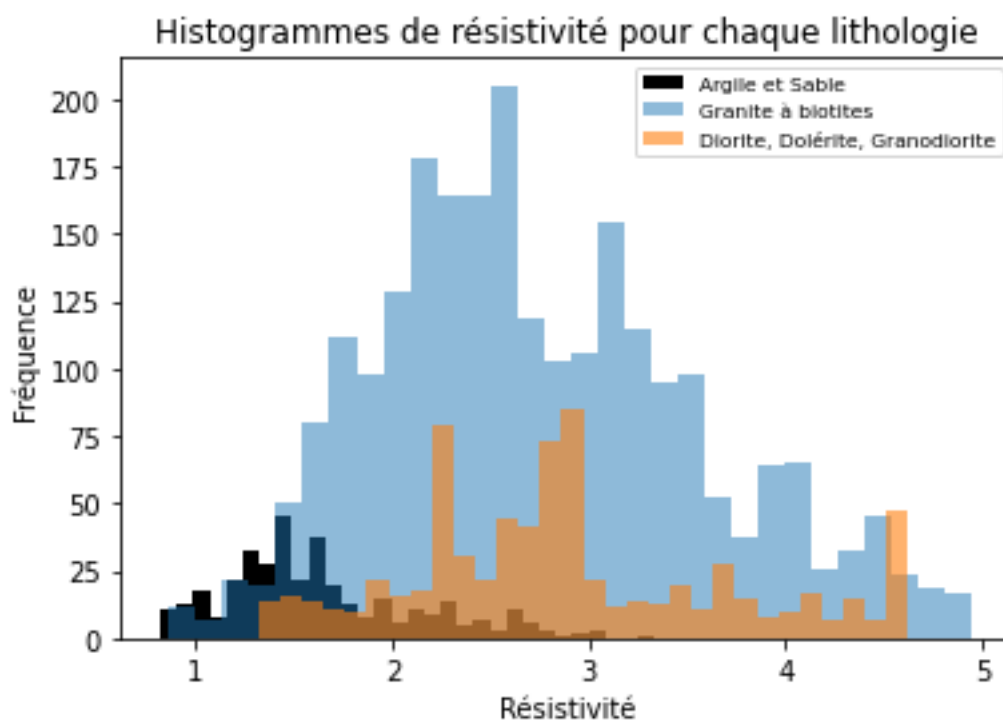


Figure 30 : Histogramme d'occurrence des résistivités des lithologies dans les régions de Bitkine, Barlo et Mongo.

Il n'apparaît pas de distinction évidente entre les gammes de résistivité des granites à biotite (en bleu) et celle des diorites, dolérites et granodiorites (en beige). Il est donc impossible de distinguer une lithologie de socle par rapport à une autre avec la méthode ERT.

Analyse en composantes principales

Dans l'objectif d'établir des affinités entre les différents paramètres de nos forages et panneaux, nous avons réalisé une analyse en composantes principales. Cette méthode permet d'explorer les liaisons entre les variables et les ressemblances entre individus lorsque le nombre de variables dépasse 2 voire 3. Par exemple, une représentation en deux dimensions n'offre que deux degrés de liberté qui permettent de placer les individus selon deux de leurs composantes seulement.

L'ACP consiste à représenter les individus suivant 2 ou 3 axes principaux calculés tels que le nuage d'individus ait une inertie maximale, c'est-à-dire qu'il soit le plus écarté et le moins dense possible. Ces axes sont calculés à partir du groupe d'individus suivant l'ensemble des variables à représenter ce qui permet de toutes les prendre en compte.

Les cercles de corrélation permettent d'observer les liens qui existent entre les différentes variables et conclure quant à l'influence de certains paramètres sur d'autres.

Pour plus de détail sur la méthode de l'analyse en composantes principales, le lecteur ou la lectrice est invité-e à explorer la bibliographie plus généraliste sur le sujet (Hair, 2009).

La représentation a été faite sur les 61 sites que comprennent la région de Bitkine et les bassins de Barlo et Mongo.

Nous avons réalisé l'exercice avec 6 variables actives, c'est-à-dire qu'elles contribuent au calcul des axes principaux. Et nous avons ajouté 6 variables supplémentaires qui ne contribuent pas au calcul des axes principaux mais sont affichées selon leur corrélation avec ceux-ci.

Les variables principales sont :

- Z
- Qd
- ERE
- EREAr
- EHA
- EHF

Les variables supplémentaires sont :

- E(RE+HA)
- EH(A+F)
- Pt
- Ω_{m_RE}
- Ω_{m_HA}
- Ω_{m_HF}

La Figure 31, ci-après, montre l'ACP suivants les trois premiers axes principaux. Sont représentés la corrélation entre les variables ainsi que les individus.

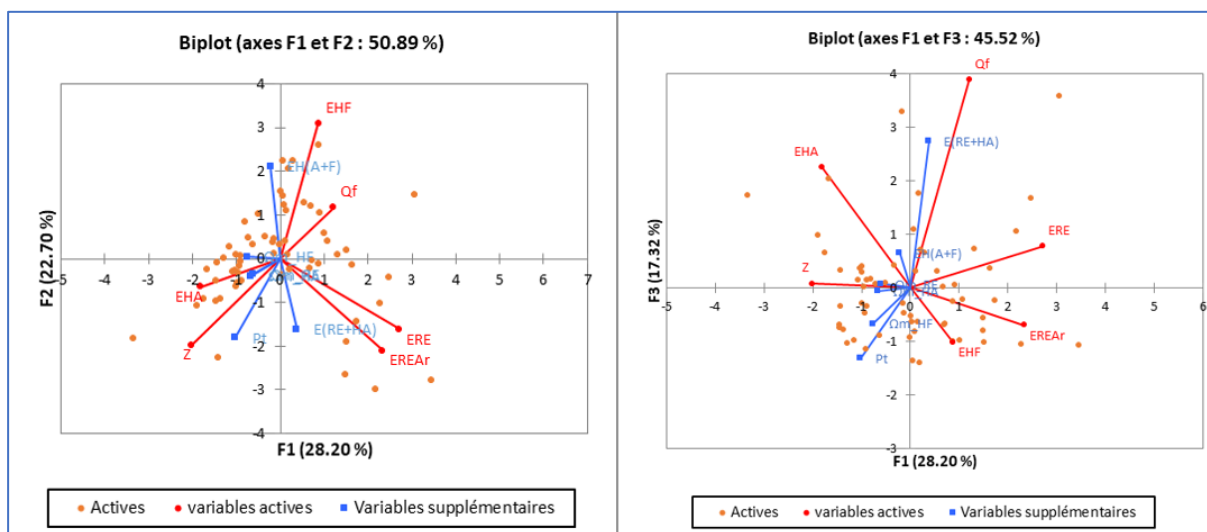


Figure 31 : Analyse en Composante Principale des 61 sites suivant 3 axes.

On voit que les 3 axes sont plutôt équilibrés et que les deux représentations permettent de représenter 51% et 45,5% des données respectivement.

Plus spécifiquement, il est possible de voir grâce aux cercles de corrélation que :

- L'axe horizontal F1 est expliqué par les épaisseurs de recouvrement [ERE et EREAr] dans sa partie positive. Sa partie négative rassemble l'altitude [Z] et l'épaisseur d'horizon altéré [HA].
- L'axe vertical F2 est caractérisé par des épaisseurs d'horizon fissuré [EHF] élevées dans sa partie positive, qui s'opposent à des recouvrements [ERE et EREAr] et des altitudes [Z] élevées dans sa partie négative.
- L'axe vertical F3 est marqué par des débits de fin de foration [Qf] élevés dans sa gamme positive qui corrént avec des épaisseurs d'horizon altérée [EHA] élevées. Les valeurs négatives sont à bien moindre mesure corrélées aux valeurs des épaisseurs d'horizons fissurés [EHF].

Si l'on s'intéresse aux différentes corrélations plus en détail, on verra que :

- Le débit de fin de foration [Qf] est fortement corrélé à l'épaisseur de l'horizon altéré [EHA] pour l'axe F3, mais ils sont faiblement anti-corrélés pour les axes F1 et F2. Les forts débits semblent donc associés à un horizon altéré bien développé, tandis que des faibles débits ne tiennent pas forcément compte de cette formation.
- Sur l'axe F3, la somme des épaisseurs du recouvrement et de l'horizon altéré [E(RE + HA)] est fortement corrélée à des débits forts [Qf].
- Le débit de fin de foration [Qf] est anti-corrélé à l'altitude du forage. Ce résultat est logique puisque les faibles altitudes sont plus susceptibles d'être approvisionnées en eau et inversement.
- L'altitude [Z] est corrélée à l'épaisseur de l'horizon altéré [EHA] et anti-corrélée à l'épaisseur de recouvrement. Ce résultat logique s'explique par l'érosion des sols et le transport des sédiments en contre-bas.
- Les variables supplémentaires de résistivité [Ω_m _RE, Ω_m _HA, Ω_m _HF] ne sont pas bien représentées dans le cercle de corrélation, elles sont totalement décorrélées des axes F2 et F3. Pour l'axe F1, ces valeurs ont tendance à être plus élevées pour les individus en altitude [Z]

ou avec une bonne épaisseur d'horizon altéré [EHA] et plus faibles lorsque le recouvrement [ERE et EREAr] est important.

- De grandes profondeurs de forage [Pt] auront tendance à traduire des puits faiblement productifs. Cela s'explique par le mode opératoire de la foration qui aura tendance à aller plus profondément dans le socle lors des forages sec dans l'espoir de trouver la nappe.
- Sur l'axe F3 de nouveau, la somme des épaisseurs des horizons altérés et fissurés [EH(A+F)] ne semble pas particulièrement corrélér avec les débits.
- Le débit de fin de foration [Qf] n'est pas particulièrement corrélé à l'épaisseur de l'horizon fissuré [EHF]. Si l'on se rapporte au modèle d'aquifère de socle, cela s'explique par le fait que l'existence d'un horizon fissuré est nécessaire mais qu'augmenter son épaisseur n'augmente pas particulièrement la productivité du puits.

MODELE [HYDRO]GEOLOGIQUE DE LA REGION DE BITKINE

CLASSIFICATION DES SITES

A l'instar du travail réalisé par H. Nouradine, nous avons réalisé une classification des sites selon les données de forages et les panneaux électriques.

Nous avons repris sa classification concernant les modèles A, A*, B et C. Cependant, après une analyse plus fine des logs de forages et des résistivités associées, nous avons observé un cinquième modèle que nous avons appelé B*.

Par suite, voici une description plus détaillée des différents modèles ainsi qu'un exemple pour chacun.

Les inversions ont toutes été réalisées avec les paramètres choisis dans le chapitre Invariables.

Modèle A et A*

Le modèle A caractérise des sites avec des horizons altérés et fissurés bien développés, ce qui se traduit par des panneaux de résistivité inférieures à 1 000 Ωm sur la moitié supérieure du panneau [environ 30 m de profondeur], voire jusqu'à l'ensemble du panneau.

Une épaisseur de recouvrement peut être présente. Selon qu'elle est argileuse ou sableuse, sa résistivité varie. En effet, la présence d'argile va faire chuter la résistivité du milieu, tandis qu'une couche essentiellement sableuse sera plus résistante que la moyenne. Il arrive alors que la résistivité de la couche de recouvrement dépasse celle des horizons sous-jacents. Lorsque cela arrive, le modèle A s'habille d'une étoile pour donner le modèle A*.

La Figure 32 propose un exemple d'un site classé A, tandis que la Figure 33 illustre un modèle A*.

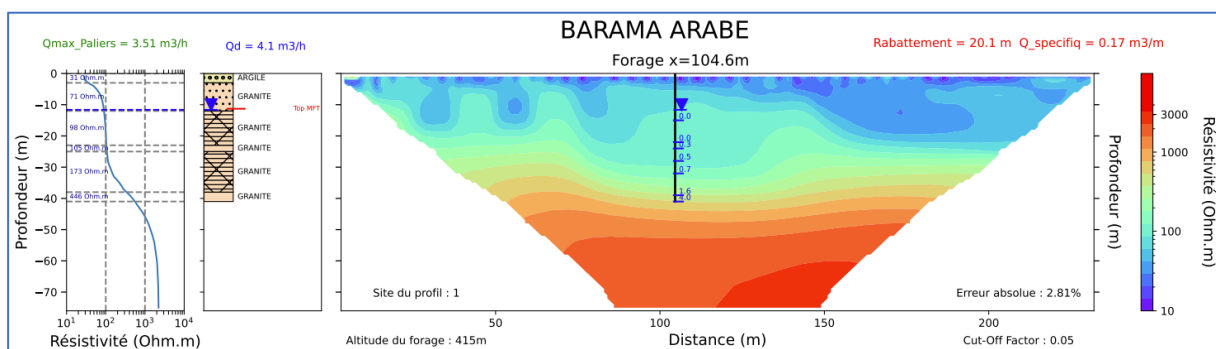


Figure 32 : Exemple d'un site classé A

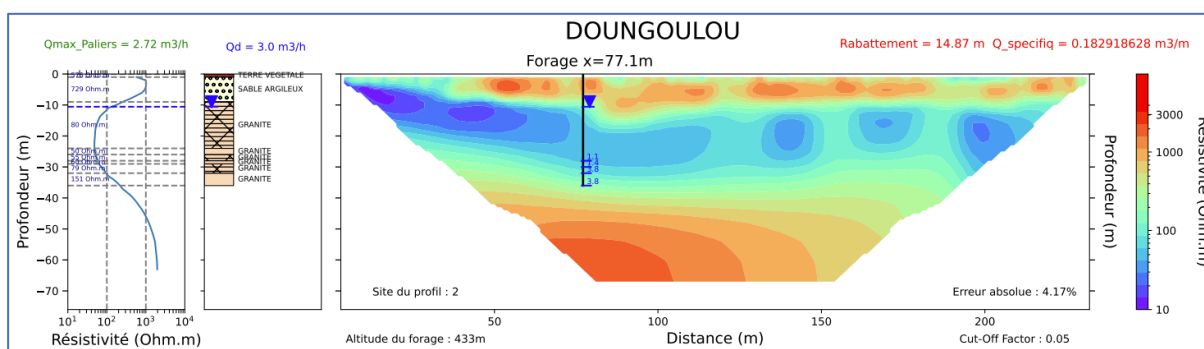


Figure 33 : Exemple d'un site classé A*

Modèle B et B*

Le modèle B se caractérise par de faibles épaisseurs de la couche de recouvrement, et des horizons altérés et fissurés. Cela se traduit au sein des panneaux par des résistivités rapidement élevées, c'est-à-dire supérieures à 1 000 Ωm , qui correspond à de la résistivité de socle. Il arrive que le log de forage présente un horizon fissuré d'une grande épaisseur mais une résistivité correspondante supérieure à 1 000 Ωm . Dans ce cas-là, on préférera la géophysique aux données de forage qui sont soumises à l'interprétation du foreur. C'est-à-dire que bien que le log de forage présente une couche fissurée, si la résistivité dépasse les 1000 Ωm , on considèrera qu'il s'agit de socle sain.

A l'analyse des logs de forage et des profondeurs d'arrivées d'eau des sites de la région du Guéra, nous avons constaté un nombre non négligeable de sites classés B et présentant une fracture en profondeur dans le socle après une dizaine de mètres de socle sain. Parmi ces sites, il apparaît que les profondeurs des arrivées d'eau et de la fracture coïncident.

Aussi, et afin de distinguer les forages réalisés dans le socle sain sans fracture de ceux ayant rencontré une fracture en profondeur, nous avons créé la classe B*. La Figure 34, ci-après, montre un exemple d'une de ces fractures que l'on peut observer dans le socle.



Figure 34 : Exemple d'une fracture de socle observée en surface dans la région du Guéra [David Ramel].

Certains sites présentaient une productivité de fracture de socle tout en ayant une altération de plusieurs dizaines de mètres. Nous avons souhaité distinguer les sites ayant une productivité issue des horizons altérés et fissurés de ceux présentant une productivité de fracture de socle. Pour cela nous avons observé les arrivées d'eau. Lorsqu'elles étaient majoritaires à une profondeur comprise sous plus de 10 mètres de socle, nous avons considéré que l'eau provient d'une fracture. En conséquence, nous avons classé B* les sites ayant une productivité de socle manifeste alors qu'ils présentent des horizons plus ou moins développés. Cet exercice nous a mené à considérer comme B* des sites classés A ou A* lors du classement initial proposé par H. Nouradine.

La Figure 35 ci-dessous, illustre un modèle B, tandis que la Figure 36, qui suit, est un exemple de site initialement classé A mais que l'on a considéré B* car la productivité du forage provient manifestement de la fracture dans le socle.

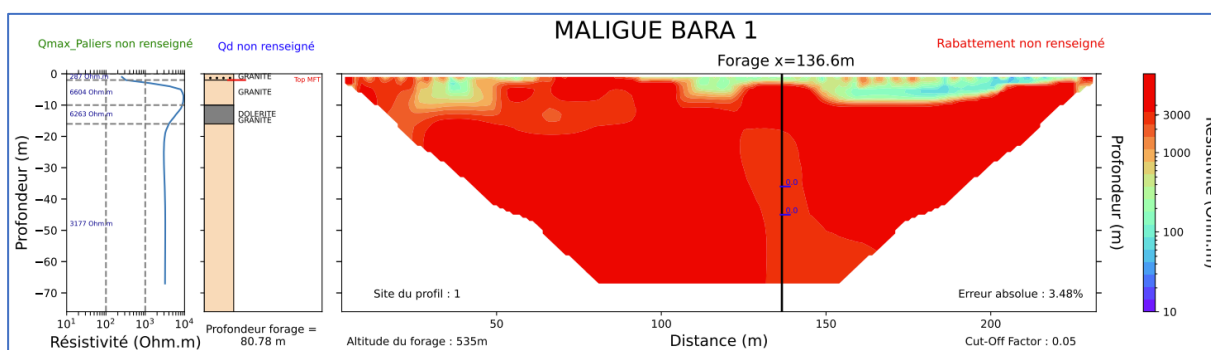


Figure 35 : Exemple d'un site classé B.

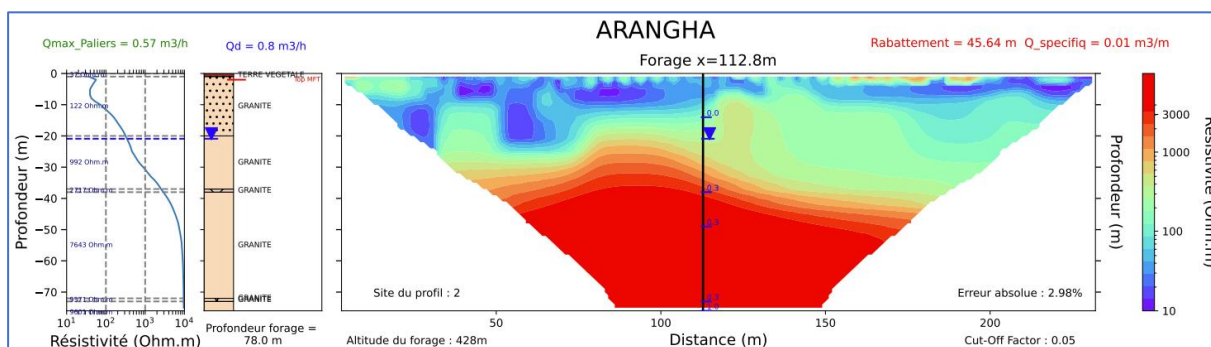


Figure 36 : Exemple d'un site classé B* avec une couche de faible résistivité en surface.

Modèle C

Pour finir, le modèle C caractérise des panneaux ayant des variations latérales fortes avec des blocs de résistivités élevées. Ces discontinuités caractérisent des formations verticales, notamment abordées dans le chapitre Linéaments et fractures. Pour ces sites, le log de forage n'est pas décisif dans la classification puisque selon sa position, sa composition peut être grandement différente.

La Figure 37 fournit un exemple d'un modèle C.

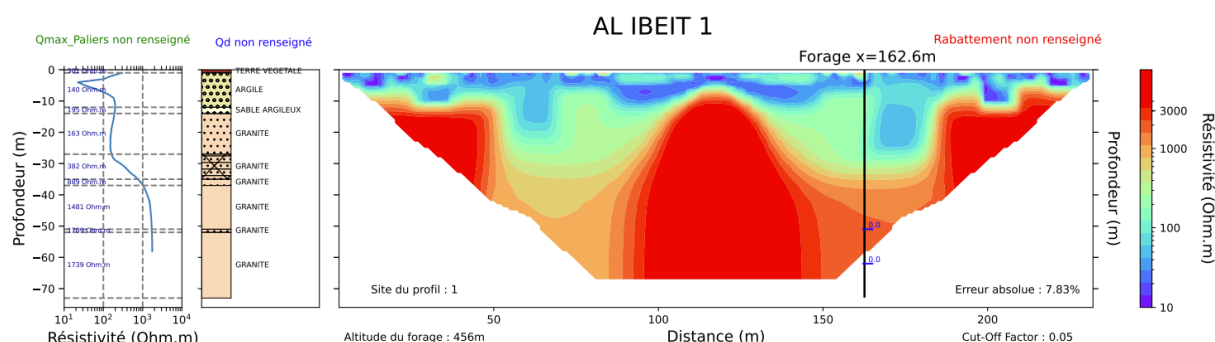


Figure 37 : Exemple d'un site classé C

RESULTATS D'ANALYSE DU MODELE HYDROGEOLOGIQUE DE LA REGION DU GUERA

Nous avons souhaité savoir quels modèles pouvaient être les plus favorables à l'implantation de puits d'approvisionnement en eau potable. Pour cela, nous nous sommes intéressés aux valeurs des débits de fin de foration ainsi qu'aux débits spécifiques obtenus grâce aux essais par paliers lorsque ceux-ci étaient disponibles [lorsque le forage était sec, le débit spécifique était considéré comme nul].

Par ailleurs, nous avons voulu observer l'influence de la lithologie, suivant qu'elle se compose de granite ou de dolérite/diorite.

Cette entreprise nous a mené à noter dans un tableau le nombre de forages en fonction de leur lithologie, leur classe et leur productivité. Nous avons construit 5 tableaux qui ont chacun leur seuil de productivité. 3 tableaux s'intéressent aux débits de fin de foration avec des seuils à 0,5 m³/h, 3 m³/h et 5 m³/h. Ils correspondent respectivement aux débits nécessaires à l'installation d'une Pompe à Motricité Humaine [PMH], une pompe et un puits AEP [Approvisionnement en Eau Potable]. Les 2 autres prennent comme seuils de productivité les débits spécifiques de 0,1 m³/h/m et de 0,3 m³/h/m.

L'intérêt d'une classification suivant les débits de foration permet d'avoir un avis opérationnel lors de la prise de décision du foreur dans l'équipement du forage. Considérer le débit spécifique permet d'approcher la productivité de l'ouvrage, indépendamment de la valeur de débit pompé durant l'essai.

Nous rappelons par ailleurs, que les inversions utilisées pour effectuer ce classement ont toutes été réalisées avec les paramètres d'inversion décrit dans le chapitre Invariables, plus haut.

Qf => 0.5 m3/h							
Modèle	Etat	Biotite/Granite		Dolèrite/Diorite/ Granodiorite		Total	Total
A	+	13	31%	1	5%	14	23%
	-	4	10%	4	21%	8	13%
A*	+	9	21%	1	5%	10	16%
	-	3	7%	0	0%	3	5%
B	+	0	0%	1	5%	1	2%
	-	0	0%	3	16%	3	5%
B*	+	6	14%	3	16%	9	15%
	-	2	5%	3	16%	5	8%
C	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	5	12%	3	16%	8	13%
Total		42	100%	19	100%	61	100%
Productifs		28	67%	6	32%	34	56%

Qf => 3 m3/h							
Modèle	Etat	Biotite/Granite		Dolèrite/Diorite/ Granodiorite		Total	Total
A	+	8	19%	0	0%	8	13%
	-	9	21%	5	26%	14	23%
A*	+	6	14%	0	0%	6	10%
	-	6	14%	1	5%	7	11%
B	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	0	0%	4	21%	4	7%
B*	+	3	7%	2	11%	5	8%
	-	5	12%	4	21%	9	15%
C	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	5	12%	3	16%	8	13%
Total		42	100%	19	100%	61	100%
Productifs		17	40%	2	11%	19	31%

Qf => 5 m3/h							
Modèle	Etat	Biotite/Granite		Dolèrite/Diorite/ Granodiorite		Total	Total
A	+	3	7%	0	0%	3	5%
	-	14	33%	5	26%	19	31%
A*	+	4	10%	0	0%	4	7%
	-	8	19%	1	5%	9	15%
B	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	0	0%	4	21%	4	7%
B*	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	8	19%	6	32%	14	23%
C	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	5	12%	3	16%	8	13%
Total		42	100%	19	100%	61	100%
Productifs		7	17%	0	0%	7	11%

Tableau 3 : Tableaux de comptabilité des modèles suivant les seuils de débits de foration de 0.5, 3 et 5 m3/h.

Qspec => 0.1 m2/h							
Modèle	Etat	Biotite/Granite		Dolèrite/Diorite/ Granodiorite		Total	Total
A	+	11	26%	1	5%	12	20%
	-	6	14%	4	21%	10	16%
A*	+	7	17%	0	0%	7	11%
	-	5	12%	1	5%	6	10%
B	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	0	0%	4	21%	4	7%
B*	+	2	5%	2	11%	4	7%
	-	6	14%	4	21%	10	16%
C	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	5	12%	3	16%	8	13%
Total		42	100%	19	100%	61	100%
Productifs		20	48%	3	16%	23	38%

Qspec => 0.3 m2/h							
Modèle	Etat	Biotite/Granite		Dolèrite/Diorite/ Granodiorite		Total	Total
A	+	2	5%	0	0%	2	3%
	-	15	36%	5	26%	20	33%
A*	+	3	7%	0	0%	3	5%
	-	9	21%	1	5%	10	16%
B	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	0	0%	4	21%	4	7%
B*	+	2	5%	1	5%	3	5%
	-	6	14%	5	26%	11	18%
C	+	0	0%	0	0%	0	0%
	-	5	12%	3	16%	8	13%
Total		42	100%	19	100%	61	100%
Productifs		7	17%	1	5%	8	13%

Tableau 4 : Tableaux de comptabilité des modèles suivant les seuils de débits spécifiques de 0.1 et 0.3 m3/h.

Une première observation est à faire sur le nombre de forages productifs suivant la lithologie. On remarque, quel que soit le seuil de productivité choisi que la part de forages productifs est plus importante dans les granites que dans les dolérites, diorites et granodiorites. Ce résultat est cohérent avec l'étude réalisée précédemment par H. Nouradine et citée dans le chapitre Contexte géologique et hydrogéologique de la zone du Guéra.

La seconde observation est que les modèles A, A* et B* semblent être les plus intéressants pour la productivité.

Le modèle B est faiblement représenté pour les forages réalisés dans le granite et tous négatifs pour les forages effectués dans la diorite, dolérite. On peut donc en conclure qualitativement que la productivité du socle sain est bel et bien due aux fractures lorsqu'elles sont présentes et saturées.

Le modèle C ne nous donne que des forages non productifs.

On observe que le modèle B* présente une proportion appréciable de forages présentant de bons débits, comme les modèles A et A*. Toutefois, au contraire de ces derniers, le modèle B* ne présente aucun forage avec un débit supérieur à 5m³/h.

On remarque tout de même que le modèle B* peut atteindre des débits spécifiques élevés au même titre que les modèles A et A*. Cela peut s'expliquer par une arrivée d'eau concentrée sur une tranche restreinte qui est de l'épaisseur de la fracture.

Par conséquent, la productivité de socle n'est vraiment intéressante que dans le cas de l'installation d'une PMH. Il est à noter cependant que la présence des fractures n'est pas décelable sur le panneau et les résultats globalement faibles, avec des débits toujours inférieurs à 5 m³/h et un tiers seulement sont supérieurs à 3 m³/h. Il est donc inutile d'aller forer au-delà du toit du socle sain lorsque que le forage est sec. De plus, des panneaux présentant une forte résistivité dans leur ensemble révèlent des sites à abandonner puisque le socle sera atteint dès la surface.

Pour finir, les modèles A et A* sont les plus favorables à fournir des productivités élevées. Nous avons construit un tableau reprenant la part de forages productifs pour chacun des deux modèles ainsi que pour les deux modèles confondus. Nous avons considéré que le nombre de forages pour chaque modèle était représentatif du modèle.

Le Tableau 5 montre la répartition des forages positifs selon les différents seuils de débits pour les classes A et A*.

Seuils	Qf => 0.5 m ³ /h	Qf => 3 m ³ /h	Qf => 5 m ³ /h	Qspec => 0.1 m ³ /h/m	Qspec => 0.3 m ³ /h/m
Part de A et A* confondus productifs	69%	40%	20%	54%	14%
Part de A productifs	64%	36%	14%	55%	9%
Part de A* productifs	77%	46%	31%	54%	23%

Tableau 5 : Répartition des forages positifs selon différents seuils de débit pour les classes A et A*.

On constate que de manière générale, les modèles A* sont plus productifs que les modèles A.

Pour des équipements de type PMH, les deux modèles donnent 69% de forages positifs tandis que si l'on s'oriente vers un puit AEP cette proportion tombe à 20%, mais avec 40% de succès pour l'installation d'une pompe simple.

Par ailleurs, nous obtenons le même résultat pour les deux modèles concernant un débit spécifique de 0,1 m³/h/m. Mais la part de forages dépassant le seuil des 0,3 m³/h/m est doublement supérieure pour le modèle A* que pour le modèle A.

REPARTITION DES MODELES HYDROGEOPHYSIQUES

L'ONG SEVES s'intéresse tout particulièrement à la région de Bitkine pour y implanter des forages, c'est pourquoi nous avons rajouté cette section.

La Figure 38, ci-dessous, fait l'inventaire du nombre de panneaux pour chaque modèle géophysique.

Modèles	A	A*	B	B*	C
Nombre	22	13	4	14	8

Figure 38 : Inventaires des modèles hydrogéophysiques parmi les 61 sites de l'étude.

Le modèle A est la plus représenté avec 22 sites. Les modèles A* et B* ont respectivement 13 et 14 sites. Enfin les modèles C et B comptabilisent à eux deux 14 sites.

La Figure 39 montre l'emplacement des forages avec indiqué leur modèle hydrogéophysique.

On y voit que dans la région de Bitkine, le nord de la ville compte majoritairement des sites B*, c'est-à-dire du socle avec une fracture en profondeur. Le sud est, lui, peuplé de sites classés A et A*, ce qui en fait une zone privilégiée pour la prospection d'eau potable.

D'une manière plus globale, les B, B* et C ont tendance à se retrouver proches tandis que les A et A* forment aussi des agglomérats. Cela semble à priori logique puisque ce qui les distingue est notamment la présence du socle. Ce résultat demeure qualitatif et à prendre avec recul.

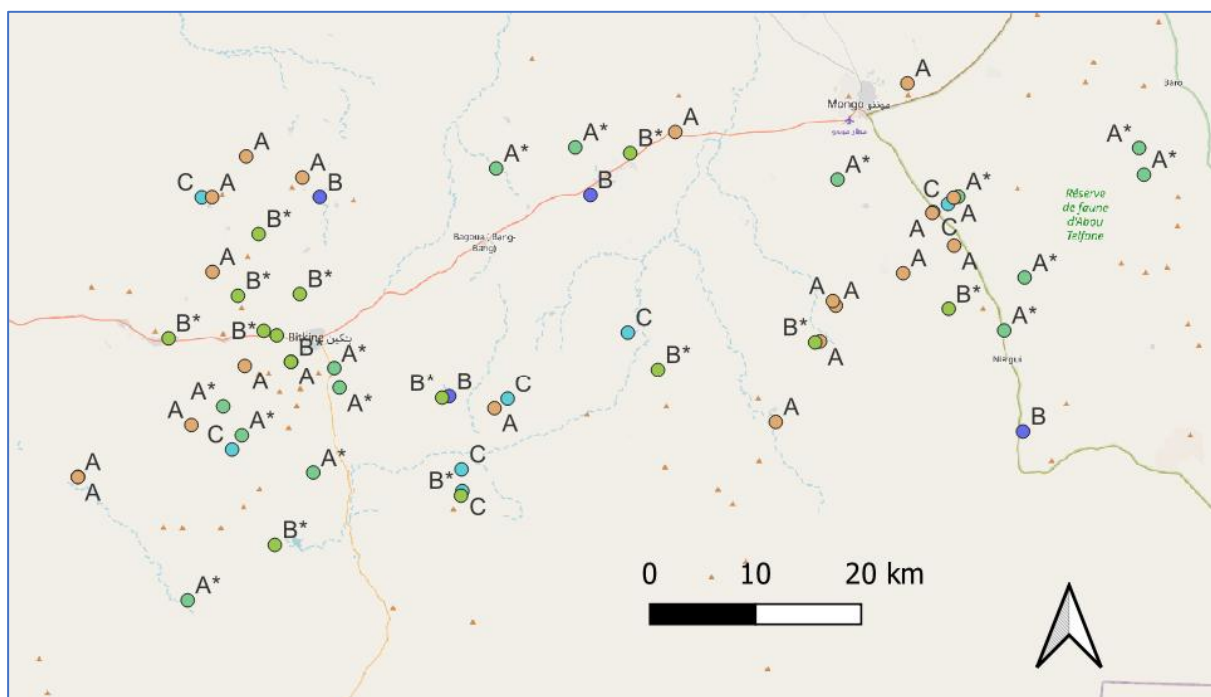


Figure 39 : Répartition des modèles hydrogéophysique dans la zone d'étude et les bassins de Mongo et Barlo.

CONCLUSION

SYNTHESE

Une première partie de notre travail a consisté en une synthèse de nombreux articles scientifiques expliquant le modèle hydrogéologique des aquifères de socle ainsi que les méthodes scientifiques servant à les caractériser. Au sein de cette synthèse, on retrouve le travail de H. Nouradine dans la région du Guéra au Tchad. Région que nous avons nous-même étudiée à partir de données de prospection de géophysique ERT et de forages. Ils ont été effectués au cours des vingt dernières années au sein des programmes 9^{ème} et 10^{ème} FED.

Par suite, nous avons détaillé notre zone d'étude et décrit notre méthode de validation des données. Nous avons retenu 37 sites supplémentaires à l'étude de H. Nouradine que nous avons complétés de 24 sites déjà étudiés par le même auteur.

Nous avons entamé l'inversion de 61 sites à l'aide l'application RES2DINV. Deux versions ont été employées : RES2DINV 3.5 et RES2DINV 4.10.

Le nombre de sites, et donc de profils à interpréter étant grand, nous avons développé un programme sous Python afin d'automatiser la représentation des panneaux avec le forage associé et l'évolution de la résistivité à l'aplomb de ceux-ci. Le code Python est librement disponible sur la plateforme GitHub : https://github.com/SEVES-asso/Outils_ERT

Le développement de ce programme nous a permis ultérieurement de réaliser des comparaisons sur différents paramètres d'inversion que sont les versions de RES2DINV, le *cut-off factor*, la densité du maillage et l'option *extended* de RES2DINV. Nous avons conclu que la version de RES2DINV n'avait pas d'influence significative, de même pour le *cut-off factor*. D'un autre côté, un maillage plus fin offre des résultats plus physiques et obtenir des inversions avec l'option *extended* est pertinent lorsqu'il faut affiner l'interprétation.

La suite de notre travail a porté sur une analyse en composante principale afin de mettre en lumière des corrélations entre différents paramètres. Ils se composent des épaisseurs des couches, de la profondeur et l'altitude des forages, du débit de foration, des résistivités des horizons et des variables composées des différentes épaisseurs précédemment mentionnées.

A la suite de ce travail, nous avons entrepris un classement de nos sites prenant exemple sur le travail H. Nouradine. Nous avons défini 5 modèles hydrogéophysiques. La classification a été effectuée à partir des 61 sites. Elle a permis de conclure que les sites les plus favorables à une productivité élevée présentent des valeurs de faible résistivité, faible à minima sur les trente premiers mètres de profondeurs et jusqu'à l'ensemble du panneau. A contrario, des panneaux présentant de fortes résistivités dans leur ensemble ou bien de fortes variations latérales de résistivité donnent des forages avec des débits faibles, voire nuls. Un autre résultat intéressant est que la productivité de socle lorsqu'elle est présente provient de fractures en profondeur de taille métrique et approvisionnées en eau. Cependant, aucun forage n'a permis d'obtenir de forts débits dans les cas où l'eau provenait de ces fractures.

RECOMMANDATIONS POUR L'IMPLANTATION DES FORAGES

Pour rappel, nous avons défini 5 modèles de résistivité en zone de socle :

A : Le panneau présente des formations tabulaires avec des résistivités $< 1\,000\ \Omega\text{m}$ au moins sur sa moitié supérieure. Ces panneaux sont les témoins d'horizons bien développés, c'est-à-dire d'un sol bien altéré.

A* : Le panneau présente des formations tabulaires avec des résistivités $< 1\,000\ \Omega\text{m}$ au moins jusqu'à 30 m de profondeur avec une couche fine de résistivités $> 1\,000\ \Omega\text{m}$ sur sa partie supérieure. Ces panneaux correspondent au modèle A ayant une couche de recouvrement sableuse et faiblement argileuse qui forme une zone de plus grande résistivité en surface.

B et B* : Le panneau présente des formations tabulaires avec des résistivités $> 1\,000\ \Omega\text{m}$ dans son ensemble. Le B* est lui caractérisé par la présence d'une ou plusieurs fractures en profondeur mais elles ne sont pas décelables sur le panneau. Par conséquent, il n'y a pas de différence entre les deux modèles lorsque ceux-ci ne sont décrits qu'avec un panneau sans prendre en compte le log de forage. Cette distinction a été décidée afin d'étudier l'impact des fractures dans le socle sain lors de l'étude.

C : Le panneau présente des variations latérales avec des blocs de résistivités $> 1\,000\ \Omega\text{m}$. Il s'agit des sites ayant des formations subverticales telles que des fractures, des dykes, des veines de quartz, des transitions latérales de lithologie etc.

Les sites doivent être sélectionnés selon cet ordre de priorité :

1. Modèle A*, en effet, 31% des sites caractérisés par ce modèle offrent des débits supérieurs ou égaux à $5\ \text{m}^3/\text{h}$.
2. Modèle A, en effet, 14 % des sites ont des débits au-dessus de $5\ \text{m}^3/\text{h}$, valeurs qui monte à 36% pour le seuil de $3\ \text{m}^3/\text{h}$.
3. Modèles B et B*, bien que 36 % des sites soient productifs au-dessus de $3\ \text{m}^3/\text{h}$, aucun ne dépassent les $5\ \text{m}^3/\text{h}$, il s'agit de sites classés B* ce qui signifie que la productivité de ces modèles est conditionnée par la traversée d'une fracture productive en profondeur.
4. Modèle C : aucun forage productif ne présente ce profil de panneau.

Dans l'ensemble, il apparaît qu'une faible couche résistante en surface, caractéristique d'un recouvrement sableux donne de meilleurs résultats en termes de productivités des forages.

Lors de l'obtention de modèles B, B* et C, il est préférable de poursuivre les recherches géophysiques.

Dans une moindre mesure, l'obtention d'un modèle A peut être poursuivi par des recherches si besoin d'une productivité élevée.

DISCUSSIONS

Cette étude comporte plusieurs biais qu'il est rigoureux de prendre en compte. Nous nous proposons d'en faire l'inventaire ici :

- le nombre de sites étant restreint à 61, les conclusions demeurent plus qualitatives que statistiques. Bien qu'elles valident le modèle d'aquifère de socle, une étude plus poussée comprenant un plus grand nombre de sites pourra venir confirmer ou infirmer nos résultats avec une plus grande fiabilité.
- la création de la classification des panneaux a été réalisée avec une connaissance à priori des logs de forage, des arrivées d'eau et de la productivité, cette connaissance a pu exercer une influence dans le choix et la distinction des modèles. Par ailleurs, la position du forage, que nous avons considérée comme exacte, est soumise à une incertitude d'une vingtaine de mètres liée à la précision des GPS employés. De même nous avons considéré le forage comme étant tangent au panneau, alors même qu'un écart de 50 mètres est toléré lors de la validation des données.
- le classement des panneaux a été exécuté à partir d'un paramétrage d'inversion qui nous semblait donner les résultats les plus fidèles à la réalité physique. Cependant, comme nous avons pu le voir dans le chapitre sur le Choix des paramètres d'inversion, suivant le paramètre

que l'on fait varier, les résultats peuvent être très peu différents voire grandement différents. Par conséquent, réitérer l'expérience avec un jeu de paramètres d'inversion différents aura une influence sur la classification des panneaux et sans doute sur le modèle hydrogéologique.

- La limite de 1 000 Ωm que nous avons choisie afin de caractériser la frontière entre la roche altérée et le socle sain demeure arbitraire. D'une part, la transition entre ces deux couches est progressive. D'autre part, les gammes de résistivités de ces deux couches se chevauchent. Une valeur inférieure ou supérieure aura une influence sur le classement des sites.

PERSPECTIVES

La classification établie et les résultats obtenus quant à la productivité des sites demeurent qualitatifs dans la mesure où ils ne comptent que 61 sites d'étude. Cependant, les récentes campagnes de prospections géophysiques et de forages réalisées ces dernières années dans le cadre de différents programmes de développement offrent une banque de données conséquente.

Ces données pourraient être utilisées dans la construction d'un programme informatique de prédiction basée sur des méthodes de *machine learning*.

Par ailleurs, ce rapport est à destination première de l'ONG SEVES qui intervient dans la zone du Guéra mais aussi dans d'autres secteurs du Sahel en zone de socle. Par conséquent, il pourra être employé par l'ONG et ses partenaires afin d'améliorer l'interprétation des panneaux électriques dans des contextes de zone socle. L'objectif est de faire grandir la proportion de forages productifs dans les campagnes d'aménagement en eau potable futurs, dans l'ensemble des zones d'action de l'organisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 9ème FED, 2011. Programme 9ème FED “Accès à l’eau potable et appui à la politique setorielle” FED/2005/017076 et FED/2006/018625 Etude Hydro-Géophysiques d’Implantation de 450 Forages dans le Guéra et le Batha.
- Acworth, R.I., 1987. The development of crystalline basement aquifers in a tropical environment. *Q. J. Eng. Geol.* 20, 265–272. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1987.020.04.02>
- Al-Djazouli, M.O., Elmorabiti, K., Rahimi, A., Amellah, O., Fadil, O.A.M., 2021. Delineating of groundwater potential zones based on remote sensing, GIS and analytical hierarchical process: a case of Waddai, eastern Chad. *GeoJournal* 86, 1881–1894. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10160-0>
- 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>
- ANTEA, 2016. Programme d’Hydraulique Pastorale au Tchad Central 2 - PHPTC2.
- ANTEA, 2008. Programme d’Hydraulique Pastorale au Tchad Central.
- Bandré, L.S., 2022. Apport du SIG et de l’analyse multicritère à l’estimation des zones de recharge préférentielle en zone de socle (Burkina Faso).
- Belle, P., Lachassagne, P., Mathieu, F., Barbet, C., Brisset, N., Gourry, J.-C., 2019. Characterization and location of the laminated layer within hard rock weathering profiles from electrical resistivity tomography: implications for water well siting. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 479, 187–205. <https://doi.org/10.1144/SP479.7>
- Briški, M., Stroj, A., Kosović, I., Borović, S., 2020. Characterization of Aquifers in Metamorphic Rocks by Combined Use of Electrical Resistivity Tomography and Monitoring of Spring Hydrodynamics. *Geosciences* 10, 137. <https://doi.org/10.3390/geosciences10040137>
- Creutzfeldt, B., Güntner, A., Thoss, H., Merz, B., Wziontek, H., 2010. Measuring the effect of local water storage changes on in situ gravity observations: Case study of the Geodetic Observatory Wettzell, Germany: GRAVITY EFFECT OF LOCAL WATER STORAGE. *Water Resour. Res.* 46. <https://doi.org/10.1029/2009WR008359>
- Dahlin, T., Zhou, B., 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys. Prospect.* 52, 379–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2004.00423.x>
- Davis, S.N., Turk, L.J., 1964. Optimum depth of wells in crystalline rocks.
- Development_of_the_saprolite_reservoir_and_its_sta.pdf, n.d.
- Dewandel, B., Aunay, B., Maréchal, J.C., Roques, C., Bour, O., Mougin, B., Aquilina, L., 2014. Analytical solutions for analysing pumping tests in a sub-vertical and anisotropic fault zone draining shallow aquifers. *J. Hydrol.* 509, 115–131. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.014>
- 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.* 330, 260–284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.026>
- Dewandel, B., Maréchal, J.C., Bour, O., Ladouche, B., Ahmed, S., Chandra, S., Pauwels, H., 2012. Upscaling and regionalizing hydraulic conductivity and effective porosity at watershed scale in

- deeply weathered crystalline aquifers. *J. Hydrol.* 416–417, 83–97. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.038>
- Duby, C., Robin, S., 2006. Analyse en Composantes Principales.
- Gleeson, T., Novakowski, K., 2009. Identifying watershed-scale barriers to groundwater flow: Lineaments in the Canadian Shield. *Geol. Soc. Am. Bull.* 121, 333–347. <https://doi.org/10.1130/B26241.1>
- Gómez-Escalonilla, V., Vogt, M.-L., Destro, E., Isseini, M., Origgi, G., Djoret, D., Martínez-Santos, P., Holecz, F., 2022. Delineation of groundwater potential zones by means of ensemble tree supervised classification methods in the Eastern Lake Chad basin. *Geocarto Int.* 37, 8924–8951. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.2007298>
- Healy, R.W., Cook, P.G., 2002. Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeol. J.* 10, 91–109. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0178-0>
- Hector, B., Séguis, L., Hinderer, J., Descloitres, M., Vouillamoz, J.-M., Wubda, M., Boy, J.-P., Luck, B., Le Moigne, N., 2013. Gravity effect of water storage changes in a weathered hard-rock aquifer in West Africa: results from joint absolute gravity, hydrological monitoring and geophysical prospection. *Geophys. J. Int.* 194, 737–750. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt146>
- Hill, S.M., 1996. The differential weathering of granitic rocks in Victoria, Australia.
- Holbrook, W.S., Riebe, C.S., Elwaseif, M., Hayes, J.L., Basler-Reeder, K., Harry, D.L., Malazian, A., Dosseto, A., Hartsough, P.C., Hopmans, J.W., 2014. Geophysical constraints on deep weathering and water storage potential in the Southern Sierra Critical Zone Observatory.
- INSEED, 2009. Deuxième Recensement Général de la Population et de l'Habitat. Résultats globaux définitifs. Ministère des Finances, de l'Economie et du Plan 60.
- Kirsch, R. (Ed.), 2006. Groundwater geophysics: a tool for hydrogeology. Springer, Berlin ; New York.
- Lachassagne, P., Dewandel, B., Wyns, R., 2021. Review: Hydrogeology of weathered crystalline/hard-rock aquifers—guidelines for the operational survey and management of their groundwater resources. *Hydrogeol. J.* 29, 2561–2594. <https://doi.org/10.1007/s10040-021-02339-7>
- Le Goc, R., 2009. Caractérisation et modélisation des écoulements dans les milieux fracturés.
- Leborgne, R., Rivett, M.O., Wanangwa, G.J., Sentenac, P., Kalin, R.M., 2021. True 2-D Resistivity Imaging from Vertical Electrical Soundings to Support More Sustainable Rural Water Supply Borehole Siting in Malawi. *Appl. Sci.* 11, 1162. <https://doi.org/10.3390/app11031162>
- Lentswe, G.B., Molwalefhe, L., 2020. Delineation of potential groundwater recharge zones using analytic hierarchy process-guided GIS in the semi-arid Motloutse watershed, eastern Botswana. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 28, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100674>
- Loke, D.M.H., 2010. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- Loke, M.H., Acworth, I., Dahlin, T., 2003. A comparison of smooth and blocky inversion methods in 2D electrical imaging surveys. *Explor. Geophys.* 34.
- Loke, M.H., Dahlin, T., 2002. A comparison of the Gauss–Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *J. Appl. Geophys.* 49, 149–162. [https://doi.org/10.1016/S0926-9851\(01\)00106-9](https://doi.org/10.1016/S0926-9851(01)00106-9)
- Malundama, K., Séverin, M., Birenjira, M., 2019. Hydrogéochimie et susceptibilité à la contamination des eaux souterraines dans le secteur de Panzi, ville de Bukavu, RD Congo.

- Maréchal, J.C., Dewandel, B., Ahmed, S., Galeazzi, L., Zaidi, F.K., 2006. Combined estimation of specific yield and natural recharge in a semi-arid groundwater basin with irrigated agriculture. *J. Hydrol.* 329, 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.022>
- 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: FRACTURE NETWORK PROPERTIES IN HARD ROCK. *Water Resour. Res.* 40. <https://doi.org/10.1029/2004WR003137>
- Maréchal, J.-C., Wyns, R., Lachassagne, P., Subrahmanyam, K., Touchard, F., 2003. Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socle : concordance avec la structure géologique des profils d'altération. *Comptes Rendus Geosci.* 335, 451–460. [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00082-8)
- Maurya, V.P., Chandra, S., Sonkamble, S., Lohithkumar, K., Nagaiah, E., Selles, A., 2021. Electrically inferred subsurface fractures in the crystalline hard rocks of an Experimental Hydrogeological Park, Southern India. *GEOPHYSICS* 86, WB9–WB18. <https://doi.org/10.1190/geo2020-0327.1>
- Mussa, K.R., Mjemah, I.C., Machunda, R.L., 2020. Open-Source Software Application for Hydrogeological Delineation of Potential Groundwater Recharge Zones in the Singida Semi-Arid, Fractured Aquifer, Central Tanzania. *Hydrology* 7, 28. <https://doi.org/10.3390/hydrology7020028>
- Nesny, A.Y., Nicaise, Y., Bertrand, A.H., Marc, Y.T., George, A., 2019. Apport de la télédétection et de la géophysique dans la cartographie des fractures hydrauliquement actives en zone de socle au centre-ouest du Bénin. *Eur. Sci. J. ESJ* 15. <https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n27p426>
- Nouradine, H. Évaluation des ressources en eau dans les aquifères de socle dans la région du Guéra (Tchad) : combinaison d'approches géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, géochimiques et d'apprentissage automatique. *Hydrologie*. Sorbonne Université, 2023. Français. [\(NNT : 2023SORUS665\)](#). [\(tel-04621625\)](#)
- Nouradine, H., Schamper, C., Valdes, D., Moussa, I., Ramel, D., Plagnes, V., 2023. Intégration de données géologiques, hydrogéologiques et géophysiques pour l'identification des zones favorables pour l'exploitation des eaux souterraines en contexte de socle granitique : cas des aquifères du massif du Guéra (Tchad).
- Osinowo, O.O., Olayinka, A.I., 2012. Very low frequency electromagnetic (VLF-EM) and electrical resistivity (ER) investigation for groundwater potential evaluation in a complex geological terrain around the Ijebu-Ode transition zone, southwestern Nigeria. *J. Geophys. Eng.* 9, 374–396. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/9/4/374>
- Place, J., Géraud, Y., Diraison, M., Herquel, G., Edel, J.-B., Bano, M., Le Garzic, E., Walter, B., 2016. Structural control of weathering processes within exhumed granitoids: Compartmentalisation of geophysical properties by faults and fractures. *J. Struct. Geol.* 84, 102–119. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.11.011>
- 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>
- Rodhe, A., Bockgård, N., 2006. Groundwater recharge in a hard rock aquifer: A conceptual model including surface-loading effects. *J. Hydrol.* 330, 389–401. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.03.032>
- Roques, C., Bour, O., Aquilina, L., Dewandel, B., Leray, S., Schroetter, Jm., Longuevergne, L., Le Borgne, T., Hochreutener, R., Labasque, T., Lavenant, N., Vergnaud-Ayraud, V., Mougin, B., 2014.

- Hydrological behavior of a deep sub-vertical fault in crystalline basement and relationships with surrounding reservoirs. *J. Hydrol.* 509, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.023>
- Rushton, K.R., 1986. Vertical Flow in Heavily Exploited Hard Rock and Alluvial Aquifers. *Ground Water* 24, 601–608. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1986.tb03708.x>
- Sharma, S.P., Baranwal, V.C., 2005. Delineation of groundwater-bearing fracture zones in a hard rock area integrating very low frequency electromagnetic and resistivity data. *J. Appl. Geophys.* 57, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2004.10.003>
- Soro, D.D., Koffi, K.V., Diabate, A., 2020. Assessment of the geophysical location of water boreholes in a geological transition zone, Burkina Faso.
- Soro, D.D., Koïta, M., Biao, C.A., Outoumbe, E., Vouillamoz, J.-M., Yacouba, H., Guérin, R., 2017. Geophysical demonstration of the absence of correlation between lineaments and hydrogeologically useful fractures: Case study of the Sanon hard rock aquifer (central northern Burkina Faso). *J. Afr. Earth Sci.* 129, 842–852. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.02.025>
- Taylor, R.G., Howard, K.W.F., 1999. Lithological evidence for the evolution of weathered mantles in Uganda by tectonically controlled cycles of deep weathering and stripping. *CATENA* 35, 65–94. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(98\)00118-0](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(98)00118-0)
- 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>
- Yalo, E.N., Kaki, M., Akokponhoue, B., Kounika, E., Zola-Sahossi, G., 2021. Apport de la tomographie de résistivité électrique pour la validation des linéaments en fractures : cas du département de Donga (Nord Bénin).

ANNEXE 1

Représentation des 61 sites interprétés